

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN POLİMER
MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞINDA KAYNAK PARAMETRELERİNİN
KAYNAK MUKAVEMETİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE KAYNAK
PARAMETRELERİNİN TAGUCHI DENEYSEL
TASARIM YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU**

Aydın ÜLKER

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vural CEYHUN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 25.12.2015

Bornova-İZMİR

2015

Aydın ÜLKER tarafından doktora tezi olarak sunulan “Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 25/12/2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Prof. Dr. Vural CEYHUN	
Raportör Üye	: Doç. Dr. Hüseyin ÖZDEN	
Üye	: Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. E. Çınar YENİ	
Üye	: Doç. Dr. Özler KARAKAŞ	

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimizasyonu” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

25 /12 / 2015

Aydın ÜLKER

ÖZET

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN POLİMER MALZEMENİN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA KAYNAK
PARAMETRELERİNİN KAYNAK MUKAVEMETİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
TAGUCHI DENEYSSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU**

ÜLKER, Aydın

Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Vural CEYHUN

Aralık 2015, 300 sayfa

Bu tezde Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma kaynağı işlemindeki önemli süreç ve takım parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Takım dönme hızı, ilerleme hızı ve takım omuz çapı değişken parametreler olarak kabul edilmiş ve kaynak mukavemeti için optimize edilmiştir. Kaynaklı bağlantılar üç farklı takım dönme, ilerleme hızı ve takım omuz çapı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklı bağlantıların kalitesi, çekme mukavemeti ve kaynak verimliliği ve makro yapı karakteristiklerinin incelenmesi ile değerlendirilmiştir. Optimum kaynak parametrelerini ayarlamak için istatistiksel deney tasarım tekniği olarak parametre tasarımında Taguchi yaklaşımı kullanılmıştır. Plakaların sürtünme karıştırma kaynağı için deneyler Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılarak rasgele şekilde düzenlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı proses parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için sinyal - gürültü oranı ve varyans analizi kullanılmıştır.

Varyans analizi ve sinyal – gürültü oranı için faktör etkileri grafiği ile, anlamlı parametreler ve kaynak parametrelerinin uygun değer kombinasyon seviyeleri elde edilmiştir. 1600 d/d’lık takım dönme hızı, 20 mm/dk’lık ilerleme

hızı ve 20 mm'lik takım omuz çapı değerleri ile iyileştirilmiş kaynak mukavemetinin elde edilebileceği bulunmuştur.

Sonuçlar sırasıyla takım ilerleme hızı, takım dönme hızı ve takım omuz çapının anlamlı faktörler olduğunu göstermiştir. Proses parametreleri için uygun seviyeler belirlendikten sonra Taguchi yönteminin etkinliğini kanıtlamak için doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak mukavemeti başlangıçtaki kaynak parametreleri ile elde edilen mukavemetlere göre yaklaşık %25 oranında iyileştirilmiştir. Sonuç olarak, kaynak verimliliğinde %57'den %71'e ulaşılacak şekilde kayda değer bir iyileşme gözlenmiştir.

Kaynak mukavemetini belirlemede karar verici bir rol oynayan kaynak plakalarının makro yapı incelemesi yapılarak morfolojik analiz yapılmış ve proses parametrelerinin her birinin kaynak mukavemeti ve morfolojisi üzerindeki etkileri görsel karşılaştırmalar yaparak incelenmiştir.

Kaynak plakaları örneklerindeki ilerleme ve yığma tarafındaki farklı malzeme akışı sebebiyle kaynağın yığma tarafında malzeme eksikliğinin meydana geldiği ve bu durumun bu alanda bir gevrek kırılmaya yol açtığı gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak mukavemeti, yüksek yoğunluklu polietilen, optimizasyon, Taguchi deneysel tasarım yöntemi, varyans analizi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WELDING PARAMETERS ON THE WELD STRENGTH IN FRICTION STIR WELDING OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE POLYMER MATERIAL AND OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS WITH TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

ÜLKER, Aydın

PhD in Mechanical Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Vural CEYHUN

December 2015, 300 pages

In this thesis, the effect of important process and tool parameters on joint strength in friction stir welding of high density polyethylene plates has been investigated by using Taguchi experimental design method.

The tool rotation, feed rate, tool shoulder diameter were considered as varying parameters and optimized with considerations of joint strength. Three different tool rotations, feed rates and shoulder geometries were used to fabricate the joints.

The quality of the joint was evaluated by examining the characteristics of the joint efficiency as a result of ultimate tensile strength and morphological analysis of macro-structures. The Taguchi approach of parameter design was used as a statistical design of experiment technique to set the optimal welding parameters. For friction stir welding of the plates, the experiments were arranged by using Taguchi's L_9 orthogonal array in randomized way. The signal to noise ratio and the analysis of variance are employed to investigate friction stir welding parameter effects on the joint strength.

From the analysis of variance and the signal to noise response graphs, the significant parameters and the optimal combination level of welding parameters

were obtained. It was found that using 1600 rpm of tool rotation, 20 mm/min of feed rate and 20 mm of shoulder diameter, improved joint strength may be achieved.

The results showed that feed rate, shoulder diameter and tool rotation were significant factors, respectively. A confirmation run is also performed to prove the effectiveness of the Taguchi method after the optimum levels of process parameters are determined. The weld strength was improved by about 25% from initial welding parameters. Consequently, a remarkable improvement was observed in joint efficiency as an increase from 57% to 71%.

By means of macro-structure examination of welded plates which plays a decisive role in determining the joint strength and the effects of each process parameters on joint strength and weld morphology were examined by morphological analysis and visual comparisons.

It was also observed that the lack of material flow in retreating side which leads to a brittle fracture due to different material flow in advancing side and retreating side on welded plate samples.

Keywords: Friction stir welding, weld (joint) strength, high density polyethylene, optimization, Taguchi experimental design method, analysis of variance

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında gerek bilimsel, gerekse manevi desteğini aldığım, katkıları ve yönlendirmeleri ile doktora eğitimi boyunca çok yararlandığım ve her zaman bilimsel ve manevi yardımlarını hiç esirgemeyen, verdiği güven ve samimiyeti için tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Vural CEYHUN hocama göstermiş olduğu yakın ilgi ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmaya önemli bilimsel katkılar sağlayan, kıymetli görüşlerinden yararlandığım, tez çalışması dışında da her konuda bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendirerek tekrar akademik çalışmalara dönüşte beni sürekli motive eden hocam Sn. Doç. Dr. Sami SAYER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmaları sürecinde görüşlerinden yararlandığım Sn. Prof. Dr. Emine Çınar YENİ, Sn. Doç. Dr. Hüseyin ÖZDEN'e de yorum, eleştiri ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında deney tasarımı ve kalite mühendisliği alanlarında ufkumu açan ve bu alana yönelmemi sağlayan Sn. Prof. Dr. Ömer SAATÇIOĞLU'na da teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmeme vesile olan çok kıymetli annem Türkan ÜLKER'e, merhum babam Mustafa ÜLKER'e ve akademik alana tekrar dönüşte teşvik eden ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ablam Doç. Dr. Dilek Ülker ÇAKIR'a teşekkür ederim.

Ve her zaman yanımda olan, kendime güvenimi ve inancımı sağlamlaştıran ve sonsuz sevgisini hep yanımda hissettiğim hayat arkadaşım Yasemin ÜLKER'e ve oğlum Denizalp ÜLKER'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Babama.....

Yalnız ve güzel ülkeme.....

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xxi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxxiv
1.GİRİŞ	1
2.POLİMERLER VE POLİETİLEN.....	3
2.1. Polimer Malzemeler	3
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması ve Yapısal Özellikleri.....	5
2.3. Polimer Malzemelerin Fiziksel Özellikleri	7
2.3.1. Polimer malzemelerin termal özellikleri.....	8
2.3.2. Polimer malzemelerin reolojik özellikleri	9
2.3.3. Polimer malzemelerin mekanik özelliklerine ısının etkisi.....	11
2.4. Polimerlerin Termal İşlem Özelliklerine Göre Sınıflandırılması.....	12
2.4.1. Termoplastikler	12
2.4.2. Termoset plastikler	14
2.5. Polietilen.....	15
2.6. Polietilenin Sınıflandırılması.....	17
2.6.1. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE)	17
2.6.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE).....	18
2.6.3. Orta yoğunluklu polietilen (MDPE)	20
2.6.4. Alçak / Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)	20

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ	22
3.1. Polimer Malzemelerin Mekanik Bağlantı Yöntemleri.....	23
3.2. Polimer Malzemelerin Yapıştırma (Adezyon) Yöntemleri.....	24
3.3. Polimer Malzemelerin Reolojik Kaynak Kabiliyeti	25
3.4. Polimer Malzemelerin Kaynak Yöntemleri	26
3.4.1. Sıcak plaka kaynağı	29
3.4.2. Sıcak gaz kaynağı	33
3.4.3. Ekstrüzyon kaynağı	34
3.4.4. Sürtünme kaynak yöntemleri.....	37
3.4.5. Ultrasonik kaynak.....	37
3.4.6. Vibrasyon (titreşim) kaynağı	39
3.4.7. Lazer kaynağı	41
3.4.8. Yüksek frekans - radyo frekans (RF) kaynağı.....	46
3.4.9. Mikrodalga kaynak yöntemleri.....	48
3.4.10. Rezistans kaynak yöntemleri	49
3.4.11. İndüksiyon kaynak yöntemleri.....	50
4.SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	52
4.1. Sürtünme Kaynağı	52
4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Gelişimi	54
4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulanışı.....	56
4.3.1. SKK yapılacak parçaların sabitlemesi	56

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3.2. SKK prosesinde bağlantıların imalatı	57
4.4. SKK prosesinde malzeme akışı	61
4.5. SKK Tipleri	63
4.5.1. Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (ÇSKK).....	64
4.5.2. Hibrit sürtünme karıştırma kaynağı (HSKK).....	65
4.5.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK).....	66
4.6. Kaynak Geometrilere ve Uygulama Alanları (Kaynak Pozisyonları)	68
4.6.1. Küt alın kaynağı	69
4.6.2. Bindirme kaynağı	69
4.6.3. Boru ve profil kaynağı	73
4.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Mikro yapısı	73
4.7.1. Kaynak metali (Ana metal bölgesi)	73
4.7.2. Termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB - TMAZ)	75
4.7.3. Isıdan etkilenmiş bölge (ITAB - HAZ).....	75
4.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Proses Parametreleri.....	75
4.9. SKK Parametrelerinin Kaynak Bölgesi Üzerindeki Etkisi	78
4.9.1. Takım geometrisi	78
4.9.2. Kaynak hızı, takımın dönme hızı ve takım açısı.....	89
4.10. SKK Birleştirmelerinin Mekanik Özellikleri ve Kaynak Verimliliği	91
4.11. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Uygulama Alanları.....	91
4.11.1. Gemi inşa endüstrisi	92
4.11.2. Uzay - havacılık endüstrisi	93
4.11.3. Demiryolu endüstrisi	94

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.11.4.Otomotiv endüstrisi.....	95
4.11.5.Nükleer enerji sektörü.....	97
4.11.6.Askerî zırhlı araç sektörü	98
4.12.Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları	98
4.12.1.Metalürjik avantajlar	98
4.12.2.Çevresel avantajlar.....	99
4.12.3.Enerji avantajları	99
4.12.4. Üretimde düşük maliyet	99
4.12.5.Yeni ürün tasarımları ve geliştirilmeleri için fırsatlar sağlayan kaynak kalitesi	100
4.12.6.Kalite güvenceli üretim.....	101
4.12.7.Güvenlik.....	101
4.13.Sürtünme Karıştırma Kaynağının Dezavantajları	102
5.POLİMERLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	103
6.OPTİMİZASYON VE DENEY TASARIMI	122
6.1. Modelleme ve Optimizasyon Teknikleri	122
6.2. Deney Tasarım Yöntemlerinin Gelişimi	123
6.3. OFAT	125
6.4. Deney Tasarımı	126
6.5. Deney Tasarımı İlkeleri	129
6.5.1. Rassallastırma.....	130
6.5.2. Tekrarlama.....	130
6.5.3. Bloklama.....	131

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.6. Deney Tasarımı Aşamaları.....	131
6.6.1. Problem seçme ve tanımlama	132
6.6.2. Faktörleri, seviyelerini ve aralıklarını seçme.....	132
6.6.3. Çıktı değişkeninin seçilmesi	133
6.6.4. Deney tasarımını seçme	133
6.6.5. Deneyi gerçekleştirme	133
6.6.6. Verilerin istatistiksel analizlerini yapma	134
6.6.7. Sonuç ve öneriler	134
6.7. Deney Tasarım Türleri	135
6.7.1. Tesadüf parselleri deney tasarımı	135
6.7.2. Tesadüf blokları deney tasarımı.....	136
6.7.3. Latin karesi deney tasarımı	137
6.7.4. Tam faktöriyel deney tasarımları	138
6.7.5. Kısmi faktöriyel tasarım	140
6.8. Deney Tasarım Uygulamaları	141
6.9. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi	142
6.9.1. Taguchi felsefesi	143
6.9.2. Taguchi yönetiminde kalite kontrol sistemi.....	145
6.9.3. Sistem tasarımı.....	146
6.9.4. Parametre tasarımı	147
6.9.5. Tolerans Tasarımı	148
6.9.6. Taguchi yönteminde parametre tasarımı.....	149
6.9.7. Taguchi kayıp fonksiyonu	151

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.9.8. Performans karakteristiği (kalite karakteristiği)	153
6.9.9. Performans istatistiği ve sinyal / gürültü (S/N) oranı	154
6.9.10. Taguchi yönteminin temel çalışma biçimi	156
6.9.11. Deney Tasarımı	158
6.9.12. Taguchi yönteminin uygulama prosedürleri	159
6.9.13. Taguchi yöntemi ile diğer deney tasarımı türleri arasındaki farklar	181
6.9.14. Taguchi yöntemine eleştiriler.....	183
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	185
7.1. Malzeme, Ekipman ve Takımlar.....	185
7.1.1. Polimer malzeme – HDPE.....	185
7.1.2. SKK prosesi için freze tezgahı ve bağlama aparatı	185
7.1.3. SKK takımları.....	186
7.2. Ön araştırma, ön tasarım ve değerlendirme deneyleri	187
7.3. Taguchi Yöntemi Uygulaması için SKK Parametrelerin ve Seviyelerinin Belirlenmesi.....	187
7.4. Taguchi Ortogonal Dizisinin Seçilmesi	188
7.5. Deney Tasarım Matrisi	188
7.6. Proses Öncesi Hazırlıklar.....	190
7.6.1. Kaynak plakalarının kesilmesi.....	190
7.6.2. Bağlama aparatının sabitlenmesi	190
7.6.3. Takım ayarı.....	190
7.6.4. Bağlama aparatı üzerine plakaların sabitlenmesi	191
7.6.5. Tezgah çalışma parametrelerinin ayarlanması	191

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.6.6. Takımın kaynak hattı boyunca ayarlanması	192
7.7. Kaynaklı bağlantıların üretimi	192
7.7.1. Takımın dalması (Dalma derinliği).....	192
7.7.2. Takım Ön Isıtma Süresi	193
7.7.3. Kaynak hattı boyunca takımın ilerlemesi	193
7.7.4. Kaynak yönü ve kaynak hattı tipi	194
7.7.5. Takımın geri çekilmesi ve kaynağın tamamlanması.....	194
7.7.6. Takımın soğuması ve temizliği.....	195
7.7.6.1. Deney tasarım matrisindeki deneylerin ve tekrarlarının tamamlanması	195
7.8. Kaynaklı Bağlantıların Karakterizasyonu – Çekme Testleri ve Görsel Muayene	196
7.8.1. Kaynak numunelerini tanımlanması ve kodlama.....	196
7.8.2. Çekme testi numunesi çıkarma	196
7.8.3. Çekme testi için numune hazırlama – ölçüm noktalarının işaretlenmesi.	198
7.8.4. Çekme testi	197
7.8.5. Numunelerin kaynak mukavemeti	198
7.8.6. Baz malzemenin maksimum çekme mukavemeti.....	198
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	201
8.1. Kaynak Mukavemeti ve Kaynak Verimliliği için Taguchi Yöntemi Sonuçları.....	201
8.1.1. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi	201
8.1.2. Ortalamalar ve S/N oranları için sonuç tabloları ve ana etki (faktör etkileri) grafikleri	202

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
8.1.3. Normal olasılık ve artık değerler grafikleri	206
8.1.4. Varyans analizi (ANOVA)	207
8.1.5. Fisher testi (F test)	208
8.1.6. Faktörlerin kaynak mukavemetine katkı oranı	209
8.1.7. Optimum kaynak mukavemeti ve verimliliğinin tahmini.....	210
8.1.8. Optimum koşulda sonuçların güven aralığı	214
8.1.9. Deneylerin ve sonuçların doğrulanması	215
8.1.10. İlk kaynak mukavemeti ve verimliliğinin hesaplanması.....	216
8.2. Kaynak Plakalarının Görsel İncelemesi ve Morfolojik Analizi.....	221
8.3. Proses Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti ve Morfolojisi Üzerindeki Etkileri.....	222
8.3.1. Takım dönme hızının etkisi	222
8.3.2. Takım ilerleme hızının etkisi	224
8.3.3. Takım omuz çapının etkisi	226
8.4. Kaynağın ilerleme (AS) ve yığma (RS) tarafların karşılaştırması	227
8.5. Çekme Testi Sonuçları ile ilgili Gözlemler (Hasar Analizi).....	229
9. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	233
10. ÖNERİLER.....	236
KAYNAKLAR DİZİNİ	237
ÖZGEÇMİŞ	255
YAYINLAR.....	256

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Polimerlerin diziliş biçimleri.....	6
2.2. Polimer moleküllerinde ortaya çıkabilecek dallanma tipleri.....	6
2.3. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve kristal erime sıcaklığı (T_e) grafiği	10
2.4. Termoplastik ve termoset plastiklerin molekül zincirleri arasındaki farklar	15
2.5. Etilen – polietilen gösterimi	16
2.6. Polietilen malzemesinin kimyasal yapısı (şematik)	16
2.7. Polietilenlerin yoğunluklarına göre sınıflandırılması.....	18
2.8. HDPE polimer yapısı	19
2.9. HDPE kristal yapısı	19
2.10. LDPE polimer yapısı	21
3.1. Polimerlerin birleştirilme teknikleri	23
3.2. Polimerlerin kaynakla birleştirilme yöntemleri.....	29
3.3. Sıcak eleman kaynağı işlem basamakları	31
3.4. Sıcak plaka kaynağının dört aşamasını gösteren basınç-zaman grafiği	31
3.5. SPK prosesinde sıcaklık dağılımı.....	33
3.6. Sıcak gaz kaynağı uygulaması şematik gösterimi.....	34
3.7. Ekstrüzyon kaynağının şematik gösterimi	35
3.8. Hareketli kaynak torcu ve sabit ekstruder uygulaması.....	36
3.9. Ultrasonik kaynak makinası	38

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

3.10. Amorf ve kısmi kristal termoplastiklerin lazer ışınını soğurma davranışları.....	39
3.11. Lazer kaynağının şematik gösterimi	41
3.12. Amorf ve kısmi kristal termoplastiklerin lazer ışınını soğurma davranışları.....	42
3.13. Direkt lazer kaynağı şekilleri	43
3.14. Direkt lazer kaynağı	45
3.15. Çeşitli bağlantı tasarımları	46
3.16. Elektromanyetik alanda moleküllerin polarizasyonu.....	46
3.17. Yüksek frekans kaynağının şematik gösterimi	47
3.18. RF kaynak ucu tipleri.....	48
3.19. Mikrodalga kaynak yöntemi	49
3.20. Rezistans (implant, elektro-füzyon) kaynağının şematik gösterimi.....	50
3.21. İndüksiyon kaynağının şematik gösterimi	51
4.1. Isı oluşturmak için kullanılan sürtünme hareketleri.....	52
4.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi	53
4.3. (a) Sürtünme ekstrüzyonu (b) sürtünme hidropillar (c) üçüncü eleman sürtünme birleştirmesi.....	55
4.4. SKK yöntemi.....	55
4.5. SKK tekniğinde kaynak edilecek parçaların sabitlenmesi	57
4.6. SKK tekniğinin şematik çalışma prensibi	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7. SKK takımının iş parçasına daldırılması.....	59
4.8. SKK yönteminin aşamaları	60
4.9. SKK işleminde (a) Sıcak metalin akış modeli ve (b) farklı mekanik işlemlerin olduğu bölgeler	62
4.10. Kalın levhalarda çift taraflı SKK uygulaması	64
4.11. Çift taraflı olarak kaynak edilmiş 6082-T6 Al-alajını levhalar:	64
4.12. SSK'nın hibrit olarak uygulanması: (a) şematik gösterim, (b) uygulanma şekli.....	65
4.13. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı: (a) dalma, (b) birleştirme, (c) çıkma	67
4.14. Tekrar doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı	67
4.15. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı değişik hareket biçimleri: (a) SKNK, (b) Dikişli SKNK, (c) Salımlı SKNK.....	68
4.16. SKK için birleştirme konfigürasyonları	69
4.17. Alt Kısmı Geniş Üç Oluklu Takım. a) Düz Oluklu, b) Sol Tarafa Oluklu, c) Sağ Tarafa Oluklu.....	71
4.18. Eğri Takım: a) yandan Görünüş, b) önden Görünüş ve c) eğri hareketten dolayı etrafı çevrilmiş kavisli bölge.....	71
4.19. SKK yönteminin uygulanabildiği kaynak geometrileri örnekleri; (a) küt alın birleştirme, (b) bindirme birleştirmesi, (c) köşe birleştirme ve (d) çift taraflı birleştirme	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.20. SKK yöntemiyle birleştirilebilen, farklı geometrilere sahip iş parçası örnekler	72
4.21. SKK'nın boru kaynaklarında uygulaması	73
4.22. SKK'nın makro yapısı; (A) Ana Metal Bölgesi, (B) Isı Etkisi Altında Kalan Bölge (ITAB), (C) Termo Mekanik Olarak Etkilenen Bölge (TMEB), (D) Karışım Bölgesi	74
4.23. SKK uygulanmış A356 için farklı parametrelerin kaynak metali şekline etkisi (a) 300 d/d 51 mm/dk,(b) 900 d/d, 203 mm/dk (Standart dişli pim)	74
4.24. SKK proses parametreleri için Ishikawa diyagramı	76
4.25. SKK'da takım ve işlem parametreleri	77
4.26. Kaynak takımının parçaya dalma ve ilerleme mekanizması	79
4.27. Sürtünme karıştırma aparatı	79
4.28. SKK yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları	80
4.29. SKK yönteminde kullanılan alışılmış silindirik pimli takımlara örnek (a) Küresel ağızlı silindirik pimli takım (b) Düz ağızlı silindirik pimli takım	81
4.30. SKK yönteminde takımlarda kullanılan omuz profillerine örnekler	81
4.31. Çeşitli pim profillerinden üretilen Whorl™ takımlar	82

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.32. 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımı kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü	82
4.33. MX-Triflute™ piminin esin kaynağı deniz kabuklarıdır	83
4.34. Flared-Triflute™ takım kullanılarak bindirme kaynağının gerçekleştirilmesi ve oluşan kaynak dikiş kesiti	84
4.35. TWI tarafından geliştirilen Flared-Triflute™ takımı	84
4.36. Kaynak işleminde kullanılan bobin takımı (1) iş parçası, (2) üst omuz, (3) prob-pim, (4) alt omuz (5) tepki kuvveti	85
4.37. Skew-Stir™ takımının çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir™ takımının görünüşü	86
4.38. a) Trivex™, b) MX-Trivex™ türü SKK takımlar	86
4.39. (a) Profiliz düz takım, (b) kısa yivli takım, (c) uzun yivli takım, (d) dairesel yivli takım, (e) geniş açılı dairesel yivli takım	88
4.40. Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı	89
4.41. SKK yönteminin şematik gösterimi ve takım açısının değişimi ile takımın dalma derinliği arasındaki ilişki	90
4.42. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin SKK ile birleştirilmesi	92
4.43. Boeing firmasında roket yakıt tankı imalatı	93

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.44. Eclipse 500 özel jetlerin üretiminde SKK uygulamaları	93
4.45. SKK ile imal edilen Airbus A340-600 modellerinde kanat kaburgaları; (a) Kanadın SKK prosesi, (b) SKK yapılmış kanat, (c) A380 uçak modeli	94
4.46. Japonya'da SKK'nın kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan alüminyum paneller	94
4.47. Avrupa araçlarındaki alüminyumun yıllara göre kullanım miktarları	95
4.48. ABD'nde SKK uygulaması ile üretilmiş ilk parça: Lincoln Town Car limuzinlerinin süspansiyon bağlantıları	96
4.49. Robotik SKNK uygulanan Mazda R8X arka kapısı ve dış panel görüntüsü	96
4.50. SKK yöntemi ile Norveç' te üretilmiş otomobil jantı	97
4.51. Bakır korozyon bariyeri ve çelik iç yüzeye sahip yakıt muhafazası ve 5 cm kalınlığındaki bakır kapağın kesiti	97
4.52. SKK yöntemi uygulanmış AAAV	98
5.1. İleri-geri hareket eden SKK bıçağı	104
5.2. SKK prosesinde ısıtılmış takımın gösterilişi	105
5.3. Termoplastik polimerlerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan ısıtıcı sistemli takım	107
5.4. Termoplastik polimerlerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan 6,4 - 9,5 ve 12,7 mm pim çaplı takımlar	108

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

5.5. 6 mm kalınlığında PP levhaların SKK yöntemi ile birleştirilmesi	
(a) farklı takım ilerleme hızı ve pim çapına göre oluşan	
kaynak bölgeleri (b) farklı pabuç sıcaklığı ve baskı	
süresine göre oluşan kaynak bölgeleri	109
5.6. Çift taraflı SKK uygulamasında kaynak bölgesinin	
(a) şematik (b) fotografik gösterimi	110
5.7. SKNK kaynağının çift taraflı uygulaması	111
5.8. Sıyırıcılı ahşap omuzlu SKK takımı	114
5.9. HDPE malzemenin ısı destekli SKK prosesi	115
5.10. Polimer SKK prosesi için tasarlanan takımın	
(a) şematik (b) fotografik gösterimi	116
5.11. PE malzeme için SKK alın, bindirme ve nokta kaynağı	
mukavemet değerleri karşılaştırması	117
5.12. Sıcak pabuç takım tasarımının şematik gösterimi	118
5.13. Robotik SKK uygulaması	119
5.14. Uzun sabit omuzlu ve konik dişli pimli SKK takımı	119
5.15. İki omuzlu takımla SKK prosesi	120
5.16. Saat yönü ve saat yönü tersine dönen takımın etkisi	121
6.1. Modelleme (a) ve optimizasyon (b) tekniklerinin sınıflandırılması	123
6.2. OFAT yaklaşımı (a) Sıcaklık için OFAT (b) pH için OFAT	
(c) Gerçek yüzeyde OFAT	127
6.3. Bir prosese veya sistem için genel modelleme	129

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.4. Tesadüf blokları DT örneği.....	136
6.5. Taguchi'nin üretim - kalite çemberi.....	146
6.6. Taguchi yönteminin sistematığı	147
6.7. Parametre tasarımı akış şeması	150
6.8. Geleneksel kayıp fonksiyonu	151
6.9. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu	152
6.10. "En küçük en iyi" kayıp fonksiyonunun grafiksel gösterimi	153
6.11. "En büyük en iyi" kayıp fonksiyonunun grafiksel gösterimi	153
6.12. $L_4 (2^3)$ ve 3 seviyeli $L_9 (3^4)$ ortogonal dizileri	167
6.13. L_4 Lineer grafiği.....	170
6.14. Faktör etkilerinin grafiksel olarak gösterimi.....	177
7.1. Bağlama aparatına yerleştirilmiş kaynak plakaları ve SKK işlemi.....	186
7.2. Düz omuz platformlu takımının bölümleri	186
7.3. 16, 20, 24 mm'lik omuz çapında üç farklı SKK takımı.....	187
7.4. HDPE kaynak plakalarının boyutları	190
7.5. Takım dalma derinliği (penetrasyon)	193
7.6. Takım dönüş yönü ve pim yiv yönü.....	194
7.7. SKK proses adımları	195
7.8. Çekme testi numunesi çıkarma kalıbı	196
7.9. Çekme testi numunesinin kaynak hattına dik çıkarılması.....	197
7.10. Çekme testi numunesi çıkarma kalıbı ile numunelerin hidrolik preste çıkarılması	197

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
7.11. Kaynak mukavemeti için çekme testi numunesi	199
7.12. 721 no'lu çekme testi numunesi için kaynak mukavemeti (MPa) - birim şekil değiştirme grafiği	199
7.13. Kaynak bağlantısının çekme testi.....	200
7.14. Baz malzeme için çekme mukavemeti (MPa) - birim şekil değiştirme grafiki	200
8.1. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)	204
8.2. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Takım ilerleme hızı – kaynak mukavemeti)	204
8.3. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)	205
8.4. Faktör etkileri grafiği (Takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)	205
8.5. Faktör etkileri grafiği (Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti).....	206
8.6. Faktör etkileri grafiği (Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti).....	206
8.7. Kaynak mukavemetleri için normal olasılık ve artık değerler grafikleri ..	207
8.8. Kaynak parametrelerinin katkı oranları.....	210
8.9. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Optimum takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)	211
8.10. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Optimum takım ilerleme hızı – kaynak mukavemeti)	212

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

8.11. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (Optimum takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)	212
8.12. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (İlk takım dönme hızı – kaynak mukavemeti).....	216
8.13. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (İlk takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)	217
8.14. S/N oranları için faktör etkileri grafiği (İlk takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)	217
8.15. Taguchi deneysel tasarım yöntemi akış şeması	220
8.16. Minimum (a), maksimum (b) çekme mukavemetine sahip SKK numunelerinin görsel incelemesi	222
8.17. HDPE plakalar için yetersiz malzeme karışı.....	223
8.18. HDPE malzemenin yanması, soyulması ve bozunması	224
8.19. Orta seviyede takım dönme hızı ve yüksek ilerleme hızında zayıf ve kabul edilemeyecek kaynak hattı görünümü (800 d/d, 12,5 mm/dk, 16 mm).....	225
8.20. Orta seviyede takım dönme hızı ve yüksek ilerleme hızında zayıf ve kabul edilemeyecek kaynak hattı görünümü (1250 d/d, 40 mm/dk, 16 mm).....	226
8.21. Takım omuz çapının etkisi.....	228
8.22. SKK prosesinde ilerleme ve yığma kenarı oluşumu	228

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

8.23. Pim yüzeyinde çevresel ve ilerleme hızı karşılaştırmasının şematik gösterimi	229
8.24. Kaynağın yığma (RS) ve ilerleme (AS) kenarlarındaki morfolojisi	230
8.25. Üç farklı kaynak modu için kaynak kalitesi	232

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Konvansiyonel sıcak plaka kaynağında kaynak parametreleri	33
4.1. SKK prosesinde pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi	80
4.2. TWI tarafından tasarlanmış bazı takımlar ve özellikleri.....	88
5.1. Çeşitli tür termoplastik polimerlerin SKK bağlantılarının çekme deney sonuçları	106
6.1. Tesadüf parselleri DT örneği	136
6.2. Latin karesi DT örneği	137
6.3. İmalat endüstrisi için Latin karesi DT örneği	138
6.4. Tam faktöriyel tasarım örneği.....	139
6.5. 2^{4-1} kesirli faktöriyel tasarımı.....	140
6.6. Taguchi ve tam faktöriyel tasarım için kombinasyonlar.....	158
6.7. 2^k ve Taguchi tasarımı deney planları	166
6.8. İki seviyeli OD'lerin seçimi.....	169
6.9. Üç seviyeli OD'lerin seçimi.....	170
6.10. L_4 üçgen tablo	171
7.1. HDPE malzemenin ana özellikleri.....	185
7.2. Kaynak parametreleri ve seviyeleri.....	188
7.3. Deney tasarımı için $L_9(3^4)$ ortogonal dizisi.....	189
7.4. $L_9(3^4)$ - kaynak parametre ve seviyeleri ortogonal dizisi.....	189
7.5. Deney tekrar sıraları.....	191
8.1. Çekme deneyi sonuçları.....	201

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.2. S/N oranı için sonuç tablosu (En yüksek- en iyi).....	203
8.3. Ortalamalar için sonuç tablosu	203
8.4. Kaynak mukavemeti için ANOVA Sonuçları	208
8.5. Fisher test değerleri	209
8.6. Kaynak parametreleri için F-test değerleri.....	209
8.7. Optimum kaynak parametreleri ve seviyeleri	211
8.8 Farklı istatistikler için güven aralıkları	215
8.9. İlk kaynak parametreleri ve seviyeleri	216
8.10. Doğrulama deneylerinin sonuçları	219

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$1- \alpha$	Güven düzeyi
a	Deney sayısı
A_n	A faktörü n. seviyesinde olduğunda gözlenen sonuçların toplamı
$A_x B_y C_z$	Üç faktörlüğü (A,B,C) bir deneyde A, B, C faktörlerinin x,y ve z seviyelerindeki deney şartları kombinasyonu
b	Her kolondaki seviye sayısı
c	Faktör sayısı
CI	Confidence interval, güven aralığı
d	Kaynak parçası kalınlığı
f	Serbestlik derecesi
f_A	A faktörünün serbestlik derecesi
F_A	A faktörüne ait F değeri (Fisher test değeri)
f_e	Hata serbestlik derecesi
f_T	Deney planı toplam serbestlik derecesi
$F_\alpha (f_1, f_2)$	α anlamlılık düzeyinde f_1 ve f_2 serbestlik derecesi için varyans oranı
k	Sapmayı parasal birime dönüştüren katsayı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
k_A	A faktörünün seviye sayısı
k_f	Faktör sayısı
KM	Kaynak mukavemeti
KM_i	İlk kaynak mukavemeti
KM_{opt}	Optimum kaynak mukavemeti
$L(y)$	Kayıp fonksiyonu
$L_a^{(bc)}$	Ortogonal dizi
L_o	Plastikleşme bölgesinin uzunluğu
MSD	Mean square deviation, prosesteki çıktı karakteristiği için ortalama sapmanın karesi
n	Takım dönme hızı
N	Deney sayısı
n_e	Eşdeğer tekrarlama sayısı
$\emptyset$	Omuz çapı
P_A	A faktörünün katkı yüzdesi
r	Deney tekrar sayısı
s^2	Varyans

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
SD	Square deviation, sapmaların karesi
SS' _A	A faktörünün karesinin net toplamı
SS _A	A faktörünün kareler toplamı
SS _e	Hata kareler toplamı
SS _T	Toplam kareler toplamı
t	Batma derinliği
T	Nominal ya da hedef değer
T	Tüm gözlemlerin toplamı
T _e	Erime sıcaklığı, kristal erime sıcaklığı
T _g	Camsı geçiş sıcaklığı
T _H	Isıtıcı plaka sıcaklığı
T _m	Kaynak mukavemetlerinin ortalaması
u	Bindirme miktarı
v	Kaynak hızı
V _A	A faktörünün varyansı
V _e	Hata varyansı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
y	Performans karakteristiği
y_j	j. Gözlem
α	Eğim açısı
α	Anlamlılık düzeyi
δ	Dielektrik kayıp faktörü
η	Kaynak verimliliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
ANN	Artificial neural networks, yapay sinir ağları
ANOVA	Analysis of variance – varyans analizi
AS	Advancing side, ilerleme kenarı
AYPE	Alçak yoğunluklu polietilen
BYU	Brigham Young Üniversitesi
CI	Confidence interval, güven aralığı
CNC	Computerized numerical control
ÇDYPE	Çizgisel düşük yoğunluklu polietilen
ÇSKK	Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı, double pass FSW
ÇYMAPE	Çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
d/d	Devir/dakika (takım dönme hızı)
DNK	Direnç nokta kaynağı
DOE	Design of experiment, deney tasarımı
DOF	Degree of freedom, serbestlik derecesi
DT	Deney tasarımı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
DYPE	Düşük yoğunluklu polietilen
F test	Fisher testi
FSSW	Friction stir spot welding
FSW	Friction stir welding
FW	Friction welding
GA	Genetic algorithms, genetik algoritmalar
HAZ	Heat affected zone, ısıdan etkilenmiş bölge
HDPE	High density polyethylene
HSKK	Hibrit sürtünme karıştırma kaynağı
HZG	Helmholtz-Zentrum Geesthacht
ICI	Imperial Chemical Industries
IR	Infrared, kızılötesi
ITAB	Isıdan etkilenmiş bölge
L	Latin karesi
LAYPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
LDPE	Low density polyethylene

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
LDYPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	Lineer low density polyethylene
MDPE	Medium desity polyethylene
MIG	Metal inert gaz kaynağı
mm/dk	milimetre/dakika (takım ilerleme hızı)
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
OD	Ortogonal dizi, orthogonal array
OFAT	One factor at a time, her seferinde tek faktör
OYPE	Orta yoğunluklu polietilen
PA	Poliamid, naylon
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PMMA	Polimetil metakrilat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
PTFE	Politetrafloretilen, teflon
PVC	Polivinil klorür
QFD	Quality function deployment, kalite fonksiyonu yayılımı
RF	Radio frequency, radyo frekansı
RKK	Reolojik kaynak kabiliyeti
RS	Retreating side, yığma kenarı
RSM	Responce surface method, yanıt yüzeyleri yöntemi
S/N	Signal to noise, sinyal - gürültü
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
SKNK	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı
SPK	Sıcak plaka kaynağı
TIG	Tungsten inert gaz kaynağı
TMAZ	Thermo-mechanically affected zone, termomekanik olarak etkilenmiş bölge
TMEB	Termomekanik olarak etkilenmiş bölge
TRIZ	Yaratıcı problem çözme metodolojisi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
TWI	The Welding Institute, İngiltere Kaynak Enstitüsü
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene
UTS	Ultimate tensile strength, çekme dayanımı
UV	Ultraviyole, morötesi
YYPE	Yüksek yoğunluklu polietilen

1. GİRİŞ

Bu çalışma Taguchi deneysel tasarım yönteminin tam olarak uygulanmadığı birçok istatistiksel deney tasarımı çalışmalarında görülen eksikliği yöntemi bütünsel olarak uygulayarak gidermek, polimerlerin kaynak yöntemlerinden birisi olan sürtünme karıştırma kaynağındaki önemli proses parametrelerinin optimizasyonunu deneysel tasarım yöntemi kullanarak yapmak ve doğrulama deney ve testleri ile yöntemin başarısını ortaya koymak amacıyla yapılmıştır.

Polimer malzeme olarak çok geniş bir kullanım alanı olan yüksek yoğunluklu polietilen kullanılarak çalışma sonucunda elde edilen bilgilerin giderek yaygınlaşan SKK uygulamalarında pratik olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Araştırmada özellikle üretim ekonomisi ve maliyet mühendisliği açısından önemli kriterler olan proses hızlarının sürtünme karıştırma kaynağı üzerindeki etkileri üzerinde durulmuş ve imalat ve proses mühendisliği noktasında da kaynak prosesinde kullanılan takım geometrisinin, diğer parametreler ile birlikte optimizasyonu yapılmıştır.

Prosess parametrelerinden takım ilerleme hızı, takım dönme hızı ve takım çapının optimizasyonu için deney tasarımı yapılırken takım eğim açısı ve takım dalma derinliği sabit tutulmuştur.

Temel olarak araştırmada deney tasarımı ile ilgili amaçlananlar;

- Sürtünme karıştırma kaynağında Taguchi parametre tasarımı yönteminin sistematik ve bütünleyici bir prosedür olarak ele alınması,
- Sürtünme karıştırma kaynağında parametrelerin spesifik bir kombinasyonu ile optimum kaynak performansını tanımlamak için Taguchi parametre tasarımı yönteminin, Taguchi yöntemin sistem tasarımı ve tolerans tasarımı aşamalarının istatistiksel veri analizi ve istatistiksel test uygulamaları ile sonuçlara belli bir istatistiksel güven düzeyinde ulaşılmasıdır.

Çalışma hedefleri ise;

- Her bir kaynak parametresinin (takım ilerleme ve dönme hızlarının ve takım geometrisi) kaynak mukavemetine olan etkisi araştırmak,
- Erişilebilecek en yüksek kaynak mukavemetini veren parametrelerin kombinasyonunu değerlendirmek,
- Kaynak mukavemeti üzerindeki her bir kaynak parametresinin katkısını yüzdesel olarak ifade edebilmek, bu yolla kaynak mukavemetindeki değişim hassasiyetini, parametre değişimlerinin hassasiyeti açısından ortaya koyabilmek,
- Kaynak mukavemeti optimizasyonu için faktör etkileri grafiklerini ve tablolarını oluşturabilmektir.

2. POLİMERLER VE POLİETİLEN

2.1. Polimer Malzemeler

Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir.

Bu moleküller vücudumuzda proteinler ve enzimler gibi biyolojik kimyasallar olarak bulunurken, bitkilerde selüloz veya nişasta, gündelik hayatta ise genel olarak bilindiği gibi polimer plastikler, kauçuklar vb. olarak karşımıza çıkarlar.

Bazı polimerlerin moleküllerinin, geleneksel kimyasal maddelerin moleküllerinden çok büyük olabileceğine yönelik ilk görüş 1920’de Alman kimyager Harman Staudinger tarafından ortaya atılmıştır. Staudinger’in bu önerisi 10 yıl sonra 1930’da kabul edilmiş ve polimer kelimesi de 1930’lardan sonra bilimsel alanda kullanılmaya başlanmıştır.

“Poli” Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Buna basit bir örnek olarak “Polistiren” verilebilir. Polistiren (PS) birçok stiren monomerinin bir araya gelmesi ile oluşmuştur. Stiren monomerinin polimerizasyonu ile bu monomeri çok sayıda içeren PS elde edilmektedir.

Harman Staudinger ilk defa polimerizasyon koşullarının polimer oluşumu üzerine etkisini tanımlamıştır. Staudinger kimyanın bu alanında yaptığı çalışmalarla 1953 yılında kimya dalında Nobel ödülünü almıştır. Bu alanda ilk kez çalışan araştırmacılar doğal polimerleri taklit ederek işe başlamışlar ve 1930 yılında Wallace Carothers naylonu sentezlemeyi başarmıştır.

İkinci Dünya Savaşı’ndan bu yana birçok polimer laboratuvarlarda üretilmiş ve ayrıca birçok polimer endüstriyel ölçekte üretilmeye başlamıştır (Çelebi, 2008)

Polimer kimyası ve polimer teknolojisi bilimleri zaman içerisinde hızla gelişerek ayrı ve önemli birer bilim dalı haline gelmişlerdir (Saçak, 2012).

Polimerler, mer veya monomer (tekrarlanan birimler) denilen basit birimlerin kimyasal yöntemlerle birleştirilmeleri ile oluşmuş, yüksek molekül ağırlıklı ve zincir şeklinde bir yapıya sahip olan sentetik malzemelerdir. Merler, birbirlerine kovalent bağlarla bağlanarak büyük moleküller oluşturabilen küçük

mol kütleli kimyasal maddelerdir. Çok sayıda merin kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu iri molekülün adı ise polimerdir. Mer molekülleri, polimerizasyon tepkimeleri ile birbirlerine bağlanırlar ve polimer molekülüne dönüşürler (Mert, 2010).

Polimerizasyon, bir mer karışımının polimere dönüştürülmesi işlemidir. Bir polimer molekülünde onlarca, yüzlerce, binlerce merden gelen birim bulunabilir. Amaç tekrarlanan birimlerden oluşan çok uzun zincir ve ağ şeklinde bir makromolekül meydana getirmektir. Böylece çeşitli merler kullanılarak çok çeşitli tip ve özelliklerde plastikler elde edilmektedir. Örneğin polipropilen (PP) bir polimerdir. Bir PP zincir molekülü içinde, birbirine kuvvetli kovalent bağlarla bağlı binlerce küçük molekül bireyleri bulunur. Birbirine kuvvetle bağlı bu küçük molekül zincirinde binlerce kez tekrarlanan mer birimleri PP polimerini oluşturur. Mer sayısı arttıkça, polimerin öncelikle fiziksel özellikleri değişir. Örneğin mer sayısı düşük iken sıvı halinde bulunabilen polimer, bu sayı arttıkça giderek yoğunluk ve viskozitesi iyice artacak, belki bal kıvamında bir sıvı ve çok yüksek mer sayıları için ise bir katı polimer oluşturabilecektir (Balkan 1999; Yıldırım 2007).

Polimerleri malzeme olarak kullanabilmek için işlemek gereklidir ve polimerler genellikle tek başlarına (saf olarak) işlenemezler. Polimerler, içlerine çeşitli katkı ve dolgu maddeleri karıştırılarak (örneğin; boyar maddeler-güneş ışığına karşı korunmak için bazı özel katkılar-kaydırıcılar-işleme kolaylığı sağlayan diğer katkılar) bir ön karışım hazırlanır. Bu karışımlardan uygun yöntemlerle (eritme-kalıplama gibi), son şekli ile ürün malzeme elde edilir. Elde edilen şekillendirilmiş ürün, plastik olarak tanımlanır (Savaşçı vd., 2002).

Kimyasal bakımdan plastikler, karbon atomlarının hidrojen (H), azot (N), oksijen (O), flor (F), silisyum (Si), kükürt (S), klor (Cl) vb. atomlarla kovalent bağlarla bağlandığı uzun zincirlerdir. Zinciri oluşturan kovalent bağlara birincil bağlar da denmektedir. Zincirleri oluşturan kovalent bağlarla birlikte, bu zincirleri kendi aralarında bir arada tutan diğer bir bağ daha bulunmaktadır. İkincil bağlar (Van der Waals bağları) olarak isimlendirilen bu bağlar, kimyasal olarak reaksiyona girmeyen polimer molekülleri arasında veya bir molekülün çeşitli bölümleri arasında oluşan bağlardır. Polimer zincirleri belirli bir hareketliliğe sahiptir ve aralarında nispeten zayıf olan kütle-kütle etkileşmesi (Van der Waals bağları) yanında, eğer zincirde bir polar grup (PVC'deki klor gibi) varsa daha kuvvetli etkileşmeler (dipol, hidrojen bağı ve iyonik etkileşmeler gibi) mevcuttur ve birbirlerinden bağımsız olarak hareket edemezler. Özellikle çok uzun ve

büklümlü olduklarında, polimer zincirlerinin birbirlerine dolaşmış konumda oldukları saptanmıştır ve polimer zincir molekülleri, adeta iplikleri birbirine dolanmış bir yün yumağı görünümündedir (Balkan, 1999; Savaşçı vd., 2002; Liu, 2014; Beşergil, 2008).

2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması ve Yapısal Özellikleri

Polimerler, doğal ve yapay polimerler olarak ikiye ayrılırlar. Polimerler çok sayıda “mer” denilen basit birimlerden oluşur. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan plastikler genellikle bu yapıda bulunan sentetik polimerlerdir. Polimerleri inceleyebilmek için sınıflandırılmaları gerekir. Polimerler temel olarak aşağıda belirtilen yedi gruba ayrılmaktadır; (Akkurt, 1991; Beşergil, 2008)

- 1- Zincir yapılarına göre (homopolimer, kopolimer)
- 2- Organik ya da anorganik olmalarına göre
- 3- Doğada bulunup, bulunmamasına göre (doğal, yapay)
- 4- Molekül ağırlıklarına göre (oligomer, makromolekül)
- 5- Isıya karşı gösterdikleri davranışa göre
- 6- Zincirin kimyasal ve fiziksel yapısına göre (düz, dallanmış, çapraz bağlı, kristal, amorf polimerler)
- 7- Sentezlenme şekillerine göre

Tek tür birimlerden oluşan polimer zinciri homopolimer, iki ya da daha fazla monomer içeren polimerler ise kopolimer olarak adlandırılırlar. Mer A ise zincir AAAAAAAAAA şeklinde bir yapı gösterir. Diğer bir deyişle, bu tür polimerler PP ve PE gibi tek bir tür monomerden elde edilir.

Gerçi kopolimerler genellikle farklı monomerlerin düzensiz birleşmesinden oluşarak rastgele kopolimeri oluştururlar. Bununla beraber, alternatif, blok, graft ve steroblok kopolimerler bu kuralın dışındadır. Alternatif kopolimerde monomer birimleri birbiri ardına gelir. Blok kopolimer farklı homopolimerlerin uzun segmentlerini içerir. Graft kopolimer ya da diğer bir deyimle aşı kopolimer ise asıl mevcut bir polimer zinciri üzerinde bir dallanma olarak ikinci bir monomer içerir. (Şekil 2.1)

Ayrıca polimerler Şekil 2.2’de görüldüğü gibi lineer, dallanmış ve ağ olarak da tanımlanırlar. Lineer polimerde hiçbir dallanma yoktur. (Şekil 2.2a) Grafit Kopolimerler dallanmış polimerlerin bir örneğidir. Bu tarz polimerlerin yapısal biçimleri Şekil 2.2b’deki gibidir. Ağ (Network) polimerler, fonksiyonlu monomerler yerine, polifonksiyonlu monomerler kullanıldığında meydana gelirler. Şekil 2.2c ise ağ yapılı polimerlerin yapısal şekillerini göstermektedir. Ağ (Network) polimerler, ayrıca çapraz bağlı polimerleri de kapsarlar. Çünkü çapraz bağlanan polimer zincirleri hareketliliklerini kaybederler. Bu nedenle eriyemeyecekleri ya da akamayacakları için kalıpla da şekillendirilemezler. Yani yukarıda bahsedilen terslettin polimerler grubuna girerler.

Her gün gelişen yeni polimer sentez yöntemleri sayesinde elde edilmiş binlerce polimere her gün yenileri ilave edilmektedir. Günlük hayatın hemen her alanında rastlanan polimerik malzemeler, hayatın vazgeçilmez parçaları olmuşlardır.

Polimerik malzemelerin bu kadar geniş kullanım alanlarına sahip olmalarının nedeni, yapısal özelliklerinin istenildiği gibi ayarlanabilir olmasından ve ekonomik olarak elde edilebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Yapısal özelliklerinin istenildiği gibi ayarlanabilir olması, monomerlerin kendi kendileriyle ve diğer monomerlerle bağlanmalarında, bağlanma şekillerinin ve bağlanma miktarlarının fazlalığının bir sonucudur.

Ayrıca istenilen fonksiyonlara sahip polimerler de uygun fonksiyonel gruplu monomerler kullanılarak kolayca hazırlanabilir. Anorganik polimerlerde esas zincir karbona dayalı yapıya sahip değildir ve genellikle organik polimerlere kıyasla daha fazla ısıya dayanıklı ve daha serttirler.

Uzun zincirler halinde bulunan lineer ya da dallanmış zincirlerden oluşan polimer sistemlerine aynı zamanda termoplastik adı da verilmektedir. Yüksek oranda çapraz bağ içeren sistemler ise terslettin olarak tanımlanır. Termoplastik bir malzeme sıcaklık artışı ile eriyerek şeklini değiştirebilir ve böylece kalıplara dökülebilmesi mümkün olur (Keskingöz, 2010; Beşergil, 2008).

2.3. Polimer Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Günlük hayatımızın ve endüstrisinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş olan polimerler, malzeme olarak çok değişik ve çeşitli özelliklere sahiptir. Bazı

polimerlerden elektrik özellikleri nedeniyle yararlanılmaktayken başka bazı polimerler optik ve termal özelliklerinden dolayı malzeme olarak önem taşır. Buna karşılık bir başka grup polimerler, mekanik veya biyokimyasal özellikleri nedeni ile tercih edilmektedir (Ezdeşir vd.,1999).

2.3.1. Polimer malzemelerin termal özellikleri

Polimerlerin termal özellikleri arasındaki en önemli iki özellik camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve kristal erime sıcaklığı (T_e)'dir. Yarı kristal bir polimerin kristalize olmuş zincirlerinin erimeye başladığı sıcaklık, polimerin erime sıcaklığı olarak kabul edilir. Amorf yapıda bulunan kısımların ise soğuma sırasında yumuşak kauçuğumsu yapıdan sert, kırılğan, ve katı (rijit) camsı yapıya geçtiği sıcaklığa ise camsı geçiş sıcaklığı denir (Roff and Scott, 1971).

Polimer zincirleri iri yapılarına karşın polimer örgüsü içinde bazı bölgelerde düzenli bir şekilde (kristal bölgeler) istiflenebilirler. Kristal bölgeler, polimerlerden son ürünler yapılırken uygulanan işlemler sırasında belli düzeyde kendiliğinden oluşur. Ancak bu aşamada tüm polimer zincirlerinin bir düzen içerisinde paketlenerek tam kristal bir yapı vermesi beklenemez. Bu nedenle, çeşitli amaçlar için kullanılan endüstriyel polimerlerin çoğu amorf ve kristal bölgeleri birlikte örgülerinde bulundurulur. Bu tarz yapısal özelliği olan polimerlere yarı-kristal (kısmi-kristal) polimerler denir. Yarı-kristal polimerlerin genel örgüsü, amorf faz içine gömülmüş kristal bölgelerden oluşan bir sisteme benzetilir.

Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılğandırılar (cam gibi.) Böyle bir polimer ısıtıldığında camsı geçiş sıcaklığı (T_g) adı verilen bir sıcaklıkta yumuşar ve kauçuk özellikleri gösterir (poliizobütilen, polibütadien gibi). Polimerin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ısıtılması sürdürülürse; kauçuğumsu davranışı da bırakarak zamk görüntüsü üzerinden yeterince yüksek sıcaklıklarda sıvı halini alır. Ancak; kauçuğumsu, zamksı ve sıvı davranış değişiklikleri arasında kesin sıcaklık değerleri yoktur, geçişler derecelidir. Örneğin, amorf ve kırılğan olan cam, camsı geçiş sıcaklığına kadar ısıtıldığında yumuşamaya başlar, biraz daha yüksek sıcaklıklarda şekillendirilecek kıvama gelir, ileri ısıtmada sıvı gibi davranır (Hazar, 1993).

Polimerlerin termal iletkenlikleri moleküllerin yanı sıra kristalinite derecesi ve yönlenme gibi yapısal faktörlere de bağlıdır. Kristalinite derecesi ve yönlenme

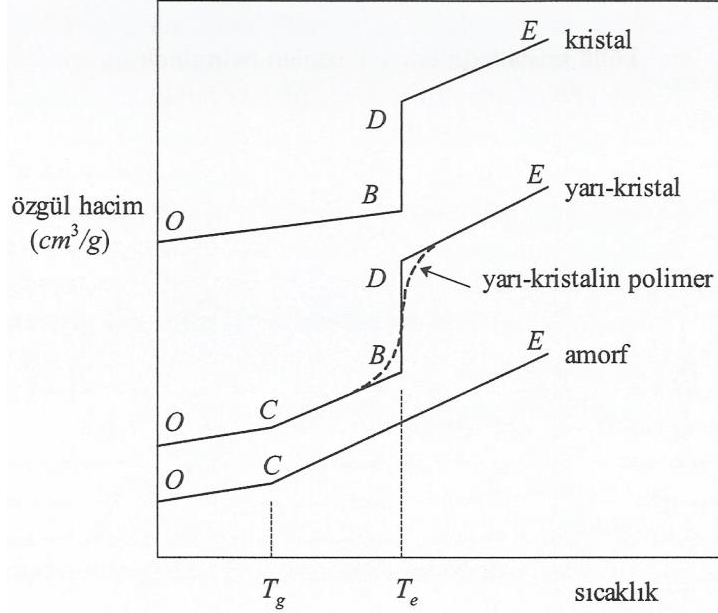
artarsa, termal iletkenliği de artar. Polimerlerin başka bir fiziksel özelliği ise termal genleşmedir. Plastik malzemelerin işlenmesinde önemli bir problem olan termal genleşme katsayısı, metallere göre çok daha büyüktür. Kuvvetlendirici elyafların ilavesi plastiklerin termal genleşmelerini önemli derecede azaltmaktadır. Örneğin, polistirene %60 oranında cam elyafların ilavesiyle termal genleşme katsayısı yarıya indirilmektedir. Termal iletkenlik gibi termal genleşme de molekül ağırlığı ve yapısal faktörlerle değişir. Polimerin kristalinite derecesinin çapraz ve bağ yoğunluğunun artmasıyla termal genleşme katsayısı azalır. Yönlenme yönünde katsayı azalırken dik yönde artar. Bunların yanı sıra, termal genleşme değerleri plastiklerin (T_g) camsı duruma geçiş sıcaklığının ve ergime sıcaklığının (T_e) üzerinde veya altında farklıdır. Yarı-kristal polimerler de amorf polimerler gibi camsı geçiş sıcaklıkları altında kırılıgandırılar. Bu özelliklerini camsı geçiş sıcaklığına kadar korurlar. Camsı geçiş sıcaklığı geçildiğinde belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal yapılarından dolayı esnek termoplastik davranışa geçerler. Erime sıcaklığına (T_e) kadar termoplastik özelliklerini değiştirmezler ve erime sıcaklığında kristal yapıları yıkılarak viskoz bir sıvı verecek şekilde erirler (Keskingöz, 2010)

Tam kristal polimerler serttirler, camsı geçiş göstermezler, belli bir sıcaklıkta erirler. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) polimerler için ayırt edici bir özellik olup, her polimerin farklı bir T_g vardır. Polimerler, T_g 'nin altındaki sıcaklıklarda sert ve kırılıganken, T_g 'nin üstündeki sıcaklıklarda yumuşak ve esnektirler. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı, T_g , ve kristal erime sıcaklığı, T_e , maddelerin kullanılabilirlik limitlerini belirleyen önemli büyüklüklerdir. Kısmen kristal bir polimerin katı bir madde olarak kullanılabilmesi için çalışma sıcaklığı hem T_g , hem de T_e 'nin altında olmalıdır. Öte yandan bir polimer lastik olarak kullanılacaksa daima T_g 'nin üzerindeki ve T_e 'nin altındaki bir sıcaklıkta bulunmalıdır. T_e 'de bir polimer katı halden sıvı hale dönüşür, T_g 'de ise katı halden elastik hale dönüşür (şekil 2.3) (Saçak, 2012).

2.3.2. Polimer malzemelerin reolojik özellikleri

Polimer zincirlerinin hareketliliği, reoloji ve akışkanlık dikkate alınarak incelenebilir. Camsı geçiş sıcaklığının altında, polimer maddeler akıcı değillerdir ve Hook elastikliği gösterirler. Yani bu sıcaklıklarda polimer maddelere gerilme uygulandığında, geri dönebilen, çok az bir esneklik gösterirler. Bu esneklik,

gerilme uygulanan polimer zincirindeki karbon-karbon bağ açısının, gerilme ile kısmen genişletilmesinden ve zorlanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.3. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve kristal erime sıcaklığı (T_e) grafiği (Saçak, 2012)

Gerilme kaldırıldığında karbon-karbon bağları normal açılara geri döndüğünden malzeme de eski boyutlarına geri döner (Savaşçı vd., 2002).

Camsı geçiş sıcaklığının hemen üstünde, polimer maddeye bir gerilme uygulandığında, polimer moleküllerinde kısmi bir yönlenme meydana gelir ve malzeme esner. Polimer zincirleri birbirine dolanmış olduğundan, gerilme kaldırıldığında polimer zincirleri eski konumlarına ve malzeme de eski boyutlarına döner. Kauçuğumsu, elastomerik malzemelerde de gözlenen bu duruma visko-elastisite denir (Savaşçı vd., 2002).

Sıcaklık artırıldığında polimer malzeme erir ve sıvı davranışları göstermeye başlar. Fakat bu akıcılık örneğin suyun akıcılığı kadar yüksek değildir. Eritilmiş polimer maddelerin viskoziteleri yüksektir, yani akıcılığı düşüktür ve sıvı haldeki akışa viskoz akış da denilmektedir. Örneğin iki polimer malzemeyi kendi arasında karşılaştırsak PP'nin viskozitesi PVC'den daha düşüktür. Yani PP daha akıcıdır (Mert, 2010).

Polimer maddelerin akışkan haldeki özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Bu tekniklerin en önemli sonuçlarından birisi, erimiş polimerlerde akışların “Newton dışı” (Non-Newtonian) kurallara uyduğudur. Bu durum, polimer zincirlerinin birbirlerine dolanmış halde olmalarından kaynaklanmaktadır. Erimiş polimere basınç uygulandığında, zincir dolanmaları gevşetildiğinden veya yok edildiğinden viskozitede önemli düşüşler meydana gelmektedir (Savaşçı vd. 2002).

2.3.3. Polimer malzemelerin mekanik özelliklerine ısının etkisi

Temel kavramlar kapsamında polimer madde davranışlarının anlaşılup yorumlanmasında yararlı olan iki önemli sıcaklık vardır. Bunlar camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_e)’dır. Amorf plastik malzemelerde zincirler gelişigüzel bulunduklarından dolayı, zincirlerin hareketleri kısıtlıdır. Bu malzemelerde sadece T_g görülür. Zincirler arası bir düzen olmadığı için birbirleriyle etkileşimleri söz konusu değildir. Bu yüzden amorf polimerlerde keskin bir T_e noktası yoktur. Kısmi kristalin veya yarı kristalin polimerlerin örgüsünde hem amorf, hem de kristal faz (bölgeler) birlikte bulunduğundan, hem T_g hem de T_e görülür. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında, amorf polimerler gibi kırılırlar. Kırılma özelliklerini camsı geçiş sıcaklığına kadar korurlar. Camsı geçiş sıcaklığı geçildiğinde belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal yapılarından dolayı esnek termoplastik davranışa geçerler (PP, PE gibi) (Balkan 1999, Savaşçı vd. 2002, Saçak 2012).

T_g , bütün polimer maddeler için, daha aşağısına inildiğinde, polimer zincirlerinde hareketliliğin hemen hemen donduğu ve böylece polimer zincirinin hareketsiz hale geldiği bir sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle sıcaklık, molekül zincirlerini oluşturan birimlerin hareketini etkiler. Sıcaklığın arttırılması ile bu hareket hızlanır, molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirlerine göre daha bağımsız hale gelirler. Sıcaklığın azaltılması ile birimlerin hareketi yavaşlar ve T_g sıcaklığına gelindiğinde ise durur. Bu sıcaklık değerinin altında sadece atomların kendi konumları etrafında yaptıkları titreşim hareketi devam eder.

T_g sıcaklığının üzerinde malzemenin molekülleri canlı moleküller olarak da tanımlanır. Bu sıcaklığın üzerinde malzemede, polimer zincirlerinin bölgesel ve ondülsüz katlanma hareketlerine olanak sağlayacak yeterli termal enerji

bulunmaktadır. Malzemeyi kırmadan bükme ve malzeme üzerine tork uygulamak mümkündür.

T_g sıcaklığının altında malzeme camsı hal denilen rijit, sert ve gevrek bir yapıya sahiptir. Kırılma özelliği taşırlar, sünme dayanımları yüksek, yorulma dayanımları düşüktür. T_g 'nin değeri, moleküller arası kuvvetlerin, molekül ağırlığının, zincir içerisindeki birimlerin rijitliğinin ve çapraz bağların büyümesi ile artar. Plastiklere ilave edilen yumuşatıcılar T_g değerini azaltır. Kristalin malzemelerde erime sıcaklığı da vardır ve T_e 'ye yaklaşıldıkça, kristalin düzeni bozulmaya ve zincir birimleri de harekete başlar. Sonuçta malzemede bir yumuşama meydana gelir. T_e 'ye ulaşıldığında ise kristalin düzeni tamamen bozulup parçalanır ve malzeme viskoz halini alır. T_e 'nin üzerinde malzeme sıvı haldedir (Balkan, 1999, Saçak, 2012; Yıldırım 2007).

2.4. Polimerlerin Termal İşlem Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Polimerler genellikle, termal işleme yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre polimerler termoplastikler (termoplastlar, ısıl plastikler) ve termoset plastikler (duroplastlar) olmak üzere iki büyük gruba ayrılır.

2.4.1. Termoplastikler

Termoplastik malzemeler, 100 yıldan fazla bir zaman öncesinden itibaren geliştirilmektedir. Ancak ciddi çalışmalar, 1930'lu yılların başlangıcında Almanya'da diğer malzemelerin yerini alabilecek malzemelerin araştırılmasından sonra başlamıştır. Almanlar, termoplastiklerin ısıtıldıkları zaman birbirlerine bastırılarak kalıcı bir birleştirmenin elde edilebileceğini görmüşlerdir (Balkan, 1999; Mert, 2010).

Termoplastikler ısı ile şekillendirilebilen yapay malzemelerdir ve lineer zincir biçimindeki makro moleküllerden oluşmuştur. Bunlar kuvvetli atom bağları ile birbirlerine bağlıdır, fakat moleküllerin birbiri ile olan bağları oldukça zayıftır. Polimer zincirlerinden oluşan bir kütleyle ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük kısımlarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük

kısımlarını kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlar ve katı polimer eriyerek akar. Polimerleri şekillendirirken, polimer malzemenin belirli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesinden yararlanılır. Artan sıcaklık ile, moleküller arası bağlar zayıflayarak zincir moleküllerin birbirleri boyunca kayabilmesi mümkün olur. Bu nedenle termoplastiklerin artan sıcaklık ile elastik durumdan, plastik hamur haline, sonrasında ise sıvı hale geçmesi sağlanır. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılarak ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma hazır hale getirilir. Buharlaşıma ile bileşim değişmedikçe, fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm istenildiği kadar tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere, Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelen, “termoplastik” adı verilmektedir. Termoplastiklerin zincirleri arasında çapraz bağlar bulunmaması ve doğrusal veya dallanmış zincirli polimerler olması nedeniyle uygun çözücülerde çözünürler, ısıtıldıklarında erirler ve eritilerek defalarca yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastiklerin hamur halde bulunma sıcaklıklarının alt sınırında ekstrüzyon, haddeleme, basma vb. gibi işlemler, üst sınırında kaynak, sıvılaştırma sıcaklığının üzerinde ise püskürtme (enjeksiyon) ile üretimler gerçekleştirilir (Erkul, 2001; Savaşçı vd. 2002; Saçak, 2012).

Termoplastiklerin kaynağı, bağlantının ara yüzeyindeki malzemelerin birlikte ısınması ve yumuşaması, sonrasında da birbirine kaynaşarak birleştirilmesi işlemidir. Termoplastikler ısıtıldığında yumuşama ve erime gösterdiklerinden kaynak edilebilir. Termoplastikler özellikle metaller ile karşılaştırıldığında, genel olarak düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler (TWI, 2015). Termoplastik malzemeleri oluşturan lineer makro moleküler zincirlerde, zinciri oluşturan birimlerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar (birincil bağlar) bulunmasına rağmen makro moleküler zincirler arasında fiziksel bir bağ bulunmamaktadır. Sadece zincirleri birbirine yakın tutan zayıf elektrostatik çekme kuvvetleri (Van der Waals - ikincil bağlar) vardır. Bu moleküller arası kuvvet, makro moleküler zincirlerin birbirlerine göre hareketlerini engelleyen, ısıya karşı duyarlı bir kuvvettir. Isı artışı ile moleküllerin titreşim genliklerinin artması sonucunda, makromolekül zincirleri arasındaki mesafe büyür ve bu mesafe artışı ile ters orantılı olarak elektrostatik çekme kuvvetleri azalır. Sonuç olarak termoplastik bir malzeme ısıtıldığında, kritik bir sıcaklık olan camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkılınca elektrostatik kuvvetlerin azalışı ile yumuşamaya başlar, sıcaklığın daha da artışı ile birlikte malzemenin viskozitesi düşer ve akıcılığı artar. Soğutulduğunda ise sert bir hale gelir. Sonuç olarak, bu malzemeler ısı ve basınç altında yumuşayan, akan ve soğutulunca sertleşerek şekillendirilebilen ve bu işlemlerin herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramadan

tekrarlı olarak yapılabilirdiği malzemelerdir. Endüstride çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (polipropilen: PP, polietilen: PE ve polivinil klorür: PVC gibi) termoplastiktir. Örneğin PP'den, lif, film, boru vb. ürünler üretilebilir (Balkan 1999, Savaşçı vd., 2002, Saçak 2012).

2.4.2. Termoset plastikler

Termoset plastikler büyük çapraz bağlı üç boyutlu moleküllerden meydana gelmişlerdir. Termoplastiklerde her birer iki bağlı olmalarına karşılık, termosetlerde 3 veya 4 bağlıdır. Makro moleküller arasında kuvvetli bağlar oluşturarak 3 boyutlu ağ yapısına sahip olan bu plastikler çoğunlukla polikondansasyon ürünleridir. Polikondansasyon; moleküllerin su, amonyak gibi basit yan ürünler vererek birbirleriyle bağlanmasıdır (Akkurt, 2007; Holmes, 1975)

Termal işlemlerle sadece bir defa istenilen şekli alabilen ve bu işlemleri kimyasal bozunmaya uğramaları sebebiyle tekrar şekillendirilemeyen plastik malzemelerdir. Çözünme özellikleri yoktur. Termoset plastik malzemeler termoplastik malzemelere göre daha sert ve termal dayanımları daha yüksektir. Kimyasal etkilere karşı daha az duyarlıdır. Termoset plastik malzemelerin polimerizasyonu iki kademede meydana gelmektedir. İlk kademede, lineer makro moleküller zincirlerin çoğunluğu oluşturulduktan sonra polimerizasyon reaksiyonu durdurulur. Bu durumda lineer zincirlerde reaksiyona girmeyen kısımlar mevcuttur. Özellikle kalıpta meydana getirilen polimerizasyonun ikinci kademesinde, sıcaklığın ve basıncın etkisi altında reaksiyona girmeyen kısımlar sıvı hale getirilerek molekül zincirleri arasında çapraz bağların oluşumunu sağlayan reaksiyonlar meydana getirilir. Bu şekilde, termoplastik malzemelerin aksine, molekül zincirleri arasında kuvvetli ve ısıya karşı tersinir olmayan kovalent bağlar oluşturulur. Molekül zincirleri arasında oluşturulan çapraz bağlar ancak çok yüksek sıcaklıklarda kopabilirler ve bu malzemenin yıpranmasına sebep olan zincirlerin kopması (malzemenin giderek kömürleşmesi) anlamına gelmektedir. Termoplastik ve termoset plastiklerin moleküler düzenlenmesi arasındaki farklar Şekil 2.4a ve b' de görülmektedir (Akkurt, 1991, Goodship, 2004).

2.5. Polietilen

Polietilen (PE), yaklaşık 80 yıl önce bulunmuş ilk defa Imperial Chemical Industries (ICI) İngiltere laboratuvarlarında petrolden sentez edilmiş olan bir termoplastiktir. Toplam plastiklerin %40'ı kadar bir tüketim oranına sahiptir. Alçak, orta, yüksek ve çok yüksek yoğunluk türlerinde üretilen polietilenin yaygın olanları alçak ve yüksek olanlarıdır.



(a)



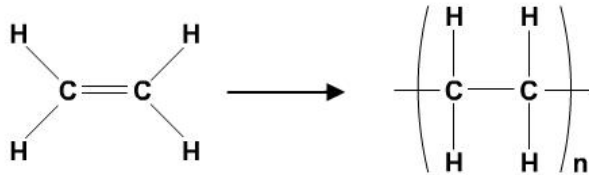
(b)

Şekil 2.4. Termoplastik ve termoset plastiklerin molekül zincirleri arasındaki farklar

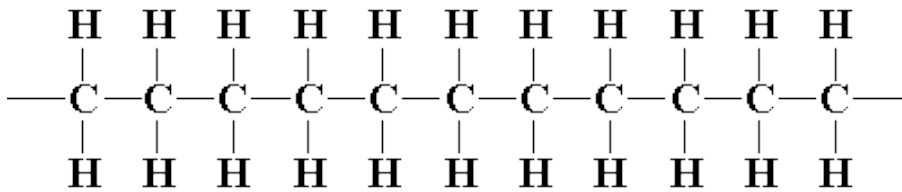
PE petrol esaslı hammadde olarak petrokimya esaslarına göre üretilir. Çok çeşitli ürünlerde kullanılan bir termoplastiktir. İsmi monomer haldeki etilenden alır, etilen kullanılarak PE üretilir. Plastik endüstrisinde genelde ismi kısaca PE olarak kullanılır. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi etilen molekülü C_2H_4 , aslında çift bağ ile bağlanmış iki CH_2 'den oluşur ($CH_2=CH_2$). Polietilenin üretim şekli, etilenin polimerizasyonu ile olur. Polimerizasyon yöntemi, radikal polimerizasyon, anyonik polimerizasyon, iyon koordinasyon polimerizasyonu ve katyonik polimerizasyon yöntemleri ile olabilir. Bu yöntemlerin her biri farklı

tipde polietilen üretimi sağlar (Şekil 2,6). Üretilen polietilenin molekül ağırlığı birkaç binden başlayarak milyonları aşar. İstenilen molekül ağırlığında elde edilebilen polietilenin sertlik ve kristallik gibi özellikleri molekül ağırlığına bağlı olarak değişmektedir. Zincirdeki dallanmalar kristalliğin derecesini tayin eder. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE - high density polyethylene - HDPE) için dallanma çok azdır ve molekül yapı lineerdir. Kristallik derecesi arttıkça sertlik, mekanik ve kimyasal özellikler artar ve sıvı ile gazlara olan direnci artar. DYPE'nin kristalliğini ayarlamak için, vinil asetat akrilik esterleri ilave edilir.

Molekül ağırlık polimer zincirlerinin bütününün ortalamasıdır. Ortalama molekül ağırlığının belirtisi, erime indeksidir. Erime indeksi molekül ağırlığıyla ters orantılıdır. Yüksek molekül ağırlıklı polietilenlerin sertliği fazladır. Katkılar ve dolgu maddeleri, polietilene eriyik harmanlamasında ilave edilir. İlave edilen katkı malzemeleri; antioksidanlar, ultraviyole stabilizatörler, kaydırıcı ve antiblokler, nitrojen... PE belli başlı iki yöntemle üretilir. Yüksek basınç prosesi ile alçak yoğunluk polietileni ve kopolimerleri üretilir. Bu kopolimerler; vinil asetat, akrilik esterler, karboksilik asitlerdir. Düşük basınç prosesinde ise yüksek yoğunluk polietileni elde edilir. PE, film ekstrüzyon kalıplama, üfleme ile kalıplamada sıcak eriyik kaplamaları ve yapıştırıcılar, toz kaplamalar, tel ve kablo imali işleme türleri ile işlenir (Çelebi, 2008; Peacock, 2000).



Şekil 2.5. Etilen – polietilen gösterimi



Şekil 2.6. Polietilen malzemesinin kimyasal yapısı (şematik)

Polimer gövdesindeki çeşitlilikler, malzemenin içeriğini değiştiren dallanmalar sebebiyle oluşur. Birçok dallanma çeşidi vardır ve bu çeşitlilik genelde PE malzemenin türünü belirler. Dallanma arttıkça bağlar, bağlar arasındaki boşluklar artacağından malzemenin yoğunluğu düşer.

Alçak yoğunluklu polietilen (DYPE / AYPE – low density polyethylene – LDPE) çok yüksek basınç altında üretilir ve bu yüzden basınç polietileni olarak adlandırılır. Bu tip LP'nin molekülleri monomer etilenin içerisinde tekrarlı biçimde dizilerek oluştuğundan dolayı homopolimerdir. HDPE ise kopolimerdir. Düşük basınçta Zeigler, Phillips veya Unipol yöntemine göre üretilmektedir. Bu da bazen düşük basınç polietileni olarak anılır. Son yıllarda HDPE, orta yoğunluklu polietilen (OYPE – medium density polyethylene – MDPE) ve LDPE için bir kaç değiştirilmiş kopolimer geliştirilmiştir. Son yıllarda geliştirilen MDPE hammaddenin özellikleri, HDPE'den daha esnek ancak HDPE kadar mukavimdir. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda daha da yüksek dayanıma sahiptir. Bu yapılan değişikliklerin amacı uzun dönem mukavemetini arttırmak, ısı dayanımını arttırmak ve işlenebilirliği kolaylaştırmaktır. Son olarak geliştirilen (lineer düşük yoğunluklu polietilen (LAYPE/LDYPE – lineer low density polyethylene – LLDPE) LDPE kadar esnek ve uzun dönem mukavemeti ise HDPE'den biraz düşüktür (Yaşar, 1992; Baysal, 1994; Progelhof and Throne, 1993; Shepherd et al., 2006; Bartczak, 2005).

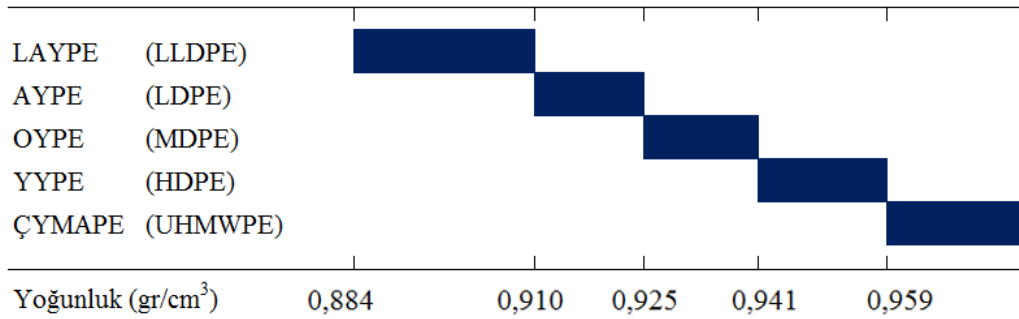
2.6. Polietilenin Sınıflandırılması

PE yoğunluk ve kimyasal özellikleri temel alınarak çeşitli kategorilerde sınıflanır. En yaygın kullanılan özellik yoğunluktur. Polietilenler yoğunluklarına göre Şekil 2.7'de gruplandırılmıştır. Dış ortamda neme karşı iyi direnç, esneklik, kuvvet ve üstün kimyasal direnç göstermektedir. Kap ve kutular, oyuncak, mutfak eşyaları, kaplamalar, boru ve tüp, kablolarda yalıtkan tabakalar ve paketlenme ve ambalaj filmi yapımında tercih edilmektedir (Savaşçı vd., 2002; Peacock, 2000).

2.6.1. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE)

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE – ultra high molecular weight polyethylene – UHMWPE) yoğunluğu 0.969 gr/cm^3 ve

üstünde (Şekil 2.7) molekül ağırlığı 3.000.000 gr/mol olan, çok iyi darbe ve aşınma direncine sahip bir malzemedir. Ancak erime viskozitesi çok yüksek olduğundan üretimi çok zordur. Elektriksel, kimyasal ve fiziksel özellikleri yüksek yoğunluklu polietilene benzeyen fakat molekül ağırlığının çok yüksek oluşu yanında darbe ve aşınma dayanımlarıyla özel süreç karakteristiklerine sahip çok değerli bir malzemedir. Basınçla kalıplanabilir ve özel ekstrüzyon yöntemiyle biçimlendirilir. İsminden de anlaşıldığı gibi, bu PE türü çok yüksek molekül ağırlığına sahiptir. Belli başlı özellikleri şöyledir; yüksek darbe dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, kendi kendine yağlama özelliği, düzgün yüzey, iyi kimyasal ve gerilme dayanımı, ses yalıtımını sağlayan özellikler. Et ve diğer yiyeceklerin ambalajlanmasında kullanılabilir. Temel polimer olarak kullanıldığı gibi, darbe dayanımını artırıcı olarak da kullanılabilir. Temel polimer olarak kullanıldığı yerler; film ve levha, tel ve kablo, ekstrude edilmiş profiller, kalıplanmış şekiller, kumaş kaplama, hortumlardır. Alaşım elemanı olarak; darbe dayanımını artırıcı ve işlenmeyi kolaylaştırıcı olarak, tasarruf sağlayıcı dolgu maddesi olarak, boya dağılımını geliştirici olarak kullanılırlar (Baysal, 1994; Beşergil, 2008).



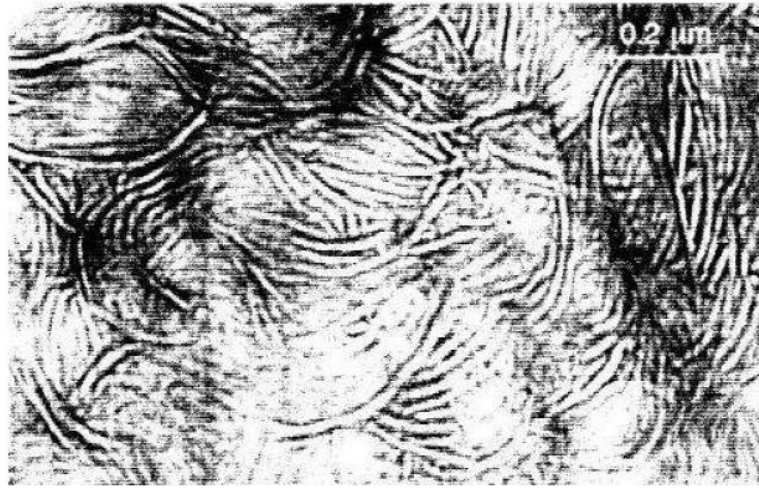
Şekil 2.7. Polietilenlerin yoğunluklarına göre sınıflandırılması

2.6.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)

Yoğunluk aralığı 0.941-0.969 gr/cm³ (Şekil 2.7) olan lineer, yüksek yoğunluklu ve yüksek kristaliniteye sahip bir malzemedir. Doğrusal (Linear) PE olarak da adlandırılmaktadır. %90 oranında kristal ihtiva eder. Ana zincir en az 200 karbon atomludur (Şekil 2.8, Şekil 2.9).



Şekil 2.8. HDPE polimer yapısı



Şekil 2.9. HDPE kristal yapısı

Yüksek yoğunluk polietilenler, etilenin düşük basınç altında polimerizasyonu ile elde edilirler. Elektrik direnci yüksek, hidrofobik bir polimerdir. Film halinde gaz geçirgenliği vardır. Nitrik aside karşı dayanıksızdır. 60°C'nin altında çözücülerin büyük bölümünde çözünmez. Suyu ve inorganik tuzların sudaki çözeltilerine karşı dayanıklıdır. HDPE'nin özelliklerini şöyle sıralayabiliriz; özgül ağırlığı düşüktür, su üzerinde yüzer. Çalışma sıcaklığı -60°C ile 110°C'dir. Mekanik mukavemeti özellikle darbe mukavemeti mükemmeldir, bütün plastiklerin arasında en iyi kimyasal direnci gösterir, elektriksel özelliği iyidir, dielektrik mukavemeti mükemmeldir, enjeksiyon kalıplama ile mükemmel parlaklıkta parçalar elde edilir, zehirsiz, kokusuz ve tatsız olduğundan sağlık için bir tehlikesi yoktur, ışığa karşı dirençlidir, nem kapmaz.

Kullanım alanları; boru imali; su dağıtımı, kanalizasyon, sulama dağıtım şebekeleri, gıda ambalajlamaları ve şeker paketlemeleri olarak sayılabilir. Çeşitli oyuncak ve mutfak eşyası imalatı, ağır hizmet torbaları, şerit, iplik ve halat yapımında, izolasyon malzemesi olarak, kablo kaplamada; enjeksiyon kalıplama ile; endüstriyel amaçlı kullanım, şişe kasası, sebze ve meyve taşımacılığında, alet kutusu, yükleme kasası; şişirme ile kalıplamayla; deterjan, şampuan ve kozmetik şişeleri imalatı, kerosen, kimyasallar, oto yağları ve akışkanları için büyük konteyner imali olarak sıralanabilir. Ayrıca HDPE sertliği nedeniyle yaygın olarak kullanılır ve organik solventlere dayanıklıdır. Bununla birlikte kablolarda bulunan petrol jelini emme oranı da düşüktür (Baysal, 1994; Peacock, 2000).

2.6.3. Orta yoğunluklu polietilen (MDPE)

Yoğunluk aralığı $0.926-0.940 \text{ gr/cm}^3$ (Şekil 2.7) olan bir malzemedir. HDPE'den daha esnek ama onun kadar mukavimdir. Daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek dayanıma sahiptir. Mukavemeti, ısı dayanımı yüksek ve işlenebilirliği kolaydır (Yaşar, 1992, Peacock, 2000).

2.6.4. Alçak / Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)

Yoğunluk aralığı $0.910-0.925 \text{ gr/cm}^3$ (Şekil 2.7) olan bir malzemedir. Alçak yoğunluklu PE dallanmış ve kristalinitesi yüksek polietilendir. Polimer zincirlerinin dallanması kristalleşebilme özelliğini artırır, bu da yoğunluğun azalmasına sebep olur (Şekil 2.10). Alçak yoğunluk polietileni özellikle tarım alanında kullanılır. Alçak yoğunluklu polietilenden mamul ürünler dayanıklılık, ucuzluk, kimyasal maddelere ve dış etkenlere karşı dayanıklı olmak, yüksek yalıtkanlık, kolay işlenebilirlik gibi önemli özelliklerinden dolayı cam, kağıt, karton, deri, kösele, teneke, yün, pamuk, keten, kendir gibi geleneksel malzemelerden imal edilmiş eşyaların yerini almıştır.

Dayanıklılığı, şeffaflık ve zehirleyici olmama özelliklerinden dolayı ince alçak yoğunluklu PE filmler gıda ve tekstil malzemeleri ve bilhassa ihraç ürünlerinin ambalajında kullanılmaktadır. Haberleşme, enerji dağıtımı ve sanayide kablo olarak geniş bir tüketim alanı bulmuştur. Alçak yoğunluklu

polietilenin genel özelliklerini şöyle sıralayabiliriz: özgül ağırlığı düşüktür, suda yüzer, üstün gerilme ve yırtılma direncine sahiptir, darbe mukavemeti yüksektir, normal sıcaklıklarda, inorganik asitlere, bazlara, alkollere, yağlara, ketonlara, gıda endüstrisinde kullanılan kimyasallara ve deterjanlara karşı oldukça dayanıklıdır, elektriksel özelliği iyidir, dielektrik mukavemeti mükemmeldir, zehirsizdir, kokusuz ve tatsız olduğundan sağlığa zararlı değildir, rutubet geçirmez, kolay işlenir ve ucuzdur, ultraviyole stabilizatör ilavesiyle uzun ömürlü, ısıya ve ışığa, dayanıklı sera örtüleri yapabilir. Polietilenlerden imal edilen ağır hizmet torbaları dayanıklıdır, bükülebilir, baskıya ve ısı ile yapıştırmaya uygundur. PE hortumlar bükülebilir, kolay kullanılır, çatlamaya dayanıklıdır ve kolay renklendirilir. PE filmlerin optik özellikleri üstündür, kaygandır, bükülebilir, baskı yapılabilir, nem geçirmez, yırtılma direnci yüksektir, kaplama veya film maliyeti düşüktür. Gıda ve ürün ambalajı için uygundur. Uzun ömürlüdür, baskı yapılabilir. Şişirme ve enjeksiyonla kalıplamayla bükülebilir, ancak istenilen sertlikte, kuru boyamaya uygun, çatlamaya dayanıklı kaplar imal edilebilir.

Molekül ağırlık dağılımı ve molekül yapısından farklı mekanik özelliklere ve bilhassa üstün gerilme ve yırtılma direncine sahip birçok değişik türler ihtiva eder. Çeşitli uygulama sahalarının gerektirdiği özellikleri verebilecek karakterde bir plastik hammaddesi olması sebebiyle alçak yoğunluklu PE bir çok nihai ürünün imalatında yaygın olarak kullanılır. Alçak yoğunluklu PE; tel ve kablolarda koruyucu kılıf ve yalıtkan olarak geniş bir alanda kullanılan ideal bir malzemedir. Çeşitli tipteki mutfak eşyaları, oyuncak, su tankları, endüstriyel variller, şişeler, sert veya sıkıştırılabilen şişeler gibi içi boş parçaların, boru iç parçalarının, oyuncakların ve kimyasal maddeler ile makyaj malzemeleri ve çeşitli ev eşyalarına ait kapların imalatında mamullerin imalatında da kullanılır (Çelebi, 2008; Peacock, 2000).



Şekil 2.10. LDPE polimer yapısı

3. POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ

Endüstriyel uygulamalarda polimer malzeme seçimi, prosesi ve birleştirme yöntemleri ürün tasarımcıları tarafından sürekli sorgulanmaktadır. Müşteri beklentilerinin ürün konseptine iyi bir şekilde yansıtılabilmesi için yeni malzemeler ile birlikte üretim yöntemleri de sürekli gelişmektedir. Bu kapsamda polimer esaslı malzemelerin kullanımı da endüstrinin farklı alanlarında giderek yaygınlaşmaktadır. Günümüzde tasarımcı müşteri beklentilerini basit bir şekilde ürüne dönüştürmek istemektedir, ancak bu teknolojik kısıtlamalardan dolayı mümkün olmamaktadır (Sayer vd., 2012).

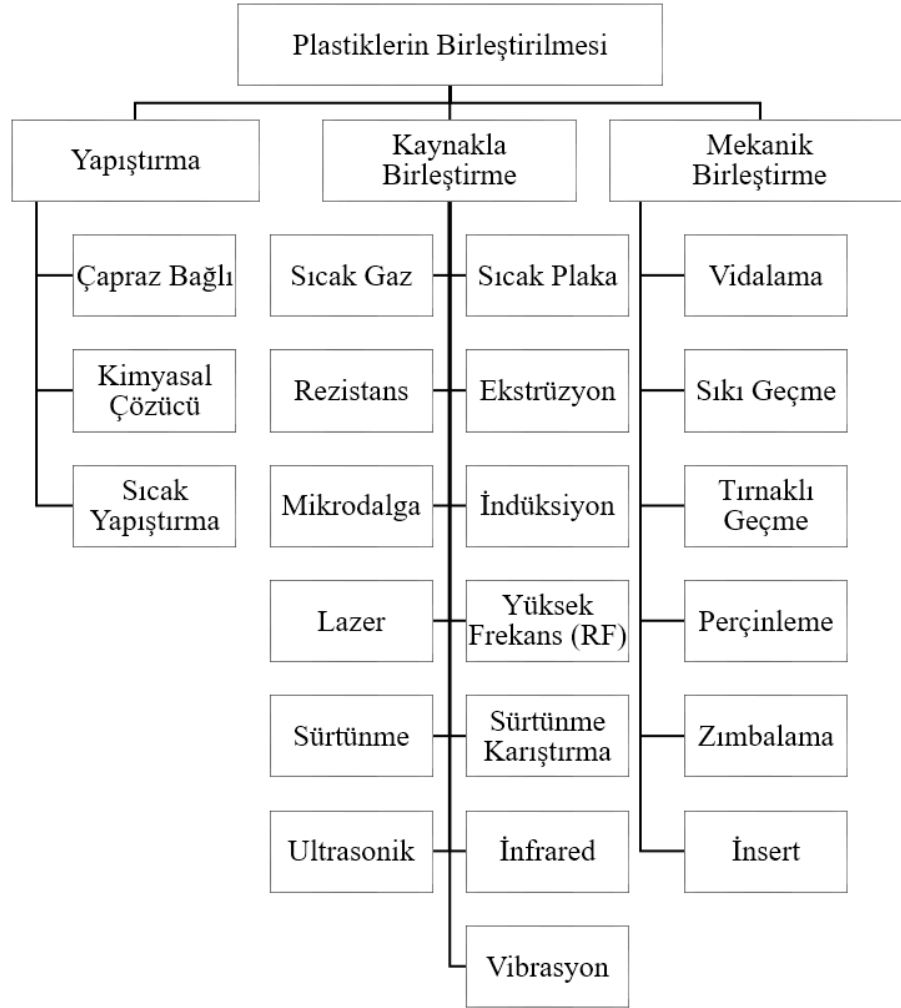
Seri üretim veya tamir işlemleri gibi bir çok uygulamalarda polimerik malzemelerin kendi aralarında veya diğer malzemelerle birleştirilmesi gereklilik göstermektedir. Bu malzemelerin birleştirilmesi için uygulama şartlarına bağlı olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Genel olarak plastik malzemelerin birleştirilme yöntemleri, mekanik bağlantı yöntemleri, yapıştırma yöntemleri ve kaynak yöntemleri olmak üzere görüldüğü gibi sınıflandırılmıştır (Şekil 3.1).

Yapıştırıcılar ve mekanik birleştirmeler oldukça yararlı birleştirme teknikleridir, ama kaynaştırma (fusion) birleştirmesi veya kaynak, birleştirme sürelerinin genelde kısa olması, yüksek hacimli üretim kapasiteleri nedeniyle özellikle uygundur.

Ayrıca kaynaklı parçalar, kolayca geri dönüşür veya yakılır ve atık problemlerini hafifletir. Bu durum, özellikle karmaşık yüzey aktivasyon teknikleri gerektiren PE ve PP gibi, düşük yüzey enerjili polimerlerin birleştirilmesinde önemli bir faktördür (Arıcı ve Sınmazçelik 2004; Mert, 2010)

Plastiklerin çentiğe karşı hassasiyetleri, perçin veya cıvata ile birleştirilmelerini zorlaştırır. Plastik folyoların dikilmeleri halinde bile, dikişlerdeki oyuk yerleri, daha sonraki çatlakların başlangıçlarını oluşturabilir. Bu nedenle birleştirme yöntemi olarak yapıştırma ve kaynak ön plana çıkmıştır (Arıcı ve Şelale 2007).



Şekil 3.1. Polimerlerin birleştirilme teknikleri (Sayer vd., 2012)

3.1. Polimer Malzemelerin Mekanik Bağlantı Yöntemleri

Mekanik bağlanma yöntemleri, sökülebilen bağlantılar (cıvatalar, somunlar, vb.) ve sökilemeyen bağlantılar (perçinler, sıcak saplamalar, vb.) olmak üzere iki grupta incelenir. Bu bağlantı işlemlerinin sökülebilirliği, diğer birleştirme tekniklerine göre avantaj teşkil etmektedir. Montaj işlemlerinde bağlantıların hızlı yapılması, geniş uygulama alanlarının bulunması, işçiliğinin temiz ve basit oluşu ile yüksek teknoloji gerektirmemesi mekanik bağlama tekniklerinin tercih sebeplerinden bazılarıdır (Balkan 1999; Erkul 2001; Mert, 2010).

Plastik malzemelerin çentik etkisine karşı fazla hassasiyet göstermeleri, bu tür mekanik bağlantıların, yapıştırma ve kaynak yöntemleri ile

birleştirilmelerine göre taşıyabilecekleri yükleri sınırlı hale getirmiştir. Bu sebeple mekanik bağlantı tasarımlarının dikkatli olarak yapılması gerekmektedir. Mekanik bağlantıların hatasız bir şekilde uygulanmış olmasına rağmen bağlayıcı elemanlar ile bağlanan plastik malzemeler arasındaki termal genleşme katsayıları arasında farkların bulunması, ortam sıcaklığının değişmesi sırasında ciddi problemlerin çıkmasına sebep olmaktadır. Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak bağlantı bölgelerinde görülen gevşemeler veya aşırı büzölmeler buna örnek olarak verilebilir. Ayrıca, temas bölgesindeki plastik malzemenin gevrekliğine bağlı olarak, bağlantı elemanlarının plastik malzemelerden daha sert olması sebebiyle temas bölgelerinde çatlama ve kırılmalar görülebilmektedir. Mekanik bağlanma yöntemleri, az sayıdaki uygulamalar için ekonomik olmakla birlikte seri üretimler için oldukça pahalı bir yöntemdir (Balkan 1999; Arıcı ve Şelale 2007).

3.2. Polimer Malzemelerin Yapıştırma (Adezyon) Yöntemleri

Herhangi bir türdeki iki benzer veya farklı malzemenin sökülemez bir şekilde birleştirilmesi bu yöntemle kolaylıkla sağlanabilmektedir. Yapıştırıcıların eşsiz avantajlarından bir diğeri de, hem termoset hem de termoplastik polimer malzemeleri birleştirmeye uygun olup, özellikle kaynak kabiliyetleri olmayan termoset plastik malzemelerin birleştirilmelerinde kullanılabilmeleridir. Geçmişte üretilen, yüksek dayanıma sahip plastik esaslı kompozit malzemelerin sadece termoset malzemelerden yapılmış olması sebebiyle bu birleştirme yöntemi oldukça önem taşımaktaydı. Zamanımızda ise termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerindeki artışa bağlı olarak birçok alanda termoset plastik malzemelerin yerine geçmesi sonucunda, daha çok kaynak yöntemleri ile birleştirme teknikleri tercih edilmektedir.

Fakat yapıştırma yöntemleri, birleştirilecek malzemelerin değişen çalışma sıcaklıkları altında bulunmaları sırasında termal genleşme katsayıları arasındaki farka bağlı olarak, birleşim bölgesinde görülen termal gerilimlerin minimum seviyede tutulması amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca titreşimli çalışan kısımlardaki birleşim bölgelerinde, yapıştırma bağlantısının sönümleme özelliklerine sahip olması sebebiyle esnek yapıdaki yapıştırma bağlantı yöntemlerinin kullanılması yararlı olabilmektedir (Balkan 1999; Erkul 2001; Strand 2004; Mert, 2010).

Birleşim yüzeylerine etki eden çekim kuvvetlerinin büyüklüğü, ara mesafenin artması ile azalmaktadır. Bu nedenle uygun bir yapıştırma işlemi için iki katı malzemenin kuru ve temiz haldeki yüzeyleri, en geniş alanda ve mümkün olan en yakın mesafede birleştirilmelidir. Yapıştırıcı malzemenin zaman içerisinde katılaşması ile birleşimin mukavemeti artarak işlem tamamlanır. Yapıştırma işlemi, yapıştırıcı madde ile birleştirilecek malzemenin yüzeyleri arasındaki ara fazda oluşan fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Yapıştırma işlemi için hafif bir basıncın uygulanması yeterlidir. Yapıştırıcının birleşim bölgesinden uzaklaşmaması için aşırı basınç uygulanmasından kaçınılmalıdır (Balkan 1999; Mert, 2010).

İyi bir yapıştırma işleminin gerçekleştirilebilmesi için önemli olan diğer bir husus da ön hazırlık işlemleridir. Parçalar arasında uygun teması sağlamak için parçaların temizlenerek hazırlanması gerekir. Birleşim yüzeylerine mikroskobik ölçekte bakıldığı zaman bölgede toz, kir veya yağ gibi istenmeyen maddelerin bulunduğu görülecektir. Yapıştırma işleminin mukavemetine direkt olarak etki eden bu istenmeyen maddelerin bölgeden uzaklaştırılması önem taşımaktadır. En iyi performans için, yapıştırılacak yüzeyler yağdan arındırılmalı ve temizlenmelidir. Temizleyici (çözücü) yüzeye buhar banyosu şeklinde uygulanabildiği gibi, pratikte daha çok fırça veya bez tampon kullanılarak ya da direkt numunenin daldırılması şeklinde de uygulanabilmektedir (Balkan 1999; Strand 2004; Mert, 2010).

3.3. Polimer Malzemelerin Reolojik Kaynak Kabiliyeti

Plastiklerin kaynağı, sıcaklığın yardımı ile malzemelerin yumuşamış yüzeylerinin birleştirilmesi işlemi olarak DIN EN ISO 472 (2013)'de tanımlanmıştır. Termoplastiklerin kaynağı, art arda gelen üç safhada tamamlanır. Bunlar, yüzey hazırlama, sıcaklık ve basınç uygulama, soğutmadır. Sıcaklık ve basınç, ara yüzeyde çapraz polimer zincirlerinin yayılması için gereklidir (Balkan and Ezdeşir 2008).

Diğer taraftan iyi kalitede kaynak bağlantıları oluşturmak, yalnızca kaynak yöntemine ve kaynak parametrelerine değil, kullanılan malzemenin kaynaklanabilirliğine de bağlıdır. Bu yüzden kaynaktan önce kaynaklanabilirliğin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Yapılan bir çalışmada, seçilen termoplastiklerin kaynaklanabilirliği, onların reolojik özelliklerini

ortaya koyan viskozite ve aktivasyon enerjisi değerleri yardımı ile araştırılmıştır (Balkan and Ezdeşir 2008, Mert, 2010).

Balkan and Ezdeşir (2008) yapmış oldukları çalışmada, polimer parçaların kaynak kabiliyetlerini güvenilir olarak belirlemek amacı ile pratik bir yöntem önermiş ve bu yöntem reolojik kaynak kabiliyeti (RKK) olarak adlandırılmıştır. Termoplastiklerin kaynağında reolojik açıdan uygun durumda, kaliteli bir bağlantı oluşturmak için ön şartlar gereklidir. Bu yönteme göre, viskozitesi ve aktivasyon enerjisi düşük olan polimerlerin kaynak kabiliyetlerinin iyi olacağı bildirilmiştir. Balkan and Ezdeşir (2008) tarafından yapılan reolojik çalışmada PP, PE ve PVC numunelerin farklı sıcaklıklarda nitrojen atmosferinde viskoziteleri belirlenmiştir. Viskozite akmaya karşı dirençtir ve viskozite düşük olursa akıcılık artar, yüksek olması ise akıcılığı zorlaştırır. Daha yüksek molekül ağırlıkları ve güçlü ikincil valans kuvvetleri, daha yüksek viskozite değerlerini sağlar. Yüksek viskozite ise, ara yüzeyde difüzyonun azalması nedeniyle kaynak dayanımını düşürür. PE'nin viskozite değerleri ise PP'e yakın olmakla beraber biraz daha yüksektir.

İyi bir kaynak kalitesine ulaşmak için akış davranışı önemli bir faktördür. Erimiş bir polimerin akışı için makro moleküler zincir segmentleri (parçaları) taşınabilmelidir. Zincir segmentleri, enerji engelini yenmek için gerekli termal enerjii elde ettiği zaman kolayca taşınabilir. Bu enerji engeli aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. Aktivasyon enerjisi, kimyasal bir tepkimenin gerçekleşebilmesi için aşılması gereken enerji değeridir. Polimer malzemenin aktivasyon enerjisi dşkce kaynak kabiliyetinin daha iyi olacağı söylenebilir. Aktivasyon enerjisi ile viskozite doğru orantılıdır. Aktivasyon enerjisi azalırsa viskozite düşer.

Termoplastiklerin kaynağı için reolojinin kullanımı, pratik ve güvenilir bir yöntemdir. Bu alışma, PE ve PP'nin viskozite ve aktivasyon enerjisi değerlerinin PVC'nin değerlerinden daha düşük olduğunu yani PE ve PP'nin kaynak kabiliyetlerinin RKK'ya göre PVC'den daha iyi olduğunu göstermiştir (Balkan and Ezdeşir 2008).

3.4. Polimer Malzemelerin Kaynak Yöntemleri

Kaynak, ana malzemeden ayırt edilemeyen bir bağlantı sağlamak amacıyla, benzer yapılı (yapı bileşenleri benzerlik gösteren) termoplastik iki

parçanın ısı ve basınç etkisiyle gerçekleştirilen sökülemeyen bir şekilde birleştirilme işlemidir.

Kaynak işlemlerinde birleştirilecek malzemelerin birleşim bölgelerinde oluşturulan sıcaklık sebebiyle tekrarlı bir yumuşamanın gerekliliği ve yumuşama sıcaklıklarının üzerinde (T_g) bozulmadıkları, yanmadıkları ve özelliklerini kaybetmedikleri için uygulanabilirliği yalnızca termoplastik malzemelerde söz konusu olup, birleştirilecek malzeme veya parçaların yüzeyleri erime sıcaklığı altında ısıtılarak cisimlerin yüzeylerinin yumuşaması sağlanır. Bu yüzeylerin birbirlerine bastırılması ve son olarak da soğutulması ile kaynak işlemi gerçekleştirilir (Berins, 1991)

Termoplastiklerin birleştirilmesinde en güçlü ve en temiz yöntem kaynak edilerek birleştirilme yöntemidir. Bazı durumlarda kaynak sağlamlığı bazı malzemenin sağlamlığına oldukça yakın değerlere ulaşabilmektedir. İyi bir kaynak elde edebilmek için sıcaklık, basınç ve zaman gibi kaynak üzerinde etkili olan parametrelerin iyi bir optimizasyonu sağlanmalıdır (Balkan 1999; Erkul 2001).

Termoplastik malzemelerin kaynak ile birleştirilme işlemlerinin esasları genel olarak şu şekilde açıklanabilir: Birleştirilecek yüzeyler herhangi bir yöntemle (termal yöntemler, mekanik ve elektromanyetik yöntemler) ısıtılıp camı geçiş sıcaklık derecesinin üzerine çıkılıp yumuşamaları sağlanır.

Bu yumuşamış bölgelerde bulunan makro moleküler zincirlerin ısı tesiri ile hareketlilik (Mikro-Brown) kazanmaları sonucu zincirlerin arasındaki ikincil bağlarda (Van der Waals) zayıflama görülür. Özellikle amorf yapıya sahip olan sınır yüzeylerdeki serbest termal hareketliliğe sahip makro moleküler zincirler, birleştirilecek yüzeylerin temas ettirilmesi ile karşılıklı olarak birbirleri içerisinde akarlar ve dolaşarak yumak haline gelirler. Kaynak bölgesinde sıcaklığın biraz daha yükseltilmesi, basıncın artırılması, bekleme süresinin uzatılması ve titreşim hareketlerinin uygulanması ile makro moleküler zincirlerin birbirleri içerisindeki akış hızları artırılır. Bu şekilde birleşim ara yüzeyindeki makro moleküler zincirlerin daha fazla karışmaları sağlanabilmektedir.

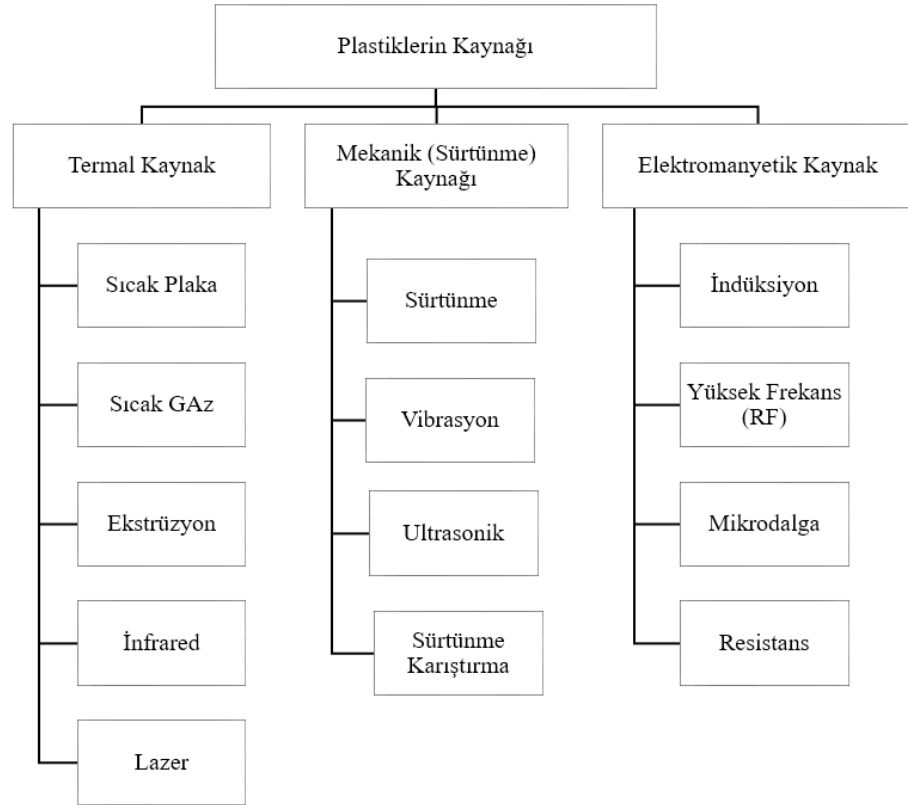
Dış görünüm itibarıyla istenilen biçimdeki birleştirmenin tasarıma uygun olarak sağlanmasının ardından kaynak bölgesi basınç altında ve hareketsiz bir şekilde soğutulur. Birleşim ara yüzeyinde yumak haline gelmiş makro moleküler zincirler, sıcaklığın azalması ile termal hareketliliklerini

kaybetmeye başlarlar. Aralarındaki mesafenin azalması ile iyice düğümlenirler. Zincirlerin birbirlerine yakınlaşmalarına bağlı olarak, sıcaklığın camsı geçiş sıcaklık derecesinin altına düşmesi ile makro moleküler zincirlerin arasında tekrar kurulan ikincil bağlar (Van der Waals), kaynak bölgesini katı hale getirir. Bu şekilde termoplastik malzemenin kaynak ile birleştirilme işlemi istenilen sağlamlıkta tamamlanmış olur (Balkan 1999; Mert, 2010).

Kaynak işlemlerine genel olarak etki eden faktörler, kaynak bölgesinin sıcaklığı, tatbik edilen ısı miktarı, ısıtma süresi ve uygulanan basınç olarak sıralanabilir. Bu faktörler malzeme cinsine ve kaynak işleminden istenen dayanım özelliklerine göre farklı değerler alırlar. Kaynak işlemi için gerekli ısı miktarı, plastik malzemenin bileşimi, kalınlığı, ısıtılan alan, ısıtma süresi ve uygulanan basınç gibi bazı faktörlere bağlıdır. Herhangi bir termoplastik malzemenin kaynaklı birleştirme işleminde etkili olan faktörlerin (sıcaklık, zaman, basınç vb.) belirlenen sayısal değerlerinin altında çalışıldığı zaman kaynak bölgesinde süreksizlikler, üstünde çalışıldığı zaman ise polimerik zincirlerin parçalanması sonucu malzemenin bozulması yada kaynak bölgesinde aşırı taşkınlıklar görülebilir. Bu tür kaynak hataları ile karşılaşmamak için mümkün olan optimum değerlerde çalışılması gerekir. Malzemenin yapısında bulunabilecek artık monomerler ile bazı plastikleştiriciler, kaynak işlemi sırasında sıcaklık etkisiyle buharlaşabilmektedir. Bunun önlenmesi zor olup, kaynak bölgesinde gaz kabarcıkları meydana getirerek birleşimin görünümünü bozmakla birlikte sağlamlığını azaltmaktadır. Ayrıca plastik malzemelerin kaynak uygulamaları sırasında termal bozulmalara (renk değişimleri, polimerik zincirlerin parçalanması, çözünmeler ve özellikle yanıcılığa) dikkat edilmelidir (Balkan, 1999; Berins, 1991; Crawford, 1985).

Termoplastik malzemelerin özellikleri gereği ısıyı iyi iletmezler ancak ısıdan kolay etkilenirler. Isıyı iyi iletmemeleri sebebiyle geniş bölgelerde termal deformasyonlara uğramazlar. Ancak, özellikle kalın malzemelerin kaynak işlemlerinde derin bir nüfuziyetin elde edilmesi oldukça zordur. Bu durumda kaynak ısısının, kaynağı yapılacak termoplastik malzemenin dışında değil, doğrudan doğruya malzemenin içinde oluşturulması yoluna gidilir. Metallerde olduğu gibi plastiklerde, yeterli bölgesel ısıtmalar uygulanarak birleşim bölgesinin yumuşatılmasıyla kaynak edilir. Termoplastik malzemelerin kaynağı için birçok farklı kaynak yöntemi geliştirilmiştir. Bu çeşitli kaynak yöntemleri arasındaki en büyük fark, ısıнын uygulanış şeklidir (Strand, 2003; Amancio, 2007)

Bu düşünceyle, termoplastik malzemelerin kaynak yöntemleri, ısı transfer yöntemleri (termal yöntemler) ve ısıнын direkt malzemede oluşturulduğu yöntemler (mekanik yöntemler ve elektromanyetik yöntemler) olmak üzere iki sınıfta toplanabilir. Şekil 3.2’de polimer esaslı malzemelerin birleştirme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir (Grewell and Benatar, 2007).



Şekil 3.2. Polimerlerin kaynakla birleştirilme yöntemleri

3.4.1. Sıcak plaka kaynağı

Sıcak eleman kaynağı olarak da bilenen sıcak plaka kaynağı (SPK) 60’lı yıllardan günümüze kadar termoplastiklerin birleştirilmesinde kullanılan en eski kaynak yöntemlerinden biridir. Termoplastiklerin kaynak ile birleştirme yöntemlerinden biri olan sıcak plaka kaynağında, kaynak ile birleştirilecek olan plastik parçaların birleşme yüzeyleri iletim veya ısınım (radyasyon) yolu ile sıcak bir plaka tarafından ısıtılarak birleşme işlemi gerçekleştirilir (Anık vd., 1994, 2003)

Temel olarak erime sıcaklık aralığı bozulma sıcaklığının altında olan bütün termoplastikler ile elastomerler kendi aralarında kaynak ile birleştirilebilir. Ancak bazı amorf ve kısmı kristal termoplastiklerin birbirleri ile kaynakla birleştirilmesi için özel donanımlı sıcak plaka kaynak makinalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu cihazlarda ısıtıcı plaka yüzeylerinin birleştirilecek olan termoplastiklerin viskozite sıcaklığına getirilmesi gerekir (Ehrenstein, 2004; Troughton, 2008).

Sıcak plaka kaynağında, kaynak mukavemetine etki eden parametreler şunlardır;

1. Malzeme (malzeme türü, mer yapısı, molekül ağırlığı, katkı maddeleri..),
2. Isıtıcı plaka sıcaklığı,
3. Isıtma süresi,
4. Birleştirme basıncı,
5. Birleştirme stroğu.

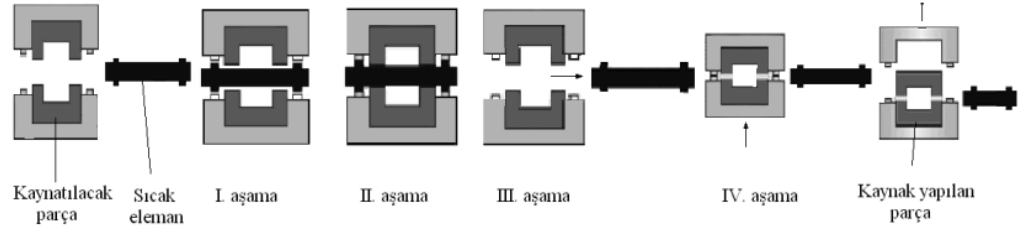
Sıcak plaka kaynağında plastik parçaların kaynak yüzeyleri bir ısıtıcı plaka ile ısıtıldıktan sonra, birleşme bölgesindeki eriyen plastik malzeme belirli bir kuvvet altında karşılıklı olarak bastırılır. Sıcak plaka kaynağının proses aşamaları; dengeleme, ısıtma, konum değiştirme, birleştirme ve soğutma olmak üzere beş adımdan oluşmaktadır. Şekil 3.3 ve 3.4’de sıcak plaka kaynağının proses adımları ve basınç- zaman grafiği şeklinde gösterilmiştir.

Sıcak plaka kaynağında ısı transferi temel olarak iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla;

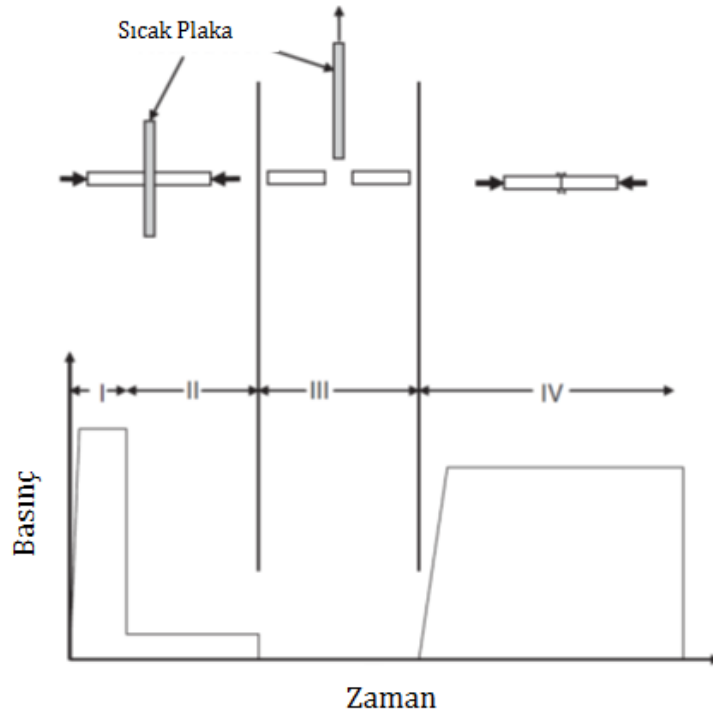
- 1- İletim yoluyla plastik parçanın ısıtılması
 - a) Düşük sıcaklık (Konvansiyonel)
 - b) Yüksek sıcaklık
- 2- Işınım ve radyasyon yoluyla plastik parçanın ısıtılması

Konvansiyonel sıcak plaka kaynağında, ısıtıcı plaka olarak ısı iletim katsayısı yüksek olan alüminyum alaşımlı plakalar kullanılmaktadır. Plaka yüzeyleri teflon bir tabaka ile kaplanarak eriyik haldeki plastik parçaların sıcak plaka yüzeyine yapışması engellenir. Yüzeyi teflon ile kaplı olan ısıtıcı plakalarda teflonun zarar görmemesi için plaka sıcaklığının 270°C’yi aşmaması gerekir.

Plaka yüzeyine yapışan eriyik artıkları belirli aralıklarla temizlenmelidir. Ancak bu durum seri üretimi kesintiye uğratmaktadır.



Şekil 3.3. Sıcak eleman kaynağı işlem basamakları



Şekil 3.4. Sıcak plaka kaynağının dört aşamasını gösteren basınç-zaman grafiği
(Sayer vd., 2012)

Şu ana kadar yapılmış olan deneysel çalışmalar ve deneyimler sonucunda endüstride kullanılabilecek bazı pratik kaynak parametre bilgileri oluşmuştur. Konvansiyonel ısı iletim yöntemiyle yapılacak olan sıcak plaka kaynağında amorf ve kısmi kristal termoplastikler için tavsiye edilen kaynak parametreleri Çizelge 3.1’de ve Şekil 3.5’de verilmiştir. Ancak her parçanın bileşenleri ve geometrisi farklı olduğundan kabul edilebilir kaynak kalitesi ve kaynak mukavemeti için

kaynak parametrelerinin yeniden belirlenmesi gerekir. Örneğin parça kalınlığı 3 mm olan PP malzemenin konvansiyonel ve yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile oluşan sıcaklık-plastikleşme bölge uzunluğu arasındaki ilişki Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

Sağlıklı bir kaynaklı birleştirme gerçekleşmesi için parçaların birleştirme yüzeylerinin tamamen erimesi ve plastikleşme bölgesinin uzunluğunun (L_0) da istenen değere ulaşması gerekir.

Sıcak plaka kaynağında çevrim süresini kısaltmak için ısıtıcı plaka sıcaklığı konvansiyonel uygulamalara göre daha yüksek tutulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda plastik malzeme kısa sürede ısınır, ancak plastik parçanın ısıtıcı plakaya temas ettiği bölgede aşırı ısınmadan dolayı plastik malzeme termik olarak bozulur. Birleşme sırasında termik olarak bozulan bu kısım birleşme bölgesinden dışarı atılarak kaynak çapağını oluşturur. Birleşme bölgesinde termik olarak bozulan malzeme kaynak bölgesinden uzaklaştırıldığı için kaynak mukavemeti olumsuz olarak etkilenmez.

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen sıcak plaka kaynağında plaka sıcaklığı 300°C’ den fazla olduğu için konvansiyonel sıcak plaka kaynağında kullanılan teflon kaplı alüminyum plakalar bu uygulamada kullanılamaz. Yüksek sıcaklık uygulamasında ısıtıcı plaka sıcaklıkları kaynak yapılacak malzemeye bağlı olarak 300 – 450°C arasında değişmektedir. Isıtıcı plaka olarak ısı iletim katsayısı yüksek olan çelik alaşımlı plakalar tercih edilir. Bu uygulamada proses sırasında plaka yüzeyine yapışan plastik eriyikler metal bir sıyırıcı ile üretimi kesintiye uğratmadan otomatik olarak temizlenebilmektedir. Isıtıcı plaka sıcaklığı oldukça yüksek olduğundan kısa sürede kaynakla birleştirilecek olan plastik parçanın birleşme yüzeyi erimekte ve çevrim süresi kısalmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklık uygulamasını konvansiyonel sıcak plaka kaynağına göre daha avantajlı kılmaktadır (Abel, 1998; Sayer vd., 2012)

Bu kaynak işlemi daha çok PE, PVC ve PMMA için de uygundur. Özellikle boruların birleştirilme işlemlerinde (manşon kaynağı) ve seri ambalaj işlemlerinde oldukça sık olarak kullanılmaktadır (Anık vd., 1994)

Viskozitesi düşük olan poliamid (PA) ve PP gibi malzemelerden üretilmiş plastik parçaların sıcak plaka kaynağında birleşme yüzeyleri ısınım ve radyasyon yöntemiyle ısıtılır. Bu tip malzemelerin ısıtıcı plakaya direkt temasından kaçınılmalıdır. Aksi halde erimiş haldeki plastiğin büyük bir kısmı ısıtıcı plakada kalarak, kaynak kalitesini ve kaynak mukavemetini olumsuz yönde etkiler.

Çizelge 3.1. Konvansiyonel sıcak plaka kaynağında kaynak parametreleri (Ehrenstein, 2004)

Kaynak Parametresi	Amorf	Kısmi Kristal
T_H	$T_G + 140^\circ\text{C}$	$T_K + 70^\circ\text{C}$
L_o	$1,14 \times (d)$	$0,34 \times (d)$

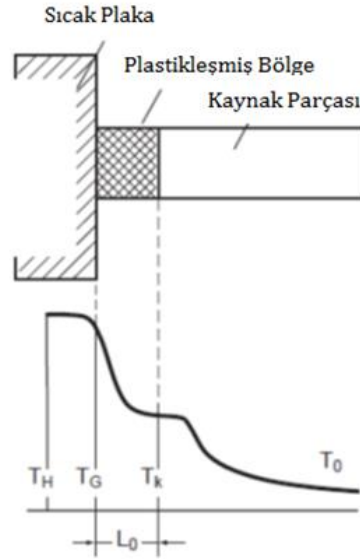
T_H : Isıtıcı Plaka Sıcaklığı

T_G : Camı Geçiş Sıcaklığı

T_K : Kristal Erime Sıcaklığı

L_o : Plastikleşme Bölge Uzunluğu

d : Kaynak Parçası Kalınlığı

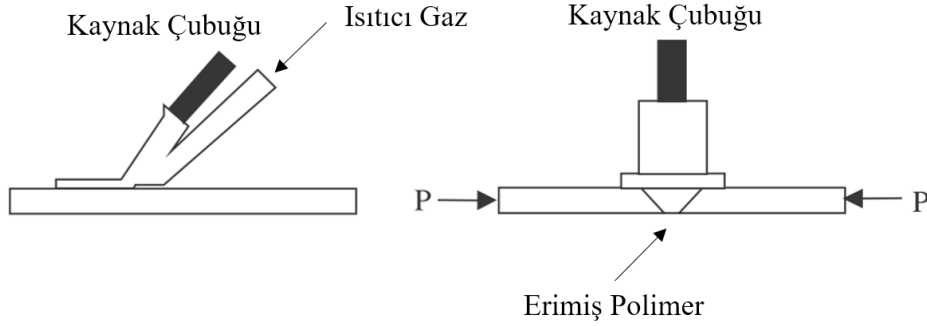


Şekil 3.5. SPK prosesinde sıcaklık dağılımı

3.4.2. Sıcak gaz kaynağı

Sıcak gaz kaynağı, birleştirilecek yüzeylerin sıcak hava veya asal gaz jetiyle yumuşatılması ve basınç altında kaynaklanması işlemidir. Genellikle ısıtma işlemi hava ile sağlanır, seyrek de olsa bazı malzemelerde kaynak sırasında malzemenin oksidasyonu önlemek için asal gazlar kullanılır. Metallerin oksî-gaz kaynağına benzerlik gösteren bu kaynak yönteminde konvansiyonel ısıtmada hava kullanıldığı için bu kaynak yöntemi “sıcak hava kaynağı” olarak da tanımlanır. Sıcak gaz kaynağında birleştirilecek parçaların yüzeyine üflenen sıcak hava parça yüzeyinin plastikleşmesini sağlar. Torç (meme) vasıtasıyla ısıtıcı gaz

gönderilmesi ile baz malzemenin birleşim kenarları ve ilave kaynak çubuğu yumuşatılır (Şekil 3.6) (Anık vd., 1994).



Şekil 3.6. Sıcak gaz kaynağı uygulaması şematik gösterimi

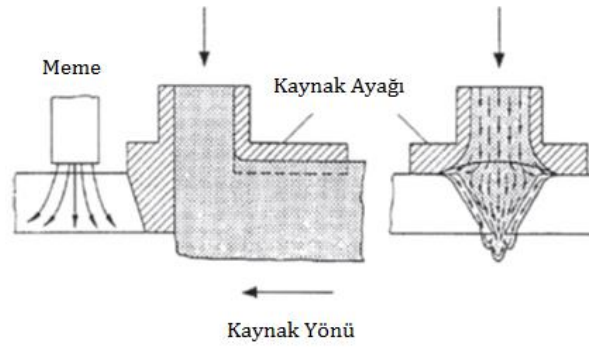
Gaz sıcaklığı plastiğin cinsine göre 200-350°C arasında olur. Sert termoplastiklerde elektrotun bastırılması düz bir parça ile, yumuşak plastiklerde rulo ile yapılır. Kaynak işlemlerinde genellikle baz malzeme ile uyumlu kaynak çubukları kullanılmaktadır. Özellikle PE ve PP için kaynak çubuğu ile baz malzemenin yoğunluklarının aynı olması gerekir. Kaynak çubuğunun basınç altında kaynak boşluğunu tam olarak dolduracak şekilde bölgeye akması istenir. Bu durumda kaynak hızı, ısıtıcı gazın ve dolayısıyla kaynak yüzeylerinin sıcaklık derecesi, kaynak ağzının geometrisi ve hacmi, uygulanan basınç, kaynak çubuğu kesiti ve kalınlığı gibi birçok faktör kaynak bölgesi üzerinde etkili olabilmektedir.

Bu faktörlerin uygun değerlerde tutulabilmesi, özellikle bu kaynak yöntemi için uygulayıcının dikkat ve becerisine bağlıdır. Bununla birlikte, diğer yöntemlerdeki gibi belirli birleşim konumları ile sınırlı olmayıp çeşitli konstrüksiyon ve onarım işlemlerinde serbest hareket alanları içerisinde sıcak gaz kaynak uygulamaları yapılabilmektedir. İşlem özellikle büyük ölçekli fabrikasyon ve tamir işlemleri için uygundur (Anık vd., 1994; 2003; Bilici, 2011)

3.4.3. Ekstrüzyon kaynağı

Sıcak gaz kaynağına göre, hacimce daha büyük parçaların kaynakla birleştirilmesinde tercih edilen otomatik veya yarı otomatik kaynak yöntemidir.

Sıcak gaz kaynağı yönteminde olduğu gibi ısıtıcı gaz kullanılarak kaynak bölgesinde ön ısıtma işlemi uygulanır. Ancak farklı olarak, kaynak çubuğu yerine bir matkap ile çalıştırılan minyatür bir ekstruder kullanılmaktadır (Bilici, 2011). Sıcak gaz kaynak yönteminin özel bir hali olup, bu yöntemde kaynak dolgu malzemesi bir ekstruderden sağlanmaktadır. Sıcak gaz ile kaynak ağzına ön ısıtma işleminin uygulanmasının hemen ardından kaynak dolgu malzemesi, ekstruder çıkışı üzerine monte edilmiş bir pabuç vasıtasıyla kaynak ağzına doldurulur (Şekil 3.7).



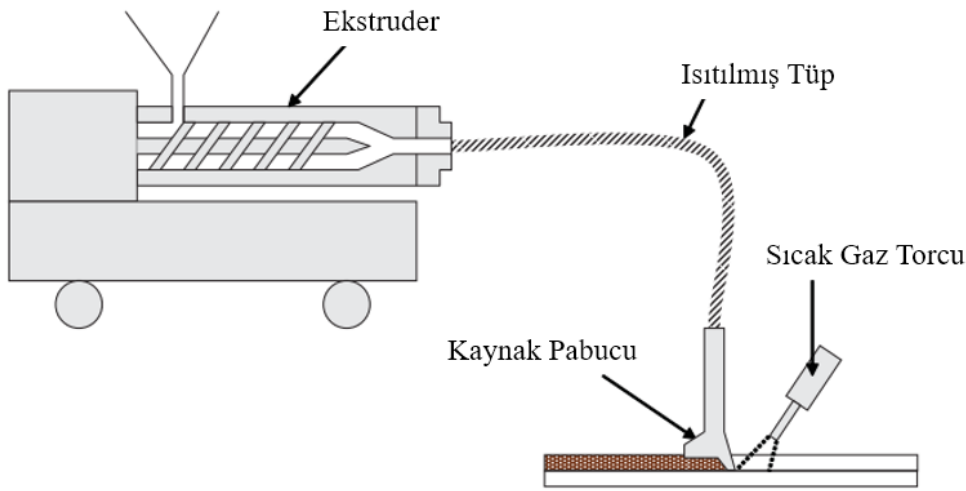
Şekil 3.7. Ekstrüzyon kaynağının şematik gösterimi (Sayer vd., 2012)

Ekstruder üzerine monte edilen pabuç, kaynak ağzına uygun olmalı ve kullanımdan önce sıcak gaz ile ısıtılmalıdır. Ekstrüzyon kaynağı, geniş kaynak bölgelerinin tek pasoda elde edilmesinde şimdiye kadar kullanılan tek yöntem olmuştur. 30 mm'den küçük kaynak bölgeleri için gerekli olan kaynak basıncı kuvveti, ekstruderin dolgu malzemesine uyguladığı itme kuvveti ile sağlanmaktadır. Kaynak genişliğinin 30 mm'den büyük olması durumunda kaynak üzerine operatör tarafından kuvvet uygulanması gerekmektedir. Bu durum ise operatörün çok çabuk yorulmasına sebep olmaktadır. Aynı sebepten dolayı, kaynak dolgu malzemesinin kaynak köküne kadar kolaylıkla uygulanabilmesi amacı ile X veya V kaynak ağzlarının açılar 30° 'den küçük olmamalıdır (Anık vd., 1994; 2003). Ekstrüzyon kaynak tekniği özellikle küçük ölçekli kaynak işlemleri için fazla ekonomik değildir. Ancak bu tekniğin kullanımı ile kaynak bölgesinde daha yüksek sağlamlık değerlerinin elde edilmesi sebebiyle bu yöntem tercih edilmektedir (Bilici, 2011).

Kaynak boyunca hareket edebilen bir araba üzerine ısıtıcı gaz torcu ve ekstruder dikey olarak yerleştirilir veya ekstruderden çıkan viskoz haldeki kaynak

ilave malzemesi teflon kaplı spiral ısıtıcı hortumlarla kaynak bölgesine (kaynak pabucuna) iletilir (Şekil 3.8).

Kaynak bölgesi öncelikle ısıtıcı gaz ile ısıtılır ve hemen ardından ekstruderden çıkan sıcak kaynak ilave malzemesi ile kaynak boşluğu tam olarak doldurulur. Nozul kullanılarak kaynak bölgesine basınç kuvveti uygulanmaktadır. Sıcak gaz kaynağı yöntemine göre kaynak bölgesinin sağlamlığı daha üstündür. Termal deformasyonlar oldukça düşük seviyededir (Anık vd., 1994; 2003).



Şekil 3.8. Hareketli kaynak torcu ve sabit ekstruder uygulaması (TWI, 2015)

Birleşme bölgesindeki plastikleşme derinliği, malzemenin tipine, kaynak hızına ve üflenen hava sıcaklığına bağlıdır. Ekstrüzyon kaynağı, tek geçişte homojen kaynak yapılması gereken büyük hacimli tank ve boru kesitleri gibi termoplastik parçaların imalatında kullanılır. Parça kalınlığı 30 mm olan termoplastik parçalar bu yöntemle birleştirilerek büyük çaplı boru ve sıvı tanklarının üretilmesi mümkündür. Ekstrüzyon kaynağı aynı zamanda çöp atık sitelerinin inşaatı, lagünler ve çatı kaplamaları için kullanılan astar malzemelerinin birleştirilmesi gibi çevresel uygulamalarda da kullanılmaktadır (Sayer vd., 2012). Bu teknik ziraat ve su mühendisliğindeki arazi drenaj sistemlerinin, kanalizasyon tanklarının, ve büyük çaplı su kanalı imalatı gibi uygulamalarda giderek yaygınlaşmaktadır.

3.4.4. Sürtünme kaynak yöntemleri

Plastik malzemelerin termal iletim katsayılarının düşük olması sebebiyle özellikle kalın kesitli plastik malzemelerde ısının dışarıdan uygulanması yöntemi ile tüm kaynak bölgesinde ısı oluşturulamamaktadır. Bu tip durumlarda ısının doğrudan doğruya malzemenin içerisinde oluşturulması istenir. Bu durumdan yola çıkılarak sürtünme esasına dayanılarak değişik sürtünme kaynağı uygulamaları ortaya çıkmıştır.

Sürtünme kaynak yöntemleri döndürme, lineer, ultrasonik, sürtünme karıştırma ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı olmak üzere 5 gruba ayrılır. Bu kaynak yöntemlerinden döndürme, sürtünme karıştırma ve sürtünme karıştırma nokta kaynak yöntemleri Bölüm 4’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde sadece ultrasonik kaynak ve titreşim (lineer sürtünme) ve yöntemleri açıklanacaktır (Bilici, 2011).

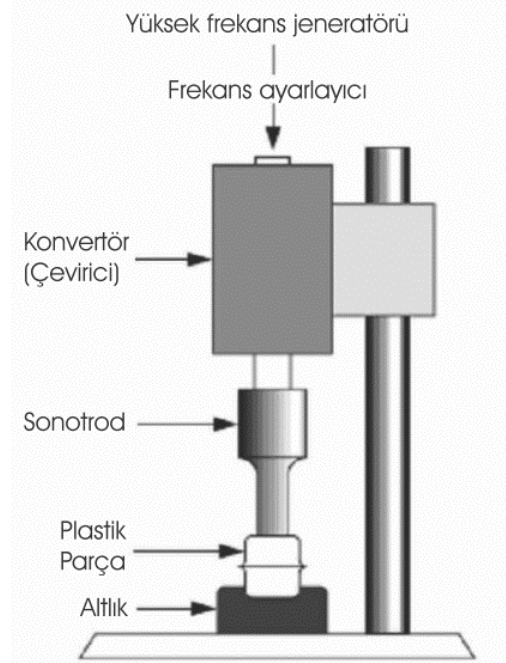
3.4.5. Ultrasonik kaynak

Ultrasonik titreşimler 10^4 Hz - 10^{10} Hz frekans aralığında gerçekleşmektedir. Ultrasonik titreşimler kaynak uygulamaları dışında, endüstride tahribatsız muayene uygulamalarında ve tıp alanında etkin tedavi yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ultrasonik kaynak yönteminde düşük frekanslı elektrik enerjisi yüksek frekanslı mekanik enerjiye (mekanik titreşimlere) dönüştürülmektedir. Mekanik titreşimler özel bir düzenele birleştirilecek olan plastik parçalara uygulanır. Mekanik titreşimler termoplastik parçaların kaynak bölgesinde kuvvetli bir iç sürtünmeye, dolayısıyla ani bir ısı artışına, birleşme bölgesindeki malzemenin yumuşamasına ve erimesine neden olur. Kısa sürede oluşan erime sonrasında basınç uygulanarak plastik parçaların kaynak ile birleşmeleri sağlanır

Amorf ve kısmi kristaller olarak iki gruba ayrılan termoplastiklerden amorf yapıda olanların erime ve katılaşma sıcaklık aralığı kısmi kristallerinkilere göre daha geniş olduğu için amorf yapıdaki termoplastiklerin ultrasonik kaynak ile birleştirilmesi daha kolaydır. İki farklı termoplastiğin ultrasonik kaynak yöntemiyle birleştirilebilmesi için malzemeler arasındaki ergime sıcaklık farkı 20°C ’nin altında olmalıdır (Yeni vd., 2013; Brinkman, 2011).

Ultrasonik kaynak makinasının genel yapısı yüksek frekans jeneratörü, frekans düzenleyici, konvertör (elektrik enerjisini mekanik titreşim enerjisine

dönüştüren çevirici), sonotrod (kaynak başlığı) ve altlıktan oluşmaktadır. Ultrasonik kaynak makinasının ana elemanları Şekil 3.9’de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ultrasonik kaynak makinası

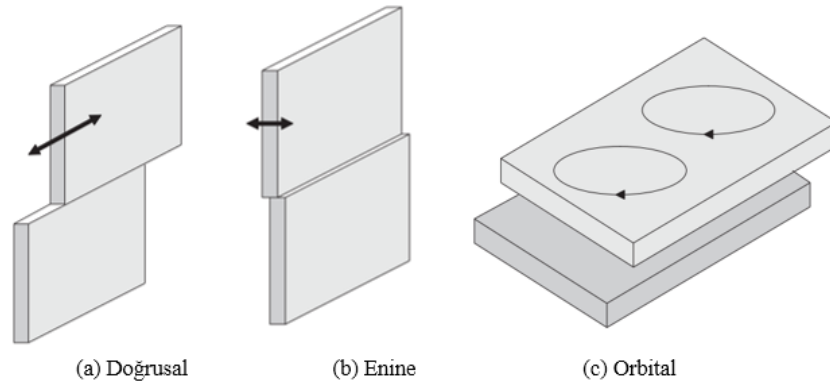
Yüksek frekans jeneratörünün gücü 100W ~ 1000W arasında değişmekte olup, çıkış frekansı 20kHz – 40kHz seviyesindedir. Konvertör ise bir elektromekanik donanım olup, yüksek frekanslı elektrik impulslarını yüksek frekanslı mekanik titreşimlere çevirmektedir. Konvertöre bir elektriksel gerilim uygulandığında, içinde bulunan piezoelektrik malzemelerden dolayı boyları değişmektedir. Konvertörün ucuna bağlanan sonotrodun iki temel fonksiyonu vardır. Birincisi; ultrasonik titreşimleri kaynak edilecek parçaya taşımak, ikincisi ise plastik parçaya basınç uygulayarak kaynak bölgesindeki erimiş haldeki plastiğin birbirleri ile kaynaşmasını ve sonuçta kaynağın gerçekleşmesini sağlamaktadır. Sonotrodlar yüksek performanslı titanyum alaşımlarından üretilmektedir (Abale, 1998).

Sonotrodun görevi kaynaklı birleştirme için gerekli olan titreşimi ve baskı kuvvetini parçaya aktarmaktır. Genel olarak sonotrod malzemesi olarak titanyum (TiAL4V) ve alüminyum (AlCuMg2) alaşımlarının kullanımı, cam elyaf katkılı plastiklerde ise çelik alaşımlarının kullanımı tavsiye edilmektedir. Bakır, kurşun,

nikel ve dökme demir gibi akustik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren malzemelerle sonotrod imalatı uygun değildir.

3.4.6. Vibrasyon (titreşim) kaynağı

Vibrasyon kaynağında termoplastik parçaların birleşme yüzeyinde salınım şeklinde oluşan doğrusal enine veya orbital rölatif sürtünme hareketleri (Şekil 3.10), birleşim bölgesinin ısınmasına ve plastikleşmesine neden olur. Birleşme bölgesinde rölatif salınım hareketinin durması ile plastikleşen termoplastik malzeme soğumaya ve katılaşmaya başlar böylece malzemelerin birleşmesi gerçekleşir. Son otuz yılda endüstride uygulanan vibrasyon kaynağı, sürtünme kaynağından esinlenerek geliştirilmiştir.



Şekil 3.10. Amorf ve kısmi kristal termoplastiklerin lazer ışını soğurma davranışları (Troughton, 2008)

Büyük geometrik parçaların 10s'den kısa bir sürede birleştirilmesi vibrasyon kaynağı ile mümkündür. Vibrasyon kaynağı ile birleştirilecek parçaları tutan aparatlarda, frekans aralığı 80–300 Hz arasında olan tek veya iki boyutlu titreşim hareketi gerçekleşir. Titreşim genliği 0,25 – 2,5 mm aralığında kademesiz olarak ayarlanabilmelidir (Abel, 1998; Ehrenstein, 2004).

Teflon ticari ismi ile bilenen politetrafloretilen (PTFE) gibi flor içerikli polimerlerin sürtünme katsayısı düşük olduğundan vibrasyon kaynak yöntemi ile birleştirilmesi zordur. PTFE'nin sürtünme katsayısı diğer termoplastiklere göre oldukça düşüktür. Bunların dışındaki termoplastikler ve katkılı türevlerinin birleştirilmesinde bu kaynak yöntemi kullanılmaktadır (Yeni vd., 2013).

3.4.6.1. Vibrasyon Kaynak Proses Aşamaları

Vibrasyon kaynağında yapılan araştırmalarda, birleştirme stroğunun malzeme ve parça büyüklüğünden bağımsız olduğu görülmüştür. Vibrasyon kaynağı dört adımdan oluşmaktadır.

1. Katı Hal Sürtünmesi: Kaynakla birleştirilecek parçaların birleşme yüzeylerinin, basınç altında birbirlerine karşı tek veya çift eksenli sürtünmesi ile plastikleşme için gerekli ısı oluşur. Bu adımda birleşme yüzeyindeki düzlemsellik, yüzey pürüzlülüğü gibi uyumsuzluklar giderilerek, her iki yüzeyin birbiri ile paralel hale gelmesi sağlanır.

2. Eriyik oluşumu: Bu aşamada amorf termoplastiklerde camsı geçiş sıcaklığının (T_g), kısmi kristal termoplastiklerde ise kristalleşme sıcaklığının (T_c) üzerinde film şeklinde ince bir erimiş tabaka oluşur. Vibrasyon süresinin artması ile plastikleşmiş malzeme miktarı artmaya başlar.

3. Eriyik akışı: Bu adımda kaynak bölgesinde erimiş ve erimek üzere olan plastik malzemede enerji dengesi oluşmuştur. Bundan dolayı birleşme stroğu ve erime hızı arasında lineer bir ilişki vardır.

4. Titreşimin kesilmesi ve soğuma: Titreşimin sona ermesi ve kaynak bölgesinin soğumasıyla kaynaklı birleşme gerçekleşir (Grewell et al., 2003).

Vibrasyon kaynağında kaynak bölgesinin tasarımı, parçanın fonksiyona, malzeme, konstrüksiyon ve titreşim sistemine bağlıdır. Vibrasyon kaynağı sürtünme kaynağından esinlenerek geliştirildiği için, malzeme seçiminde sürtünme kaynağındaki seçim kriterleri esas alınır. Temel olarak dış sürtünme ile ısınan ve eriyebilen bütün termoplastikler ve termoplastik elastomerler vibrasyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilir.

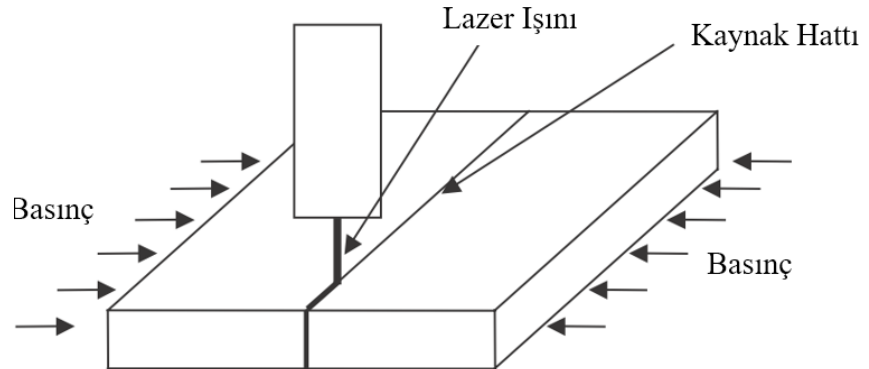
Ultrasonik kaynak yönteminde üst sınır olarak kabul edilen 15 cm²'lik kaynak yüzeyi alanı vibrasyon yönteminde alt sınırı oluşturmaktadır. Standart vibrasyon kaynak makinalarında kaynak yüzey alanı 750 – 900 cm² arasındadır. Özel makinalarda ise kaynak yüzey alanı 4000 cm²'ye kadar çıkmaktadır. Bu kaynak yüzey alanı büyüklükleri vibrasyon kaynak makinalarının kapasitelerini belirler.

Vibrasyon kanyağının en önemli uygulama alanı otomotiv endüstrisidir. Bu yöntemle otomotiv sektöründe havalandırma kanalı, emme manifoldu, yakıt tankı, arka lamba grupları, motor koruma kapağı vb. ürünlerin kaynakla birleştirilmesi başarılı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun dışında beyaz eşya sektöründe çamaşır ve bulaşık makinasındaki birçok plastik parçanın birleştirilmesinde vibrasyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir.

3.4.7. Lazer kaynağı

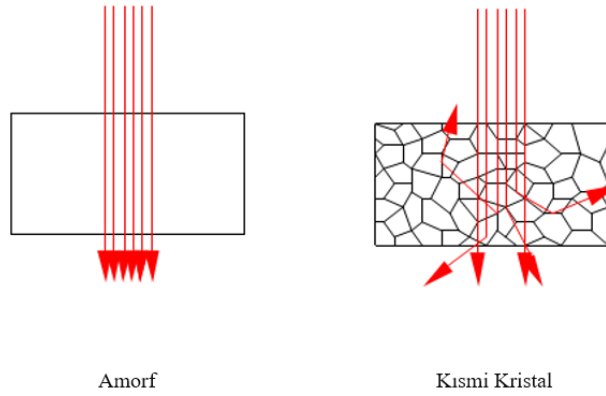
Polimer esaslı malzemelerin lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ilk olarak 1972 yılında Ruffler ve Gürs tarafından 1.5 mm kalınlığındaki LDPE levhaların birleştirilmesi ile gerçekleşmiştir. Ambalaj sektöründe olduğu gibi diğer endüstri uygulamalarında da polimer esaslı malzemelerin giderek yaygınlaşması, bu malzemelerin kısa sürede kaynakla birleştirilmesi yöntemlerine olan ilgiyi arttırmıştır. CO₂, Nd:YAG ve diyet gibi birçok lazer çeşidi polimerlerin kaynağında kullanılmaktadır. Lazer kaynağı polimer malzemelerin erime sıcaklığının üzerinde ve termal bozunma sıcaklığının altında uygulanır. Polimerlerin kaynak karakteristikleri içine katılan katkı maddeleri ve renklendiricilere bağlı olarak değişmektedir.

Lazer kaynağı, kızılötesi lazer ışınların malzeme içinde absorbe (soğurulması) edilmesiyle, birleşme bölgesinde ısı oluşumu ve termoplastik malzemenin plastikleşmesi ile gerçekleşir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Lazer kaynağının şematik gösterimi (Nonhof, 1994)

Soğurma enerjisi lazer tipine, plastik malzemeye ve plastik malzeme içindeki katkı maddelerine bağlıdır. Plastik malzemenin optik özelliklerine ve lazer ışınının dalga boyuna bağlı olarak, plastiğe giren lazer ışınlarının yansıma, soğurma ve geçirme oranları değişmektedir. Kısmi kristal termoplastikler amorf termoplastiklere göre daha fazla lazer ışınını soğurur. Şekil 3.12’de amorf ve kısmi kristal termoplastiklerin lazer ışınlarını soğurma davranışı şematik olarak gösterilmiştir (Ülker vd., 2013)



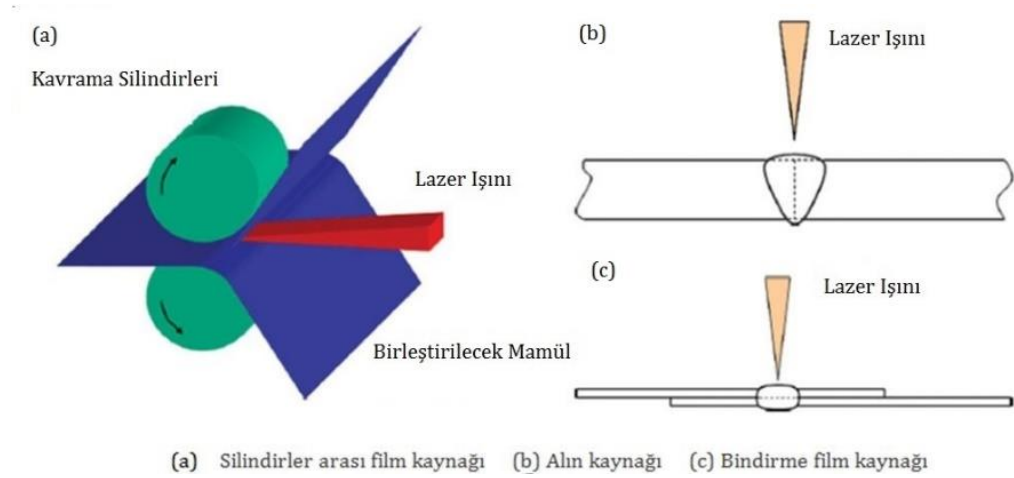
Şekil 3.12. Amorf ve kısmi kristal termoplastiklerin lazer ışınını soğurma davranışları

Lazer ışını polimer yüzey tarafından soğurulduğunda, dalga boyuna bağlı olarak fotolitik ve pirolitik olarak adlandırılan iki tipte etkileşim oluşur. Kısa dalga boylu ışınım (350 nm’den kısa veya morötesi ışınım (UV)) fotolitik etki yaratır. Fotolitik etkide foton enerjisi kimyasal bağları koparacak kadar yüksektir. Lazerde soğuk proses olarak tanımlanan bu işlem ile renk değişimi sayesinde markalama işlemi yapılır. Uzun dalga boylu ışınım (350 nm’den büyük veya kızılötesi ışınım (IR)) ısı içeren pirolitik etki yaratır. Bu etki malzemenin ergimesi ve kaynak edilebilmesini sağlar. Yüksek yoğunluklu lazer kullanımında ise malzemenin buharlaşması ve termal bozunmaya uğraması sonucu lazer kesimi gerçekleşir.

3.4.7.1. Direkt Lazer Kaynağı

Direkt lazer kaynağında malzemeler dış yüzeylerinden birkaç milimetre derinliğe kadar ısıtılır (Şekil 3.13). Normalde plastiklere özel ışın soğurucu

katılmaz. Termoplastiklerin kaynakla birleştirilmesinde genel olarak 2.0–10.6 μm dalga boyundaki lazer kaynakları kullanılır. İnce filmlerin yüksek hızda kaynak edilebilmesi için 10.6 μm dalga boyundaki CO_2 lazer ışını plastik yüzey tarafından soğurulur. Kalın plastiklerin kaynakla birleştirilmesinde CO_2 lazer geçirgen tabaka, sıkıştırıcı ve soğutucu olarak görev görür. Soğurmanın az güçlü olduğu 2.0 μm dalga boyunda, birkaç milimetre kalınlıktaki plakaları kaynakla birleştirebilmek için fiber veya Holmiyum:YAG lazeri kullanılabilir (Abele, 1997).



Şekil 3.13. Direkt lazer kaynağı şekilleri (TWI, 2015)

3.4.7.2. Transmisyon Lazer Kaynağı

Transmisyon lazer kaynağı endüstride termoplastiklerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamadaki dalga boyu 0.8 – 1.1 μm arasında olup, lazer kaynak tipleri diyot, Nd:YAG, ve fiber lazerdir. Bu dalga boyundaki ışın, katkısız plastiklerden yapılan kaynak üst parçası tarafından daha az soğurulur. Kaynak yapılacak alt parçanın lazeri soğurabilmesi için polimer içine lazeri soğuran katkı maddeleri ilave edilir veya alt parça transparan ise bağlantı yüzeyine ince bir kaplama uygulanır. Parçalar kaynaktan önce hizalanır ve lazer ışını üst parçayı geçerek alt parçanın soğurma yüzeyindeki bağlantı yüzeyini ısıtır (Şekil 3.14).

1998’de İngiltere Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute - TWI) tarafından geliştirilen Clearweld® lazer kaynak yöntemi sayesinde geniş renk

yelpazesindeki kozmetik ürünler sorunsuz olarak birleştirilir. Bu yöntemde kaynakla birleştirilecek alt parçanın içine minimum düzeyde karbon ilave edilir veya yüzeye IR (kızılötesi) soğurucu kaplanır. Transmisyon lazer kaynak yöntemi direkt lazer kaynak yöntemine göre daha kalın parçaların birleştirilmesinde kullanılır.

Üst parçanın maksimum kalınlığı malzemenin transmisyon (ışın geçirgenliği) özelliğine bağlıdır. Transmisyon lazer kaynağı, uygulanan lazer enerjisinin %10'undan fazlasının bağlantı ara yüzeyine iletilmesi durumunda mümkün olur. Transmisyon lazer kaynağı film ve levhaların kaynağında da kullanılabilir. Lazer ışını sıkıştırma öncesinde rulo işleme yöntemiyle iki parça üzerinde taranır (Ülker vd., 2013).

3.4.7.3. Malzeme Özellikleri ve Seçimi

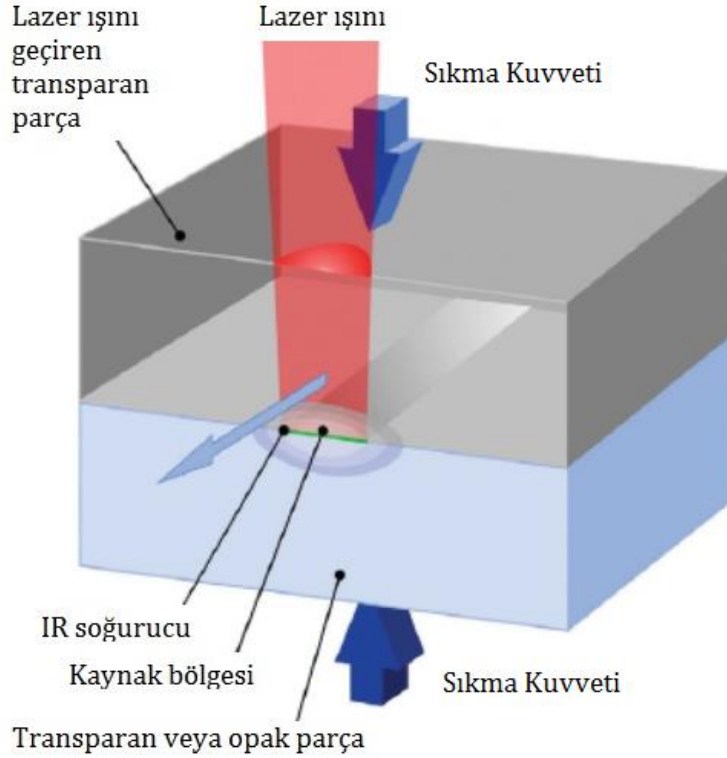
Kaynakla birleştirilecek farklı polimer arasındaki soğurmadaki değişim ve katkı maddelerinin etkisi dikkate alınmalıdır. Naylon, PE ve PP gibi yarı kristal yapıdaki polimerler, kalınlık değişimiyle eksponansiyel olarak azalan geçirgenlik karakteristiği göstermektedir.

Thermoplastiklere az bir oranda katılan karbon, geçirgenliği sıfır seviyesine indirir. Bu etki kaynak işleminde önemlidir. Bundan dolayı karbon siyahı ve diğer kızılötesi (IR) soğurucu malzemeler ısı oluşumunun istendiği veya kaynak edilmek istenen bölgeye yerleştirilir. Transmisyon lazer kaynağının gerçekleşebilmesi için, soğurucu üst parçanın içine değil, alt parçanın üst yüzeyine veya alt parçanın içine konulmalıdır (Throughton, 2008).

Lazer kaynağı ile birleştirilecek olan parçalarda renk seçimi ve renklendiricinin yapısı lazer kaynağının kalitesine etki eden temel faktörlerdendir. Endüstriyel tasarım aşamasında lazer kaynak prosesi dikkate alınarak renk seçimi yapılması gerekir.

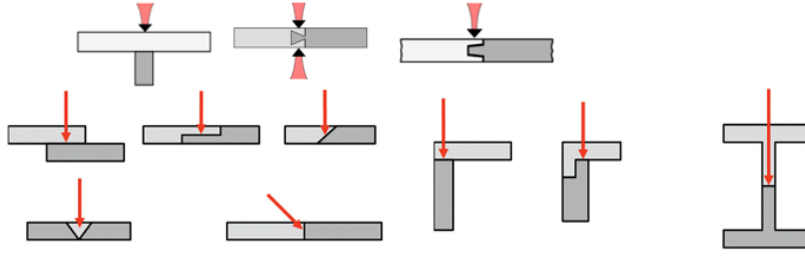
Termoplastiklerin renklendirilmesi boya ve pigmentlerle sağlanır. Pigmentlerin parçacık boyutları çok küçük olduğu için plastik parça içindeki kontrolsüz ve düzensiz dağılımı küçük ayna etkisi yarattığından lazer ışınlarının saçılmasına ve kayak bölgesinde ısının oluşmamasına neden olur. Bu nedenle lazer kaynağı ile birleştirilecek termoplastiklerin renklendirilmesinde pigment yerine konsantre boyalar tercih edilmelidir. Çünkü konsantre boyalar plastik

malzeme içinde çözüldüğünden lazer ışını saçılmaz ve birleştirme yüzeyinin ısınması sağlanır.



Şekil 3.14. Direkt lazer kaynağı (TWI, 2015)

Transmisyon lazer kaynağı için uygun bağlantı tasarımları Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Kaynak birleştirme bölgesinde ara yüzeyin eritilebilmesi için enerjinin yeterli ve kesitte homojen dağıtılması gerekir. Aşırı enerji kullanımı birleştirme bölgesinde polimer esaslı malzemeyi termal olarak bozacağından kaynak mukavemetini olumsuz etkileyecektir. Karmaşık 3D kaynak yüzeylerinde eşit enerji dağılımı için detaylı proses tasarımı gereklidir. Lazer kaynağında, birleşme bölgesinin yüzey pürüzlülüğü 50 μm ’den az olmalıdır. Kaynakla birleştirilecek parçaların kaynak öncesinde bir arada tutulabilmesi ve yüzeylerin örtüşmesi tırnaklı bağlantılarla desteklenmelidir. Tüp şeklinde birbiri içine geçerek kaynaklanacak parçaların geçme toleransı, birbirlerini sıkıştırarak şekilde seçilmelidir (Grewell, 2003).

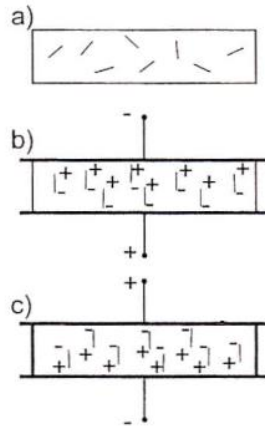


Şekil 3.15. Çeşitli bağlantı tasarımları (TWI, 2015)

3.4.8. Yüksek frekans - radyo frekans (RF) kaynağı

Yüksek frekans veya radyo frekans kaynağı olarak adlandırılan bu kaynak yönteminde 27.12 MHz yüksek frekanslı elektromanyetik enerji ile kaynakla birleştirilecek olan plastik esaslı malzemenin ısınması sağlanır (Ehrenstein, 2004)

Yüksek frekans kaynağının prensibi, malzeme içinde var olan polar moleküllerinin yüksek frekans uygulamasıyla oluşan elektrik akımı ile aynı yöne gelmesidir. Böylece titreşimle birlikte iç ısınma başlar (Şekil 3.16).



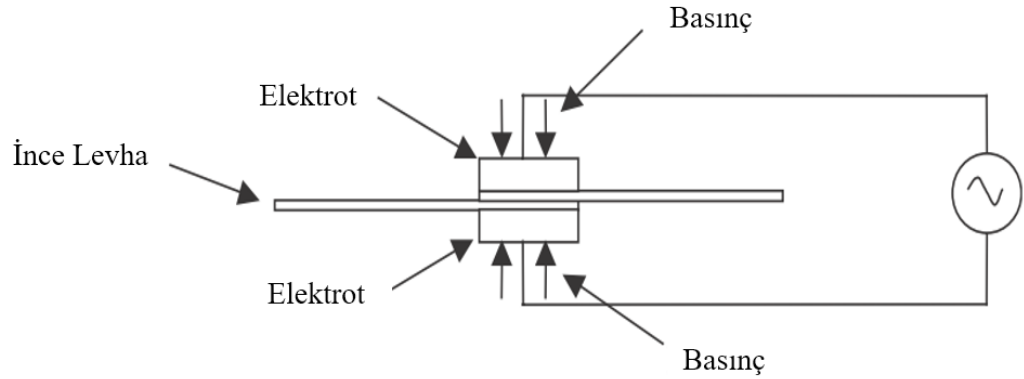
Şekil 3.16. Elektromanyetik alanda moleküllerin polarizasyonu

Yüksek frekans etkisi ile oluşan ısınma malzemenin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Dielektrik kayıp faktörü malzemenin polaritesini gösteren bir

büyüküktür. Bir malzemenin kayıp faktör değeri polimer esaslı malzemenin yüksek frekans kaynağına uygun olup olmadığının göstergesidir

Poliolenin grubundaki PP ve PE malzemelerin kayıp değeri faktörü çok küçük olduğu için, bu malzemelerin yüksek frekans kaynağı ile birleştirilmeleri mümkün değildir (Ülker vd., 2013).

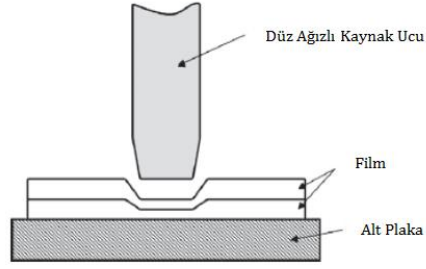
Yüksek frekans kaynağı, genellikle film ve ince levhaların birleştirilmesinde kullanılır (Şekil 3.17). Kaynak ucu (elektrot) ve alt plaka arasında aralık sadece 1.5 mm'den daha az olduğu zaman, kaynak bölgesinde oluşan güçlü elektrik alanı malzemenin erimesini sağlar.



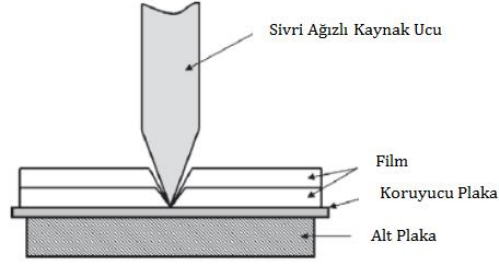
Şekil 3.17. Yüksek frekans kaynağının şematik gösterimi (Grimm, 1995)

RF kaynağında elektrot tipi ve şekli kaynak tiplerini tanımlamaktadır. Buna bağlı olarak çeşitli kaynak bağlantısı tipleri geliştirilmiştir.

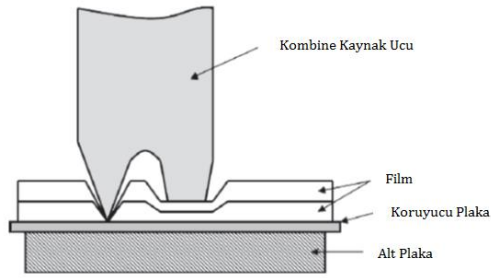
Düz RF kaynağında düz ağızlı kaynak ucu kullanılır (Şekil 3.18). Kesme-birleştirme kaynağında çok ince bir kaynak hattı oluşturmak için bıçak ağız şeklinde bir kaynak ucu kullanılır. Kaynak sonrasında kaynak hattı etrafındaki malzeme kesilir ve kaynaklanan parçadan ayrılır (Şekil 3.18). Bu uygulamada elektrotun sivri ucunun alt plakaya temas etmemesi için, kaynaklanacak termoplastik parça ile alt plaka arasında koruyucu plaka yerleştirilir. Bu kaynak yönteminde kaynak dikişinin dar olması sebebiyle kaynak mukavemeti düz RF kaynağına göre daha zayıftır. Bu nedenle, kaynak mukavemetini arttırmak için düz ve bıçak ağız şekillerin oluşturduğu kombine kaynak ucu kullanılmaktadır. Bu yöntem kombine düz ve kesme-birleştirme kaynağı olarak adlandırılır (Şekil 3.18) (Throuhton, 2008; Ülker vd., 2013).



Düz



Kesme - Birleştirme

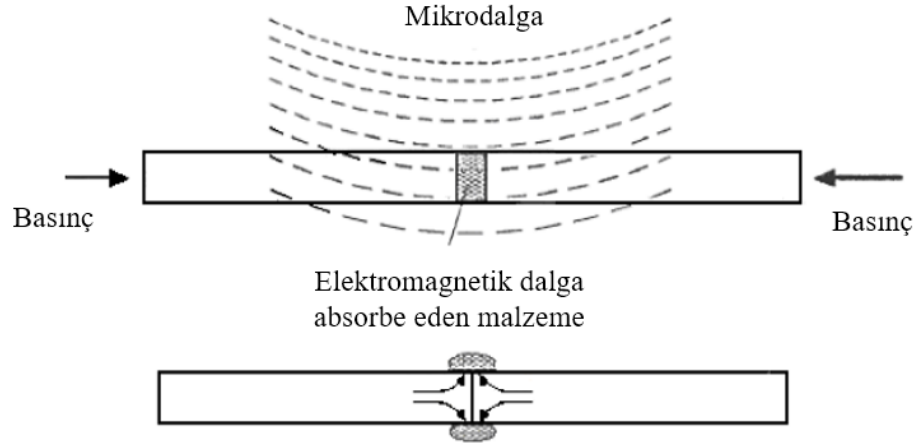


Kombine Düz ve Kesme - Birleştirme

Şekil 3.18. RF kaynak ucu tipleri

3.4.9. Mikrodalga kaynak yöntemleri

Birleştirilecek plastik malzemeler arasına elektromanyetik enerji absorbe edebilme özelliğine sahip bir malzeme olan yüksek yoğunluklu PE yerleştirilir ve basınç altında yaklaşık 70 MHz-100 GHz frekansta mikrodalgalar kullanılarak Şekil 3.19.'da görülen birleştirme işlemi gerçekleştirilir (Ehrenstein, 2004).

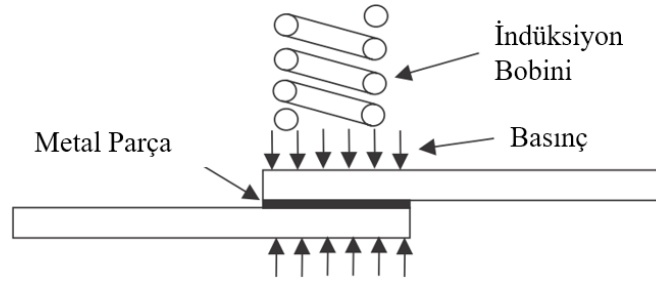


Şekil 3.19. Mikrodalga kaynak yöntemi

Yüksek frekanslarda uygulanan elektromanyetik dalgalar, birleşim yüzeyleri arasında bulunan malzeme tarafından absorbe edilerek ısı enerjisine dönüşür, ısınarak eriyen ara malzeme, uygulanan basıncında etkisi ile birleşim yüzeyleri arasından sızarak ayrılır. Bölgede oluşturduğu sıcaklık artışı ile yumuşayan birleşim malzemelerinin kaynak yüzeyleri, basınç kuvvetinin etkisi ile birbirleri ile temas ederler. Bölgenin soğutulması ile işlem tamamlanır. Bu işlemde etkili olan parametreler; güç, ısıtma süresi, kaynak basıncı, ara malzeme kompozisyonu, işlem süresi ve yer değişimi olarak sıralanabilir (Anık vd., 2003).

3.4.10.Rezistans kaynak yöntemleri

İmplant veya elektro-füzyon kaynak yöntemi olarak da bilinen bu kaynak yönteminde, Şekil 3.20' de görüldüğü gibi birleştirilecek plastik malzemelerin temas ara yüzeyleri arasına yerleştirilen metalik tellerden elektrik akımı geçirilerek bölgenin ısıtılması sağlanır (Bilici, 2011). Kaynak bölgesinin yumuşayarak birleşmesi sırasında ısıtıcı teller birleşim bölgesi içerisinde kalmaktadır. Bu durum, kaynak işleminin sağlamlığını etkilemekte ve üretim maliyetini arttırabilmektedir. Kullanılan telin kaynak bölgesinde zamanla korozyona uğrayarak kaynak sağlamlığını düşürmesinin önlenmesi amacıyla Cr-Ni teller kullanılmaktadır. Yöntem, oldukça basit olup büyük ve karmaşık şekillere sahip parçaların birleşim bölgeleri için uygundur. Kaynak işlemi



Şekil 3.21. İndüksiyon kaynağının şematik gösterimi

Termoplastik matris içerisinde dağılmış metal parçalarının veya ince ağ şeklindeki tellerin ısıtıcı olarak kullanılması daha fazla tercih edilmektedir. Isıtıcı elemanlara bağlı olarak manyetik alanın frekansı artırılabilir (3-10 MHz). Sıcaklığın daha geniş boyutlarda yükseltilmesi sonucunda kaynak bölgesinin hacmi arttırılmış olur. Kaynak bölgesinin malzemeler içerisindeki genişliğine bağlı olarak kaynak sağlamlığı daha fazla yükselmektedir. Elektromanyetik alanın oluşturulması için gerektiğinde su ile soğutulabilen bakır bobinler kullanılır. Bakır bobinlerin geometrileri kaynak işlemi için oldukça önemlidir. Bobinin tüm kaynak bölgesini düzgün olarak kapsaması gerekir. Bu kaynak yöntemi ile özellikle karmaşık şekillere sahip plastik malzemelerin birleştirilmeleri mümkün olabilmektedir ve düşük elastisite modülüne sahip plastik malzemelerin kaynak işlemleri iyi sonuçlar vermektedir. Ancak metalik parçaların ara yüzeyde kalması kaynak sağlamlığını etkilemekte ve kaynak maliyetini artırmaktadır. PE ve akriliklerde %50 sağlamlık değerine ulaşılmaktadır. Bu işlemde etkili olan parametreler; indüksiyon bobini geometrisi, akım şiddeti, frekansı, basınç kuvveti ve kaynak işlem süresi olarak sıralanabilir (Wise,1997; Sander, 1987, Yousefpour et al., 2004)

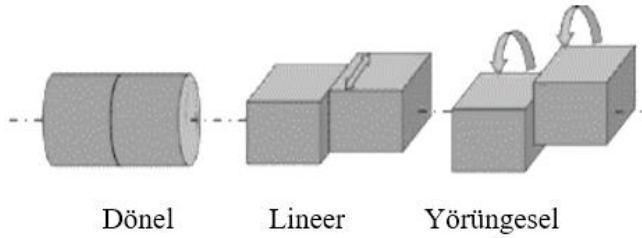
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

4.1. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ya da sürtünen eleman ile kaynak yöntemi bir katı hal birleştirme yöntemi olup literatürde Friction Stir Welding (FSW) olarak tanımlanmaktadır. SKK'nın geliştirilmesine dek, bazı katı hal birleştirme teknolojilerinde önemli gelişmeler olmuştur. Bu gelişmelerden en önemlisi sürtünme kaynağıdır. İlk olarak 1891 yılında Bingon tarafından metal boruların birbirine kaynağında kullanılan bu yöntemin 1924'te Richter ve 1929'da Kloştuk tarafından da çeşitli uygulamaları patentlenmiştir.

Sürtünme kaynak (SK – friction welding - FW) yöntemi birçok endüstri alanında ekonomik olarak uygulanan bir kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağı iki iş parçasının katı fazda birleştirilmesini sağlayan bir kaynak yöntemidir. Birleştirme için gerekli olan ısı birleştirilecek parçaların basınç altında sürtünmeleri sonucunda elde edilir. Kaynak bölgesinin ısınması için dışarıdan ısı veya elektrik akımı kullanılmaz. İş parçalarında ısı oluşturmak için yaygın olarak kullanılan sürtünme hareketi üç tanedir. Dönel, lineer ve yörüngesel sürtünme. Bu sürtünme hareketleri Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir (Bilici, 2011).

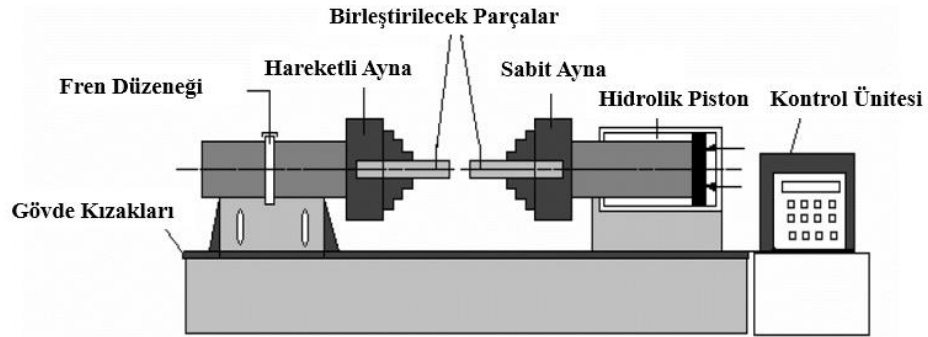
Sürtünme kaynağının 20 farklı uygulama yöntemi mevcuttur (Thomas and Dolby, 2003). Bu yöntemlerin içinde en fazla tanınmış ve uygulanmakta olanı ise dönel sürtünme kaynağıdır. Dönel sürtünme kaynağının çalışma prensibi Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilmiştir (Yousefpour and Hojjati, 2002; Bilici, 2011).



Şekil 4.1. Isı oluşturmak için kullanılan sürtünme hareketleri

Sürtünme kaynağı; biri sabit, diğeri hareketli iki silindirik parçanın, alın yüzeylerinin eksenle basınç yardımıyla birbirlerine sürtünmesi sonucu ortaya çıkan sürtünme ısısı altında yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak

yönteminde kullanılan en önemli parametreler; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi ve yığma basıncı olarak sıralanabilir. SK uygulanmadan malzemelerin alın olarak belirlenen yüzeylerinin yağ, pas ve kirden arındırılması; kaynak kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Normal olarak kaynak edilemez diye bilinen, bazı yüksek mukavemetli ısıl işlem kabul eden alüminyum alaşımları, sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler. Mukavemette bir kayıp olmadığı gibi kaynak bölgesi tamamen sünek olur. Bu yöntemde malzemelerin ergimesi için gerekli olan enerji kullanımına ihtiyaç olmadığından maliyetten ve işçilikten tasarruf sağlanır (Özdemir, 2002; Sarsılmaz, 2000)



Şekil 4.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi (Sarsılmaz, 2000)

Sürtünme kaynağında, birleşme bölgesinde meydana gelen mikro yapısal değişiklik dört bölge ayırt edilerek incelenir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak tanımlanır. Sürtünme kaynağında bir ergime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin darlığı ve kaynağın çevresinde plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığı en belirgin özelliklerini teşkil eder.

Kaynak kalitesi; uygun malzeme seçimi, kaynak tasarımı, sürtünme süresi, sürtünme basınç kuvveti, devir sayısı, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi gibi kaynak parametrelerine bağlıdır. Hız, zaman ve basınç kuvveti gibi kaynak parametrelerinin geniş çapta kullanımı ile kaliteli bir kaynak elde edilebilir (Özdemir, 2002).

Sürtünme kaynağında ergitme olmadığı için kaynak çarpılmaları çok düşük seviyede olmakta, kaynak dumanı, radyasyon ve metal sıçramaları

oluşmamaktadır (ASM, 1993). Kaynak kabiliyeti yüksek metaller, kaynak kabiliyeti düşük olan (Song et al., 2008; Preuss et al.,2006), farklı bileşimdeki alaşımlar (Yılbaş et al.,1995) plastikler (Yousefpour and Hojjati, 2002; Mistry, 1997) ve hatta tahtalar (Stamm, 2005) hatasız bir şekilde sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir (Bilici, 2011).

Yöntem uygulama olarak basit olmasına karşın ısı oluşturmak ve metali yumuşatacak ısıyı elde etmek için sadece dairesel veya lineer hareketle sürtünme olanağı vardır. Bu açıdan yöntem kaynak geometrisi açısından oldukça sınırlıdır. Sürtünme kaynağının termomekanik prensibi SKK'nın geliştirilmesine önemli bir temel oluşturmuştur (Lohwasser ve Chen, 2010; Kaluç ve Taban, 2007; Güngör, 2013).

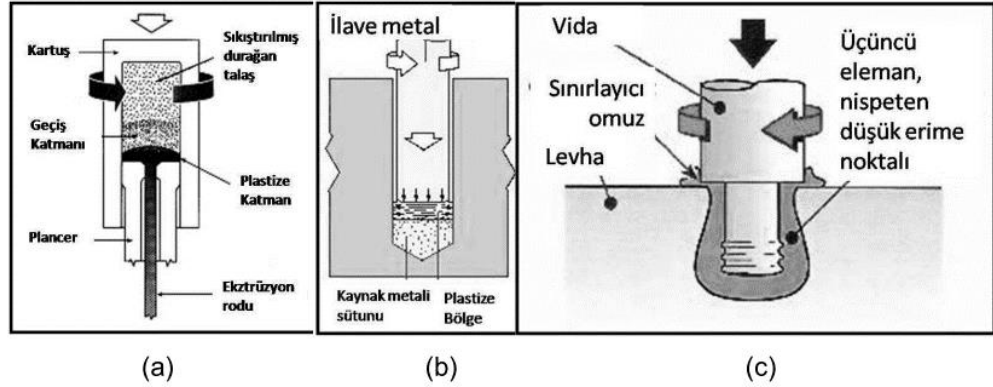
4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Gelişimi

1990'lı yıllarda TWI araştırma geliştirme bölümünde Wayne Thomas ve ekibi tarafından yapılan çalışmalarda öncelikle sürtünme kaynağının birkaç türü geliştirilmiştir. Bunlar sürtünme ekstrüzyonu (friction extrusion), sürtünme hidropillar yöntemi (friction hydropillar) ve üçüncü eleman sürtünme birleştirmesi (third body friction joining) yöntemi olarak sıralanabilir (Şekil 4.3).

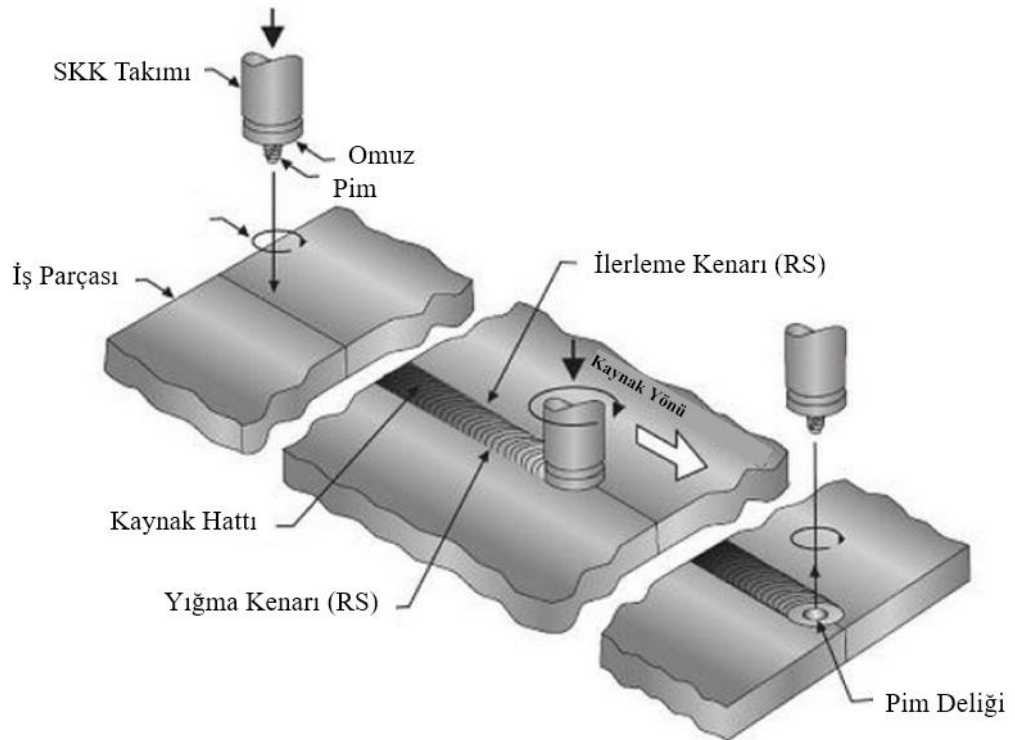
Aralık 1991 yılında TWI araştırmacılarından Wayne Thomas ve ekibi tarafından iş parçasından daha sert bir malzemeden üretilen ve ergimeyen döner bir prob tarafından iş parçasının plastik deformasyona uğratıldığı ve döner eleman tarafından plastik deformasyona uğrayan iş parçalarının birbiri arasında transferi sayesinde birleşmenin sağlandığı keşfedilmiştir (Şekil 4.4) (Lohwasser ve Chen, 2010; Kaluç ve Taban, 2007).

Kaynak sırasında kaynak edilen malzemelerin eriştikleri maksimum sıcaklığın bu malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında kalması dolayısıyla bir katı hal kaynak yöntemi olarak tanımlanır (Murr et al., 1998; Thomas et al., 1991,1995; Thomas ve Nicholas, 1997; İpekoğlu, 2011). Günümüzde ise alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yanı sıra bakır ve bakır alaşımları, magnezyum ve magnezyum alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları, karbonlu az alaşımlı çelikler, nikel ve nikel alaşımları, çinko alaşımları, kurşun alaşımları, metal matrisle kompozeler ve bazı tür paslanmaz çeliklerin kaynağı ve bu türlerin birbiri arasında farklı metal kaynağı uygulamalarında kullanılmaktadır (Kaluç ve Taban, 2007; Güngör, 2013) SKK öncelikle

alüminyum ve alaşımlarının dövme ve döküm ürünlerinde karşılaşılan metalürjik ve mekanik sorunların giderilmesine yönelik olarak geliştirilmiş ve uygulanmıştır.



Şekil 4.3. (a) Sürtünme ekstrüzyonu (b) sürtünme hidropillar (c) üçüncü eleman sürtünme birleştirmesi (TWI, 2015)



Şekil 4.4. SKK yöntemi

SKK, özellikle ergitme kaynak yöntemleri ile yapılan kaynakları son derece sorunlu, çoğu zaman ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilemez olarak kabul

edilen 2xxx ve 7xxx gibi Al-alışımlarının kaynağında başarı ile kullanılabildiği gibi Cu-alışımları gibi alışımlara da uygulanabilmektedir. (İpekoğlu, 2011).

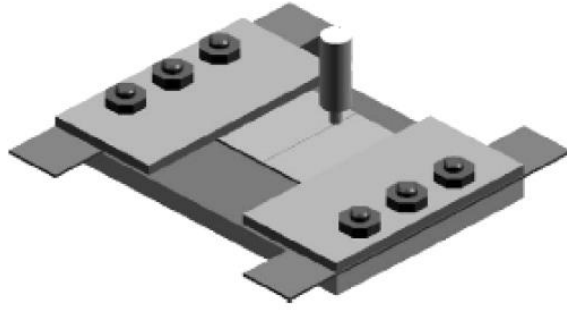
Bu kaynak yönteminde ergime söz konusu değildir ve ergitme kaynak yöntemlerinde söz konusu olan ergime nedeniyle oluşan kaynak hataları söz konusu olmaz; dolgu metali ve koruyucu gaz gerektirmez; ergitme kaynak yöntemlerinde söz konusu olan kaynak sonrası çarpılma bu kaynak yönteminde çok düşük seviyelerdedir (Thomas and Nicholas, 1997; İpekoğlu, 2011).

Ergimenin söz konusu olmaması ve dolgu metali gerektirmemesi, ergitme kaynak yöntemlerinde sorun teşkil eden kompozisyon uyumsuzluğu ve katılaşma çatlağı endişesi olmadan Al alışımlarının tümüne uygulanabilmesini sağlarken, birbirinden farklı Al alışımlarının birbiriyle birleştirilmelerinde de başarılıdır . Yöntemin geliştirilmesine yönelik olarak, lazer destekli SKK, plazma destekli SKK ve ultrasonik destekli SKK gibi hibrit uygulama çalışmaları bulunmaktadır. Aynı şekilde kaynak parametreleri optimize edilmesi, takım malzemesi ve geometrisinin geliştirilmesine yönelik de çalışmalar yapılmaktadır (Mishra and Mahoney, 2007; İpekoğlu, 2011).

4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulanışı

4.3.1. SKK yapılacak parçaların sabitleilmesi

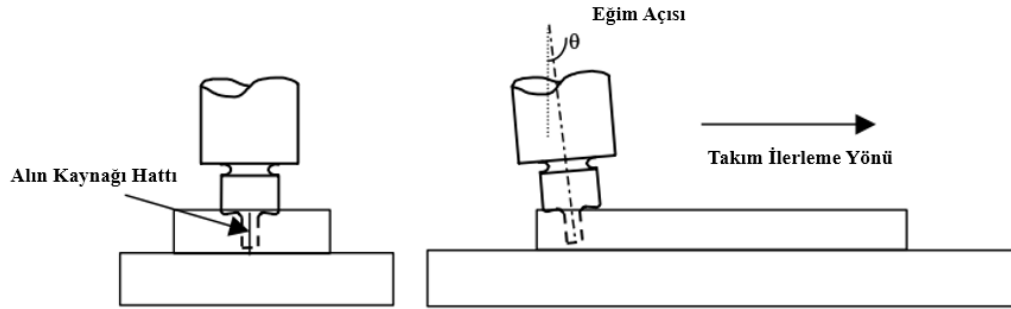
SKK yapılacak parçaların uygulanan kuvvetten dolayı yana, yukarıya ve ileriye doğru hareket etmelerini önlemek ve birleşme yüzeylerinin birbirine sıkı şekilde temasını sağlamak için parçalar bir sabitleme elemanı üzerine bağlanmalıdırlar. Çünkü birleştirme esnasında, iş parçaları yukarı doğru kalkmaya, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye çalışılacaktır. Bu sabitleme işlemi çeşitli hidrolik baskı pabuçları ile de yapılabilir. Ayrıca, birleştirme hattında geometrik çarpılmaların önüne geçebilmek için, karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanmak da mümkündür. Şekil 4.5’de bir baskı pabuç düzeneği içeren bağlama kalıbı gösterilmiştir (Bozkurt, 2008).



Şekil 4.5. SKK tekniğinde kaynak edilecek parçaların sabitlenmesi

4.3.2. SKK prosesinde bağlantıların imalatı

SKK, değişik birleştirme formunda (alın altına, bindirme veya T-formu) sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir ucun (kaynak takımı) daldırılarak kaynak yapılmak istenilen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesi ile gerçekleştirilir. Şekil 4.6’da şematik olarak SKK tekniğinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.6. SKK tekniğinin şematik çalışma prensibi

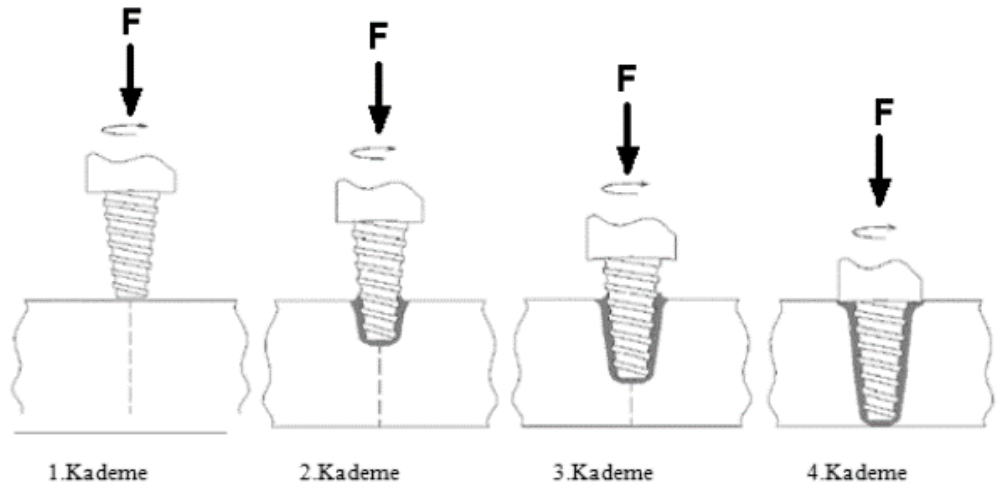
İş parçası ile dönme ve ilerleme hareketine sahip karıştırıcı pim arasında meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun etki ettiği bölgede ısınma yoğunlaşması oluşturur. Isınan malzeme yumuşar, plastik olarak şekil değiştirir ve takımın basma kuvvetinden dolayı, yüksek nitelikli katı hal birleştirme ve çarpılma olmaksızın bir birleştirme işlemi gerçekleşir (Xu, 2003; Bozkurt,2008). Burada takım iki önemli işlevi yerine getirmektedir:

- a) katı hal kaynak oluşumu için gerekli sürtünme ısısının ortaya çıkması ve
- b) birleşmenin gerçekleşebilmesi için ortaya çıkan ısı vasıtasıyla malzemenin taşınmasıdır (Mishra and Ma, 2005).

SKK üç aşamada gerçekleşir:

1. İşlem öncesinde kaynak edilecek malzemelerin birleştirilecek yüzeylerinin birbirine uyumlu ve tam bir temasın olması gereklidir. Yüzeyler arasında herhangi bir boşluk olmamalıdır.
2. Yüzeylerin düzgünlüğü sağlandıktan sonra kaynak parçalarının kaynak esnasında kaynak yönünün değişmemesi için parçaların çok iyi sabitlenmesi gereklidir.
3. Parçalar makinaya sabitlendikten sonra karıştırıcı pim kaynak bölgesine doğru daldırılır.

Fakat karıştırıcı pim parçaların içine doğru hemen daldırılırsa karıştırıcı pim hasara uğrayabilir. Bunun olmaması için karıştırıcı ucun parçalara ilk teması esnasında sürtünme enerjisinden faydalanılarak parçaların ısınıp yumuşamalarını sağlamak için öncü bir punta deliği açılmalıdır. Kaynak takımının iş parçasına dalması Şekil 4.7’de görülmektedir. Bu aşamadan sonra omuz, ana metale değdikten sonra parçaların birbirlerine kaynak edilmesi için gerekli olan sürtünme-ısı enerjisini sağlar. Belirli bir dönme ve ilerleme oranı ile parçalar kaynak doğrultusunda kaynak edilirler (Bozkurt, 2008).

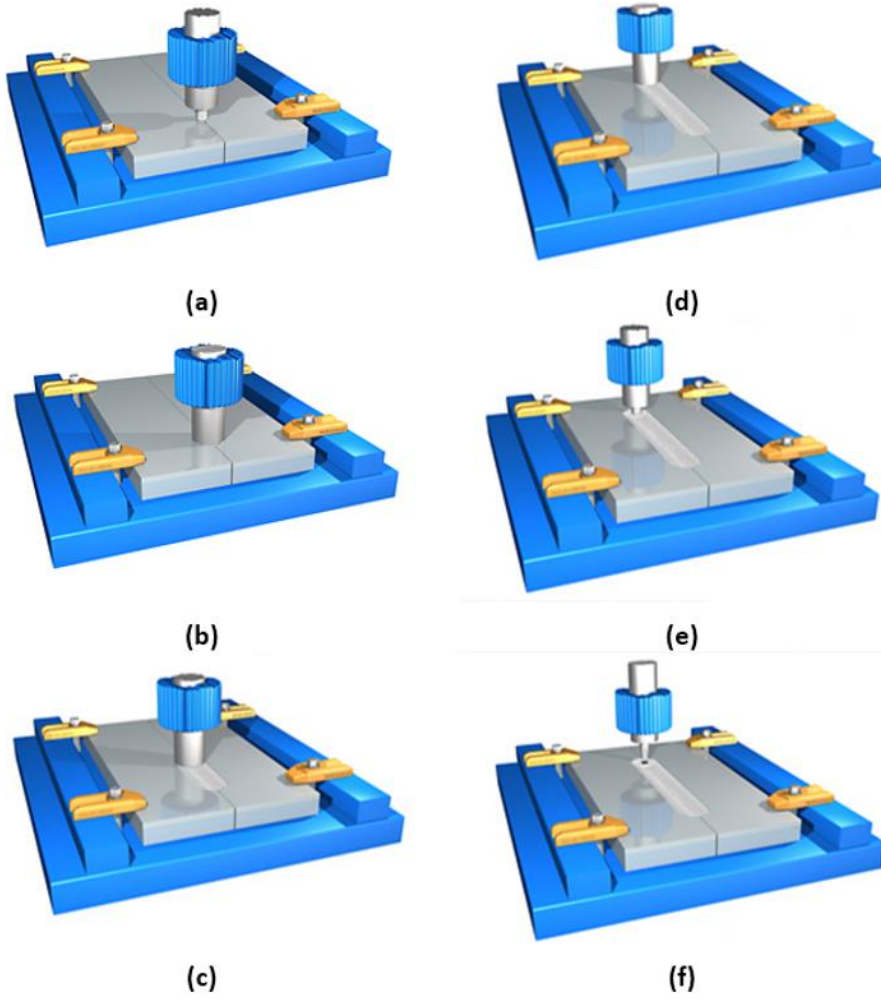


Şekil 4.7. SKK takımının iş parçasına daldırılması

Şekil 4.8’de SKK esnasında takımın hareket kademeleri gösterilmektedir.

- Levhaların yerleştirilmesi,
- Takımın iki levha arasına dalmadan önceki hali,
- Omuzun iki levha arasına dalarak ana metalin levha yüzeylerine temas etmesi ve kaynak bölgesinde ısı meydana getirerek katı hal akışının başlaması,
- Dönen takımın katı halde metal akışını sağlayarak SKK’nın oluşumu
- Kaynağın bitişi ve
- Takımın geri çekilmesi gösterilmiştir .

Sürtünme ısısı, SKK yapılacak malzeme ve aşınmaya karşı dirençli kaynak takımı arasında oluşur. Bu ısı, malzemenin ergime noktasına ulaşmadan kaynak edilen malzemenin yumuşamasına ve pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılmasını sağlar ve böylece karıştırılan malzemenin soğuyarak katılaşması gerçekleşir. Yüksek oranda plastik şekil değişimine uğramış olan kaynak metali yeniden kristalleşme yaparak çok ince taneli ve eş eksenli yönlenmiş bir mikro yapıya dönüşür. Kaynak bölgesinde oluşan hidrostatik iç basınç ve hamur halindeki metalin süpürülme hareketi üzerinde etkili olan her türlü değişken elde edilen kaynağın kalitesini ve özelliklerini tayin ettiğinden çok önemlidir (Bilici, 2011).



Şekil 4.8. SKK yönteminin aşamaları

Metal yüzeyinde oluşan oksit tabakası da plastik deformasyonla kırılmaktadır. Bu yüzden yöntemin uygulanışı sırasında koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz. Tüm bu olaylar alaşımın ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir.

Alüminyum alaşımları farklı kimyasal ve mekanik karakteristiklere sahiptir. Kaynak yapmadan önce, işlem değişkenlerinin mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar alaşım çiftlerine göre farklılıklar göstermektedir. Kaynak işlemi zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, yöntemin performansı ve üstünlükleri sanayinin ilgisini çekerek, yöntemle ilgili yapılan araştırmalar yaygınlaştırılmıştır. Bu kaynak yönteminin 1 mm'den daha az ve 35 mm'den kalın olan ve kaynatılamaz olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına

başarıyla uygulandığı ve araştırmacılar tarafından, kaynaklı malzemelerde çok iyi mekanik özelliklere ulaşıldığı belirtilmektedir (Özdemir, 2003).

İnce parçalarda ısının çoğu omuz sürtünmesinden doğar. Parça kalınlığı arttıkça ısının çoğu karıştırıcı ucun sürtünmesi ile oluşur. Yüksek sıcaklıklar karıştırma ucuna yakın kısımlarda oluşmaktadır. Pimden uzaklaştıkça sıcaklık düşmektedir. En yüksek sıcaklık omuza komşu bölgede yani iş parçasının üst kısmında oluşur. SKK yöntemi ile kaynak edilen iş parçalarında maksimum ısınma sıcaklığı metalin ergime sıcaklığına ulaşmamaktadır. Metalin mutlak ergime sıcaklığının en fazla %80'ine kadar metal ısınmaktadır (Bilici, 2011).

SKK süresince malzeme yüksek sıcaklıklarda yoğun kalıcı şekil değişimine (plastik deformasyona) uğramaktadır. Bunun sonucunda malzemenin iç yapısında ince taneli ve yeniden kristalleşmiş tane yapıları meydana gelmektedir. İnce taneli mikro yapı da malzemenin iyi mekanik özellikler sergilemesine yol açmaktadır (Mishra and Ma, 2003). SKK yöntemi ark kaynağına oranla; işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, kaynak dikişinde ince taneli yapı oluşumu, mekanik özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans sağlamaktadır (Sarsılmaz, 2000).

4.4. SKK prosesinde malzeme akışı

Kaynak yapılan parçaların kimyasal bileşimi, kaynak takım geometrisi ve kaynak parametrelerine bağlı olarak SKK sırasında malzeme hareketi karmaşık bir tarzda gerçekleşmektedir. Son mikro yapısı kaynak özellikleri ile malzeme hareketine bağlı olarak değişmektedir. Malzeme akışını inceleyen araştırmacılar farklı yöntemler kullanmış ve ana hatları aynı ama detayda birbirinden ayrılan modeller geliştirmişlerdir. Arbogast (2008) tarafından geliştirilen modelde SKK'da malzeme akışı ve son mikro yapısının alüminyumun sıcak ekstrüzyon ve dövme şekillendirme tipik malzeme akışı ve final mikro yapısına çok benzer olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu model ile yapılan hesaplamalarda bulunan kaynak bölgesi ısınma sıcaklığının, kaynak bölgesi genişliğinin ve iç basınç değerlerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmüştür.

Bu modelde malzeme hareketi 5 kademede gerçekleşmektedir.

- (1) Ön ısıtma,
- (2) İlk deformasyon,

Bu bölgeye ilk deformasyon bölgesi denir. Bu bölgedeki hamur halindeki metalin bir kısmı yukarıya (omuza doğru) ve bir kısmı karıştırıcı ucun altına doğru zorlanır, hareketlenir (Şekil 4.9a). Dönen karıştırıcı ucun altında hareket eden malzeme dönme hareketi yaptığı için bir anafor oluşturur. Aşağıya hareket eden malzemenin çok azı dönen karıştırma ucun altında kalan ve kalınlığı 0,2 mm'den daha az olan anafor bölgesinden geçerek ucun arka tarafına geçer. Malzemenin çoğu ise karıştırma ucunun dış boşluklarından geçerek ucun arka tarafına akar. Bu akma hareketi bir çeşit ekstrüzyon hareketidir. Omuzun yaptığı basınç ile akma mukavemeti düşmüş olan sıcak metal, akma mukavemeti yüksek olan soğuk metal ve pim arasında sıkışarak geriye doğru akar. Soğuk metal ve karıştırıcı pim ekstrüzyon işleminin kalıbını oluşturmaktadır. Kalıbın boşluğunu karıştırıcı ucun vida boşlukları oluşturur. Böylece SKK takımı ileri giderken karıştırıcı ucun boşalttığı boşluğa hamur metal ekstrüzyon yöntemi ile dolar. Ucun arkasına geçen sıcak malzeme omuzun hidrostatik basıncı ile sıkıştırılır. Bu sıkıştırma bir nevi dövme işlemidir. Bu safhada katı faz kaynak birleştirmesi tamamlanmış olur. En son olarak takımın ilerlemesi ile omuz basıncından kurtulan birleştirme bölgesi soğumaya geçer.

4.5. SKK Tipleri

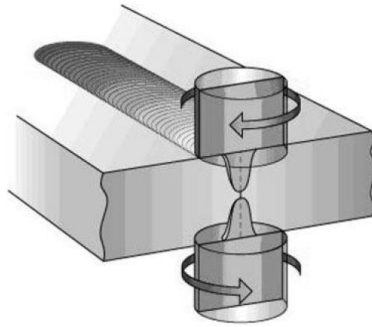
SKK yeni bir kaynak yöntemi olarak kabul edilebilmesine karşın, son 25 yılda yapılan yoğun araştırmalar bu konuda hızlı bir ilerleme süreci yaşanmasını sağlamıştır. Bu gelişim, uygulama güçlüğüne olduğu durumlar ve ihtiyaçların da yön vermesiyle SKK için yeni teknikleri de beraberinde getirmiştir. Bu teknikler bir çeşit SKK türü olarak kabul edilerek yöntem dört gruba ayrılabilir (İpekoğlu, 2011):

1. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK)
2. Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (ÇSKK)
3. Hibrit sürtünme karıştırma kaynağı (HSKK)
4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK)

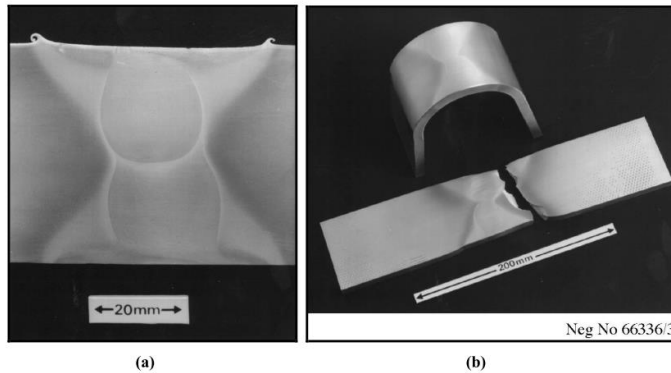
4.5.1. Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (ÇSKK)

SKK, Al-alışımları ve benzeri ergime sıcaklıkları düşük malzemelerin kaynağında başarılı bir şekilde uygulanabilmekle beraber, kaynak yapılan levha kalınlıklarının artması ile uygulama güçlükleri ortaya çıkmakta ve daha güçlü kaynak ekipmanları gerekmektedir. Bunun yanında levha kalınlığının artması durumunda çift taraflı kaynak yapma yoluna gidilebilmektedir. Bu durumda, eş zamanlı olarak levhaların altından ve üstünden ayrı ayrı karıştırma işlemini yapan iki adet takım kullanılmaktadır (İpekoğlu, 2011).

Bu işlem şematik olarak Şekil 4.10'da gösterilmiş olup takımlar proses sırasında zıt yönde dönerler. Al-alışımlarında tek taraflı olarak 50 mm kalınlığa kadar, çift taraflı olarak ise 100 mm kalınlığa kadar kaynak yapılabilmektedir (Çam, 2011). Şekil 4.11a ve b, çift taraflı olarak kaynakları gerçekleştirilmiş 50 mm ve 75 mm kalınlığındaki 6082-T6 Al-alışımı levhaları göstermektedir (Thomas and Nicholas, 1997; İpekoğlu, 2011).



Şekil 4.10. Kalın levhalarda çift taraflı SKK uygulaması (Çam, 2011)

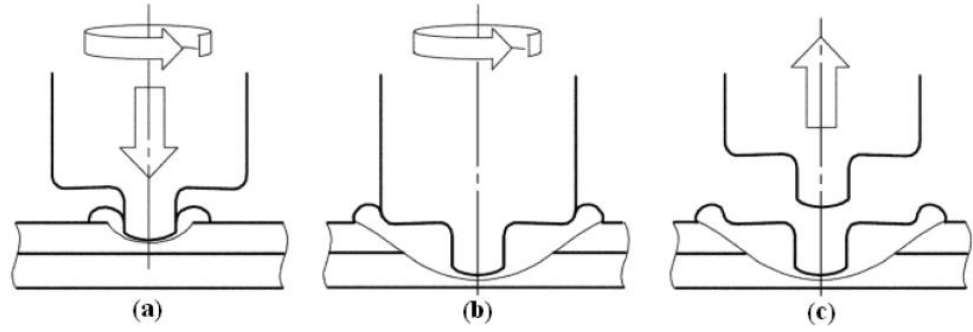


Şekil 4.11. Çift taraflı olarak kaynak edilmiş 6082-T6 Al-alışımı levhalar:

4.5.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK)

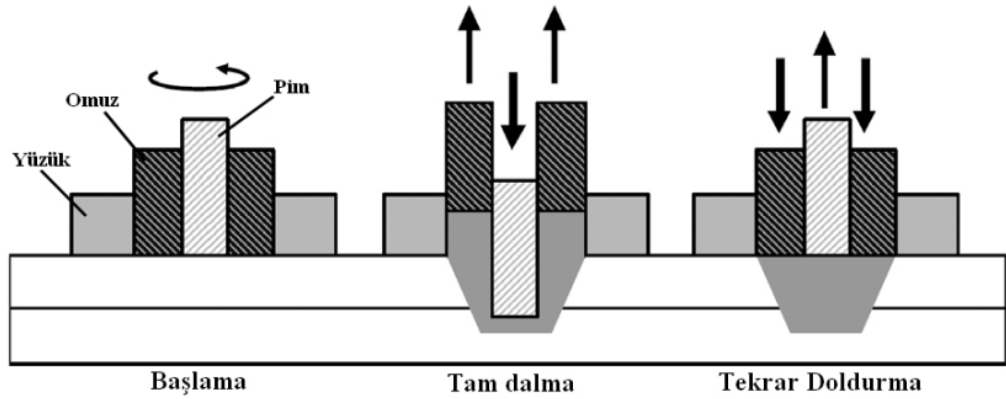
Nokta kaynağı, özellikle otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir kaynak yöntemidir. Araç boyutuna bağlı olmak kaydıyla her bir araç gövdesinde 7000-12000 arasında nokta kaynağı bulunabilir. Direnç nokta kaynağı (DNK), kaynak hızı, kalifiye kaynak elemanı gerektirmemesi, otomasyona uyumluluğu gibi özellikleri sayesinde otomotiv endüstrisinde çelik levhaların birleştirilmesinde yaygın bir kullanılma sahiptir. Ancak otomotiv sektörü enerji tüketimini minimize etme ihtiyacından ötürü hafif malzemelere yönelmektedir. DNK, çelik levhaların kaynağında yaygın bir şekilde kullanılmasına karşın, hafif malzemelere uygulanması; bu malzemelerin yüksek iletkenlikleri, yüksek sıcaklıklardaki düşük mukavemet özellikleri ve kaynak elektrotlarının ömrünü azaltma özelliklerinden ötürü son derece zordur. Kaynak elektrotunun zamanla işlevini yerine getirme özelliğinin azalması, seri üretim sürecinde DNK ile elde edilen kaynak kalitesini düşürmektedir. Bunun yanında, kendinden delmeli perçinler (self-piercing rivets) gibi alternatif nokta birleştirmelerde ise sarf malzemesi tüketiminin fazla olması maliyeti arttırmaktadır. Katı hal kaynak yöntemi olma avantajına sahip olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) ise, Mazda Motor Corp. tarafından uygulanmış ve DNK ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %90 oranında enerji tasarrufu sağladığı ve yatırım maliyetini de %40 düşürdüğü ortaya konmuştur. Firma, Mazda RX-8 spor arabaların kaput ve arka kapılarının üretiminde SKNK'yı tercih etmiştir (Threadgill et al., 2009; İpekoğlu, 2011; Bilici, 2011)

SKNK bir SKK olmakla beraber SSK'dan farklı olarak, birleştirme takım ucun kaynak hattı boyunca lineer hareketi sonucunda değil, üst üste bindirilmiş levhaların bir noktasına dalıp sonra aynı noktadan geri çıkması sonucu elde edilir. SKNK'da, takım bindirme kaynak pozisyonunda olan levhalardan üsttekine daldırılır, bu daldırmadan kaynaklanan ve aşağı doğru oluşan kuvvet, bir örs yardımıyla levhaların alttan desteklenmesi yoluyla karşılanır. Bu yöntemin dezavantajı 2-5 s olan kaynak periyodunun göreceli olarak uzun olmasıdır. Büyük çaplı otomotiv firmaları için bu sürenin 1 s'nin altında olması istenir. Ayrıca bu kaynak yöntemiyle kaynak kesiti tam olarak doldurulamaz ve istenmeyen bir delik kalır. Şekil 4.13 şematik olarak takımın kaynak edilecek parçaların içine dalmasını, kaynak işlemini yapışını ve işlem sonunda parçaların içinden çıkışını göstermektedir (Mishra and Mahoney, 2007; İpekoğlu, 2011).



Şekil 4.13. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı: (a) dalma, (b) birleştirme, (c) çıkma

Kaynak sonunda kalan deliğe bir çözüm olarak Almanya’da bulunan Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) araştırma merkezi tekrar doldurmalı SKNK (refill FSSW) adında bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde takım, klasik SKNK’den farklı olarak yüzük, omuz ve pim olmak üzere üç parçadan oluşur ve parçaların tümü birbirinden bağımsız bir şekilde yukarı aşağı hareket edebilmektedir. Kaynak işlemi Şekil 4.14’de şematik olarak gösterilmiştir (İpekoğlu, 2011).

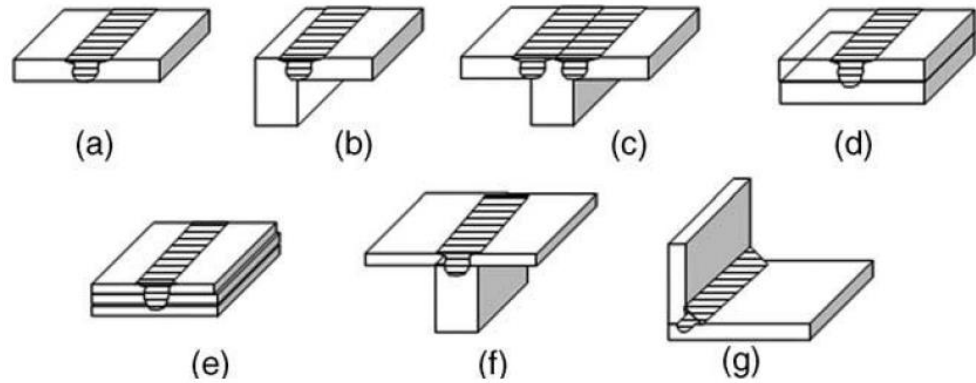


Şekil 4.14. Tekrar doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Mishra and Mahoney, 2007)

Kaynak işlemi sırasında omuz ve pim aynı yönde ve aynı hızda döner. Yüzük ise kaynak prosesi süresince sabit bir şekilde kaynak parçalarını düzgün pozisyonda tutar ve plastik akış içindeki malzemenin de hareket alanını kısıtlar. Pim ve omuz belirlenen devirde dönerken, sürtünme yoluyla levhaları ısıtmak için levha yüzeyine doğru hareket eder. Yeteri kadar ısı açığa çıkarak malzemelerde plastik akış başladığında, pim aşağı doğru hareketini devam ettirmeye başlar omuz ise dışarı taşan malzemeyi aşağı doğru iteceği pozisyona (yukarı) doğru

4.6.1. Küt alın kaynağı

SKK yöntemi için en elverişli birleştirme tarzı, küt alın ve bindirme birleştirmelerdir. (Mishra and Ma, 2005; Threadgill et al., 2009). Şekil 4.16a’da iki düzlemin basit bir küt alın birleştirilmesi gösterilmiştir. Aynı kalınlıktaki iki plaka veya sacın uç uca gelen birleştirme yüzeylerini dağınık kuvvetlerden korumak için bir sabitleme elemanı (destekleme plakası) üzerinde sıkıca bağlanır. Takımın malzemeye ilk batışı esnasında, kuvvetler oldukça büyüktür ve küt alın pozisyonunda iki levhanın ayrılmamasını sağlamak için ekstra bir dikkat gerekmektedir. Omuz çıkıntısı plakaların yüzeyleri ile tam temas ettiğinde, dönmekte olan takım birleşme çizgisi boyunca ilerler. Böylece küt alın kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur. Tam nüfuziyetli küt alın birleştirme elde etmek için, karıştırıcı ucun alt yüzeyi kaynak edilecek iş parçasının alt kısmına yakın olmalıdır.



Şekil 4.16. SKK için birleştirme konfigürasyonları

4.6.2. Bindirme kaynağı

Bindirme kaynağı yapmak için iki tane üst üste gelen levha ya da sac sabitleme elemanı üzerinde bağlanır. Dönen takım, dikey bir şekilde üst levhadan geçerek alt levhaya dalar ve istenilen yön boyunca ilerler. Böylelikle iki levha ya da sac bindirme kaynağı yapılmış olur (Mishra and Mahoney, 2007). Takımın alt yüzeyi üst levhadan geçip alt levhaya ulaşarak iki levha arasında metalik bir

bağlanma elde edilmiş olur. Bindirme birleştirmeli kaynak proses konfigürasyonu Şekil 4.16d) 'de gösterilmiştir.

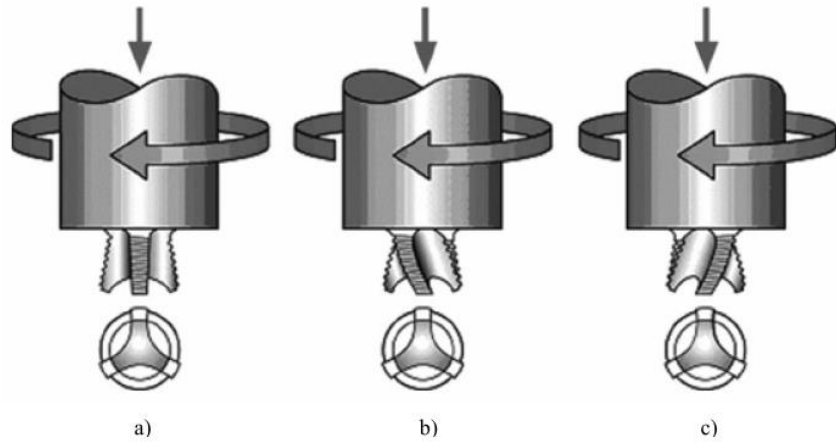
Bindirme kaynağında, geleneksel silindirik vida dişli pim üst levhanın kalınlığını aşmasıyla eğilme özelliklerinde önemli derecede azalmaya sebep olur. Ayrıca kaynağın çentikle karşılaşan kenarındaki aç ve kaynak ara yüzeyinin genişliği, yorulmanın olduğu yerdeki uygulamalar için önemlidir (Mishra and Mahoney, 2007).

Son zamanlarda iki yeni karıştırıcı pim geometrisi; alt kısmı geniş üç oluklu (Şekil 4.17) ve dönen takımın eksenine hafifçe eğimli olan çarpık (eğri) bir karıştırıcı pim (Şekil 4.18) bindirme kaynağının kalitesini ilerletmek için geliştirilmiştir. Bu iki karıştırıcı ucun çizim özellikleri;

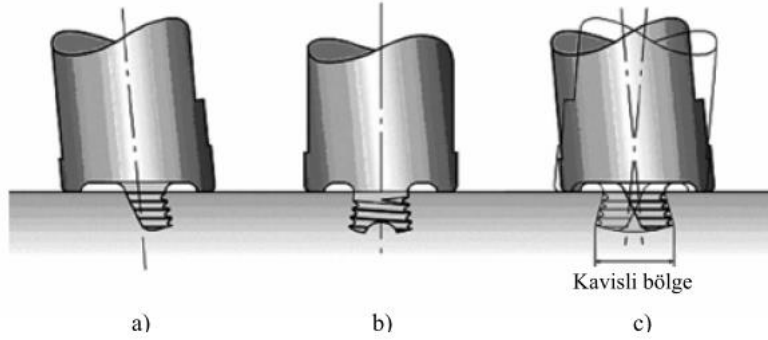
1. Karıştırıcı ucun sabit ve hareketli şekilde kuvvetleri arasındaki oranı arttırdığı,
2. Çarpık karıştırıcı pimde eğri hareket ve alt kısmı geniş üç oluklu karıştırıcı pimde oluk bölgelerinin dışa doğru olmasından dolayı kaynak bölgesini genişlettiği,
3. Kaynak ara yüzeyindeki oksitleri parçalamak ve dağıtmak için gelişmiş karıştırma hareketi sağladığı ve
4. Çarpık hareketten dolayı, kaynağın merkezinde yörüngesel bir dövme hareketi sağladığı varsayılmıştır.

Böylece bu bölgedeki kaynak kalitesi gelişmiş olur. Bu iki karıştırıcı pim geleneksel vida dişli karıştırıcı pim ile karşılaştırıldığında;

1. Kaynak hızında %100'ün üzerinde gelişme,
2. Eksenel kuvvette %20 civarı azalma,
3. Üç oluklu alt kısmı geniş ve çarpık karıştırıcı pimler için levha kalınlığının %190 - 195'i, geleneksel vida dişli karıştırıcı pim için ise %110 kaynak bölgesini önemli bir şekilde genişlettiği ve Üst levha kalınlığında (4 mm den büyük levha için) bir azalma ile sonuçlanmıştır (Thomas and Dolby, 2003).



Şekil 4.17. Alt Kısımlı Geniş Üç Oluklu Takım.
a) Düz Oluklu, b) Sol Tarafa Oluklu, c) Sağ Tarafa Oluklu (Bozkurt, 2008).

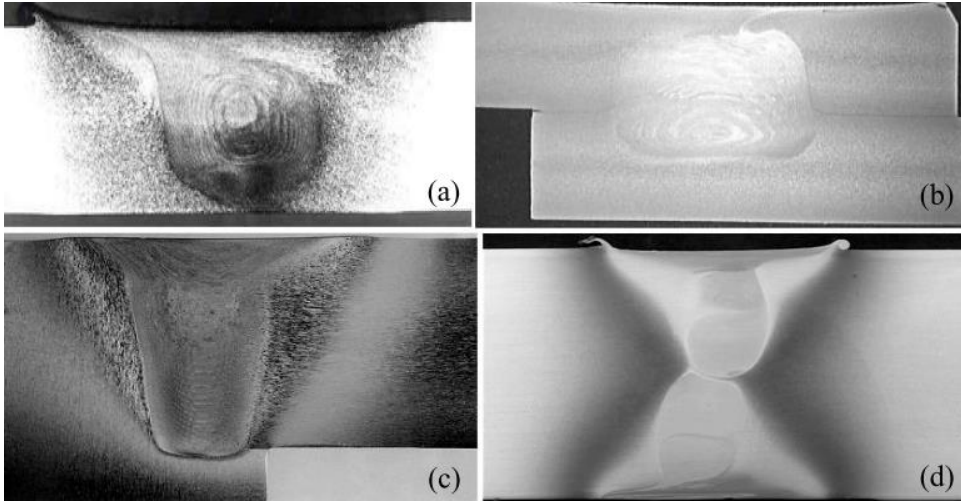


Şekil 4.18. Eğri Takım: a) yandan Görünüş, b) önden Görünüş ve
c) eğri hareketten dolayı etrafı çevrilmiş kavisli bölge

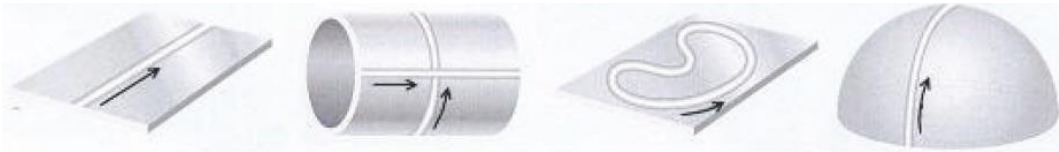
Ayrıca, alt kısmı geniş üç oluklu karıştırıcı pim bindirme kaynak ara yüzeyinde çentikli karıştırma açısı önemli bir şekilde azalır, fakat çarpık (eğri) karıştırıcı pim SKK birleştirmelerinin özelliklerini geliştirmek için yararlı olan bindirme kaynağı ile levha ara yüzeyinin dış bölgelerinde küçük bir düşüş meydana getirir. Thomas and Dolby (2003) kaynak yapılacak eksene dik olan bindirme, T ve aynı türden birleştirme ara yüzeylerinin kaynağı için hem üç oluklu alt kısmı geniş hem de çarpık (eğik) karıştırıcı ucun uygun olduğunu belirtmişlerdir. Diğer birçok kaynak pozisyonu, küt alın ve bindirme kaynaklarının kombinasyonu ile elde edilebilir. Küt alın ve bindirme birleştirmeli konfigürasyonlardan başka, iç köşe birleştirmeleri (Şekil 4.16g) gibi diğer birleştirme pozisyonlarının (Şekil 4.16 b-c-e-f) bazı mühendislik uygulamalarda ihtiyaç duyulduğu zaman yapılması mümkündür (Bozkurt, 2008).

SKK yöntemiyle, Şekil 4.19’da gösterilen, küt alın, farklı kalınlıklardaki levhaların alın, bindirme, dirsek, iç ve dış köşe ile çift taraflı kaynaklarını gerçekleştirmek mümkündür. Ancak, bu birleştirme geometrilerinin her biri için farklı takım tasarımlarının kullanımının yanı sıra yöntemin optimize edilip geliştirilmesi önemlidir.

SKK yöntemi, bir kat -hal birleştirme tekniği olduğundan, kaynak bölgesi yerçekiminden etkilenmemektedir. Dolayısıyla bu yöntem, yatay, dikey, aşağıdan yukarıya gibi kaynak pozisyonlarında rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca, düz levhalarda doğrusal birleştirmeler gerçekleştirilebileceği gibi, çevresel, dairesel, doğrusal olmayan ve üç-boyutlu farklı geometrilere sahip parçaların da birleştirilmesi mümkün olmaktadır (Şekil 4.20) (Barlas, 2009).



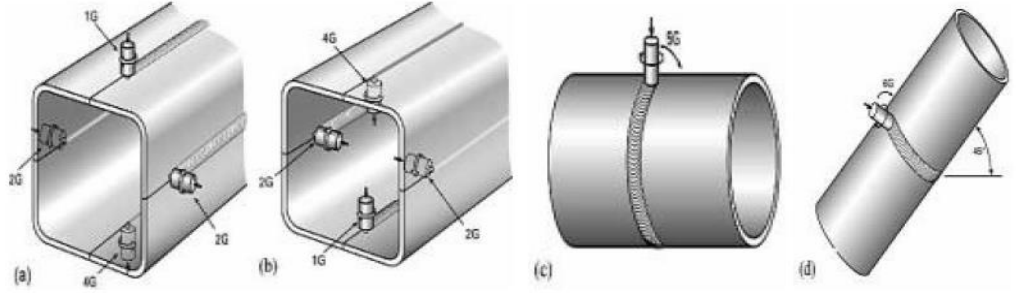
Şekil 4.19. SKK yönteminin uygulanabildiği kaynak geometrileri örnekleri; (a) küt alın birleştirme, (b) bindirme birleştirmesi, (c) köşe birleştirme ve (d) çift taraflı birleştirme (Barlas, 2009).



Şekil 4.20. SKK yöntemiyle birleştirilebilen, farklı geometrilere sahip iş parçası örnekler (Barlas, 2009)

4.6.3. Boru ve profil kaynağı

SKK kaynak yöntemi Şekil 4.21’de gösterilmiş olduğu gibi boru bağlantı kaynaklarında da kullanılabilmektedir (Çam, 2003)



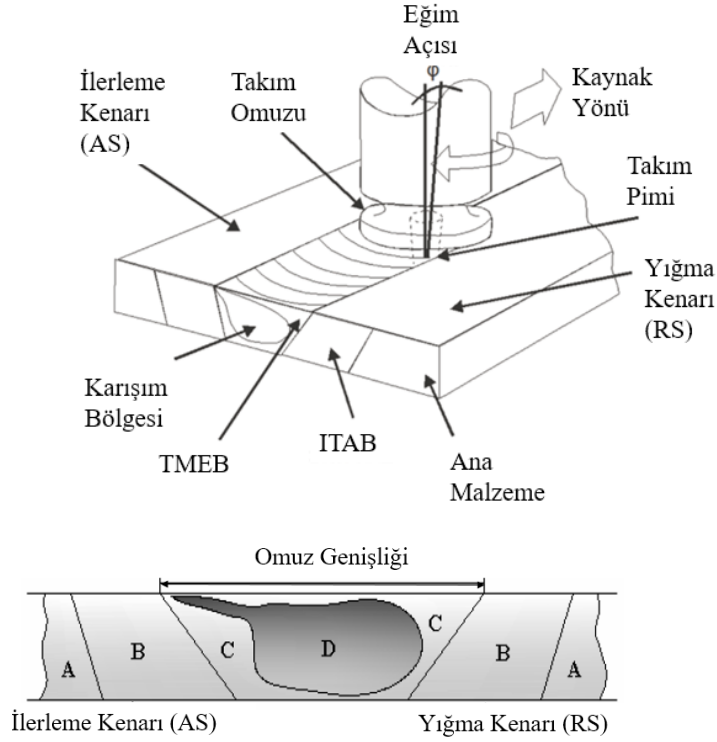
Şekil 4.21. SKK'nın boru kaynaklarında uygulaması (Çam, 2003).

4.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Mikro yapısı

SKK yöntemi esnasında kaynak bölgesindeki yoğun plastik deformasyon ve yüksek sıcaklık, karışım bölgesinde yeniden kristalleşme ve farklı yapıların gelişmesine, karışım bölgesinin etrafında kalan bölgelerde ise yaşlandırma çözülmesi ve kabalaşma neden olur. Tanecik yapısı ve yaşlandırma özelliklerine göre üç farklı bölge oluşur. Bunlar, kaynak metali (kaynak çekirdeği - nugget), termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB, Thermo-mechanically affected zone (TMAZ)) ve ısıdan etkilenmiş bölgedir (ITAB, Heat affected zone - HAZ)) (Şekil 4.22). (Gibson et al., 2013).

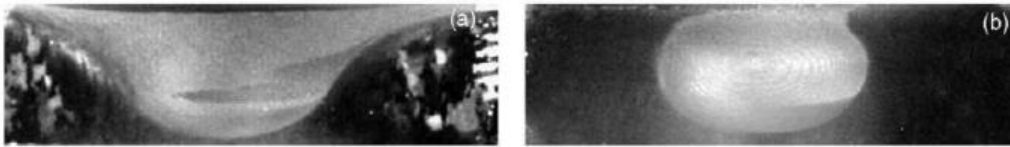
4.7.1. Kaynak metali (Ana metal bölgesi)

Yoğun plastik deformasyon ve sürtünme ısı girişi olduğu bu bölgede yeniden kristalleşmiş ince taneli bir yapı oluşur. Bu bölgeye kaynak çekirdeği veya dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge de denilmektedir. Bu bölge Şekil 4.23’de de görüldüğü üzere soğan halkası şeklinde bir yapı oluşturur ve dislokasyon oranı genelde düşüktür.



Şekil 4.22. SKK'nın makro yapısı; (A) Ana Metal Bölgesi, (B) Isı Etkisi Altında Kalan Bölge (ITAB), (C) Termo Mekanik Olarak Etkilenen Bölge (TMEB), (D) Karışım Bölgesi (Bozkurt, 2008)

Kaynak metalinin şekli yöntem parametreleri, takım geometrisi, iş parçasının sıcaklığı ve materyalin termal iletkenliğine bağlı olarak farklı şekiller oluşmakla birlikte genel olarak ikiye ayrılabilir; üst yüzeye doğru genişleyen kase şekli veya eliptik bir kaynak bölgesi (Şekil 3.19) (Güngör, 2013).



Şekil 4.23. SKK uygulanmış A356 için farklı parametrelerin kaynak metal şekline etkisi (a) 300 d/d, 51 mm/dk, (b) 900 d/d, 203 mm/dk (Standart dişli pim)

SKK yöntemi esnasında kaynak metalindeki dinamik yeniden kristalleşme sebebiyle ince taneli tanecik yapısı oluşur. Tanecik boyutu, SKK parametreleri,

takım geometrisi, iş parçasının bileşimi, iş parçası sıcaklığı, dikey kuvvet ve soğuma hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir

4.7.2. Termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB - TMAZ)

SKK yöntemine özgü, esas metal ile kaynak metali arasında bir geçiş bölgesi oluşur. Bu bölge TMEB (TMAZ) adını alır ve yöntemin uygulanması esnasında hem ısının hem de deformasyonun etkisi söz konusudur. TMEB yüksek bozunuma uğramış yapısı ile karakterize edilir. TMEB plastik deformasyona uğramasına rağmen yetersiz deformasyon gerilmesi nedeniyle genelde yeniden kristalleşme olmaz ve bu bölgede genelde yüksek yoğunlukta kristal yapısında bozulmalar görülür. TMEB’de nadiren yeniden kristalleşme ve uzun tanelerin kıvrıldığı görülür (Mishra and Ma, 2005; Kaluç ve Taban, 2007; Güngör, 2013)

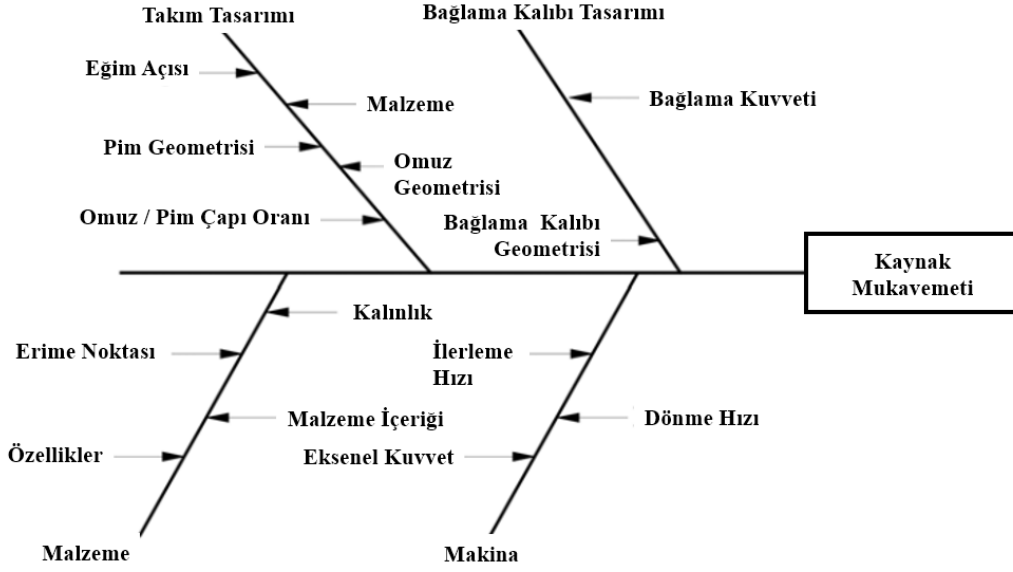
4.7.3. Isıdan etkilenmiş bölge (ITAB - HAZ)

TMEB’nin esas metal tarafında bulunan, plastik deformasyonun görülmediği ve sadece termal çevrime maruz kalan bölgedir. Bazı çalışmalarda ısıtma işlemi uygulanabilen alaşımlar için bu bölge 250°C üzeri sıcaklığa maruz kalan bölge olarak tanımlanmıştır. ITAB tanecik yapısı esas metale benzemekle birlikte 250°C üzeri sıcaklıklarda önemli yaşlandırma etkisi gözlenir (Mishra and Ma, 2005; Kaluç ve Taban, 2007).

4.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Proses Parametreleri

Literatürde bütün SKK teknikleri için malzeme akışını ve ısı girdisini etkileyen yani termoplastiklerin SKK’da kaynak kalitesini belirleyen çeşitli proses ve malzeme değişkenleri bulunmaktadır.

SKK bağlantılarının kalitesine (görüntü ve mukavemet) etki edebilecek SKK proses parametreleri kullanılarak Ishikawa (balık kılçığı, neden - sonuç) diyagramı Şekil 4.24’ de oluşturulmuştur.



Şekil 4.24. SKK proses parametreleri için Ishikawa diyagramı

SKK prosesinde mekanik performans (kaynak mukavemeti, kaynak verimliliği) ağırlıklı olarak takım geometrisi (omuz ve pim çapı profili ve şekli), takım dönme hızı, takım ilerleme hızı (kaynak hızı) pim ve omuz sıcaklığı, dikey yük (eksenel kuvvet), yatay yük, dalma derinliği (penetrasyon), takım eğim açısı (hücum açısı), kaynak boşluğu, plaka kalınlığı değişimi, bağlantı konfigürasyonu gibi proses parametrelerine bağlıdır. (Kumar et al., 2008, Gibson et al., 2013).

SKK’da kullanılan bu parametreler, kaynak bölgesine farklı şekillerde etki etmektedir. Bu kaynak yönteminde birçok parametre olmasına karşın en önemlileri ve kaynak kalitesine en çok etkide bulunanları aşağıda sıralanmış ve Şekil 4.25’de verilmiştir.

Sıralanan bu parametrelerin içinden üç tanesi ön plana çıkar ki onlar da takım devir sayısı, kaynak hızı ve düşey kuvvet veya batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi kontrol edilebilir ve uygun işlem koşulları sağlandığında kaynak süresince değişiklik göstermezler (Malyer, 2010).

Fakat pimin batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. Kaynak işleminde iyi bir nüfuz yet elde etmek için pimin ucunun, kaynak edilecek levhaların arka yüzeyine yaklaşık olarak 0,508 mm mesafede sabit tutulması gerektiği deneysel olarak gösterilmiştir. Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum

sınırlanmakta olup, levha kalınlığındaki artış mümkün olan maksimum kaynak hızını düşürür (İpekoğlu, 2011).

Kaynak makinası olarak geleneksel freze tezgâhları kullanılabilir, ancak amaca hizmet eden düşey kuvvet kontrollü özel tasarım makinalar daha esnek bir kullanıma ve daha istikrarlı sonuçlar alınmasına imkân sağlar. Son yıllarda çeşitli firmalar özel olarak SKK için tasarlanmış ekipmanların üretimine başlamıştır (İpekoğlu, 2011).

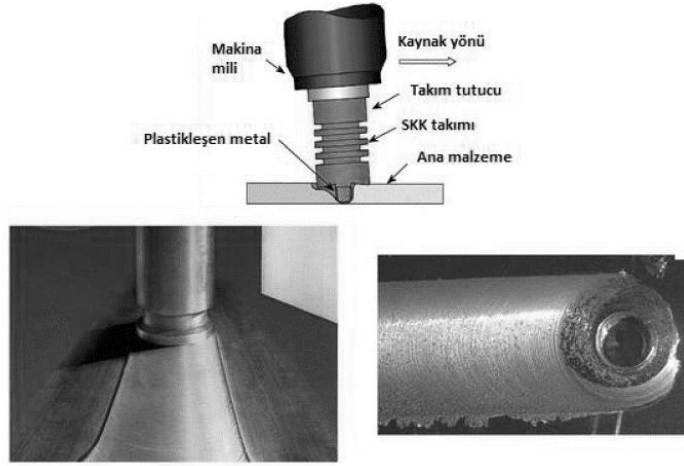
4.9. SKK Parametrelerinin Kaynak Bölgesi Üzerindeki Etkisi

SKK yönteminin kalitesi diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi kaynak değişkenlerine oldukça bağlıdır. Kullanılan takımın geometrisi plastik deformasyon sonucunda malzeme akışını, takımın dönme ve ilerleme hızı ise kaynak bölgesindeki ısı değişimlerini etkileyeceği için ve malzeme kalınlığı ile takımda kullanılan pimin malzemeye dalma derinliği gibi faktörler yöntemin kalitesi açısından oldukça öneme sahiptir.

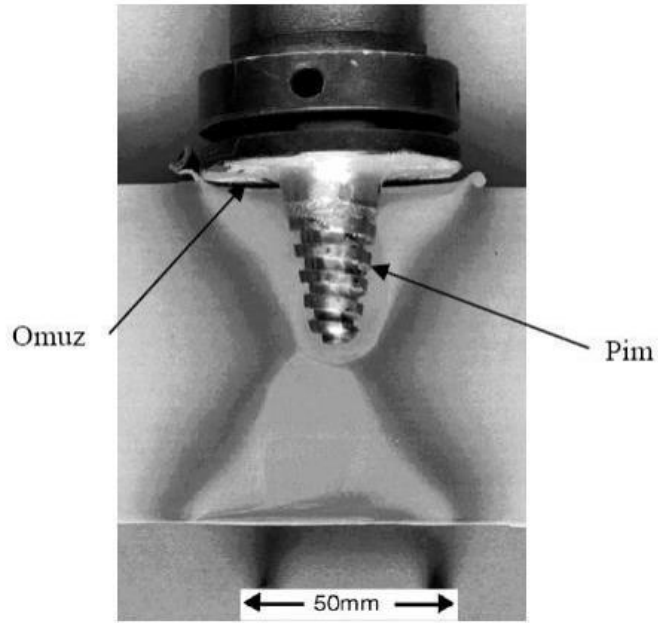
4.9.1. Takım geometrisi

SKK’da kaynak bölgesinin mikro yapısına ve mekanik mukavemetine etki eden en önemli parametrelerden biri, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır. Karıştırıcı takım, omuz ve pim olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır. Karıştırıcı aparatında omuz, SKK için gerekli olan ısı girdisinin bölgesel olarak oluşmasını sağlamaktadır. Karıştırıcı aparat pimi ise, ısı etkisi ile plastikleşen malzemenin kaynak bölgesinde karıştırılmasını ve birleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 4.26). Kaynak tipine ve birleştirilecek olan malzemeye bağlı olarak birçok karıştırıcı aparat geliştirilmiştir. Şekil 4.27’de görülen TWI tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma aparatı, 75 mm kalınlığındaki AA 6082 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesinde kullanılmıştır (Sayer, 2007; Kırıcı, 2012).

Karıştırıcı pim üzerindeki vida yapısının sürtünme karıştırma kaynağına olan etkisi Peel ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada malzeme olarak 3 mm kalınlığındaki AA 5083 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Karıştırıcı takım omuz yapısı sabit tutularak, ince (M5x0,8) ve kaba (M6x1) dişli pimin kaynak mukavemetine etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.26. Kaynak takımının parçaya dalma ve ilerleme mekanizması



Şekil 4.27. Sürtünme karıştırma aparatı (TWI, 2015)

Araştırma sonuçları; düşük kaynak hızlarında ince dişli pim profilinin, yüksek kaynak hızlarında ise kaba dişli pim profilinin kaynaklı bölgenin mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Peel ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma Çizelge 4.1’de gösterilmiştir (Kırcı, 2012).

Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda pim çapı ile omuz çapı arasındaki bağlantı incelendiğinde en iyi mukavemet değerlerinin omuz çapının pim çapından 3 kat büyük olması ile sağlandığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında pim

yapısı ve çap sabit tutularak, omuz bölgesine değişik tiplerde profiller açılıp bağlantıların mukavemet değerleri de incelenmiştir (Şekil 4.28, 4.29, 4.30). Omuz kısmında geliştirilen değişik profiller sayesinde, kaynak sırasında plastik şekil değiştiren malzeme aşağıya doğru itilerek kaynak mukavemeti yükseltilir (Kırcı, 2012).

Çizelge 4.1. SKK prosesinde pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi

Omuz Çapı (mm)	Pim Profili	Kaynak Hızı (mm/dak)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak Mukavemeti (%)
18	M5x0,8	100	304	67
18	M5x0,8	150	216	47
18	M5x0,8	200	186	41
18	M6x1,0	200	259	57



Şekil 4.28. SKK yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları

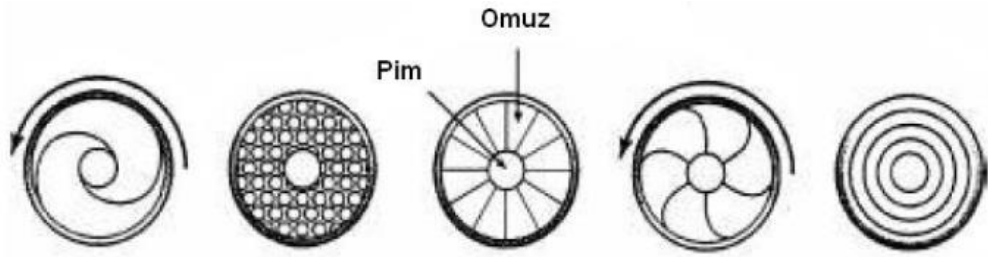
4.9.1.1. Konvansiyonel silindirik pimli SKK takımları

Takım kaynak edilecek malzemenin türüne, kalınlığına bağlı olarak tasarlanır ve özellikle kaynak dikişinin nüfuziyetinin yanı sıra kaynak dikiş genişliğini belirleyici bir geometriye sahiptir. Silindirik pimplere vida dişleri açılarak kaynak esnasında sürtünme ile malzemenin plastik şekil değiştirmesi sağlanarak parçalar kaynak yapılır. Pim dairesel ve kaynak yönünde hareketi ile ön tarafından aldığı malzemeyi yığılma bölgesine taşıyarak kaynak işleminin

devamlılığını sağlar. Omuz kısmı ise uyguladığı basınç ile yumuşamış malzemeyi aşağı yönde iterek düzgün bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlar (Kaluç ve Taban, 2007)



Şekil 4.29. SKK yönteminde kullanılan alıslmış silindirik pimli takımlara örnek
(a) Küresel ağızlı silindirik pimli takım (b) Düz ağızlı silindirik pimli takım
(Mishra and Ma, 2005)



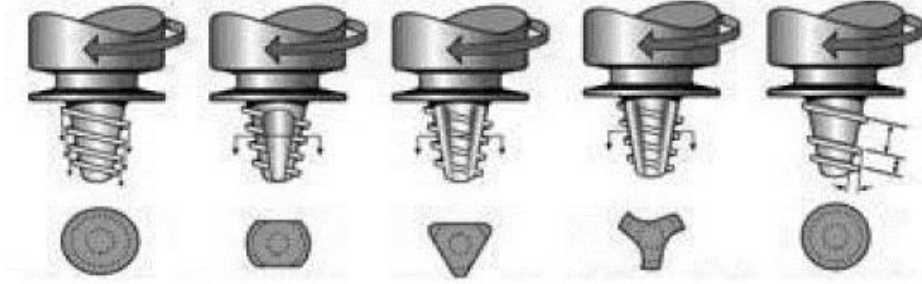
Şekil 4.30. SKK yönteminde takımlarda kullanılan omuz profillerine örnekler
(Mishra and Ma, 2005)

SKK uygulamalarında alıslmış vidalı pim bulunan ve omuzda kanal açılmamış takımların kullanımı durumunda takım parçaya girerken düşeyle 1 ile 3° arasında açı verilip eğilerek parçaya daldırılması ile ilerletilmesi esas alınır. Omuzun kanallı olması durumunda ise takımın eğilmeden tam dik konumda kullanımına olanak sağlanmıştır (Kırcı, 2012).

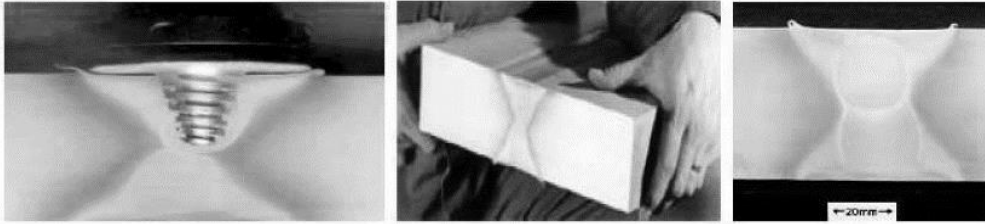
4.9.1.2. Whorl™ serisi SKK takımları

1.5 ve 12 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların kaynağında ucunda vidalı pim bulunan alıslmış takımlarla iyi sonuçlar alınmasına karşın, malzeme

kalınlığı arttıkça daha fazla ısıya gerek duyulmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar TWI’de Whorl™ serisi takımları geliştirmiştir. (Şekil 4.31, 4.32)



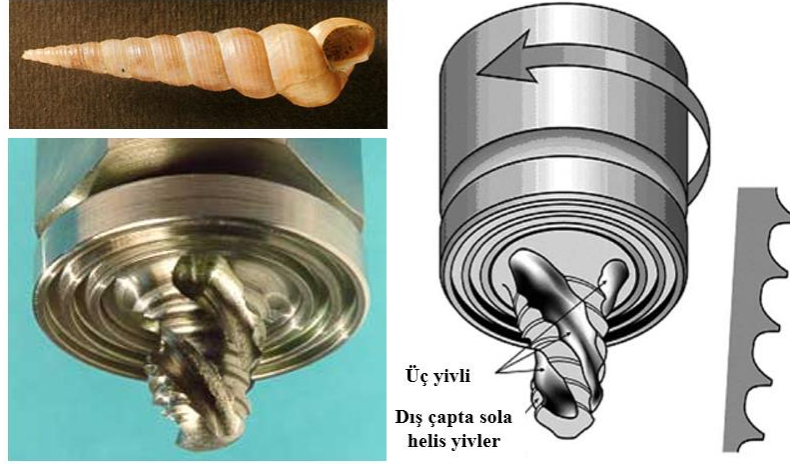
Şekil 4.31. Çeşitli pim profillerinden üretilen Whorl™ takımlar



Şekil 4.32. 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımı kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü

4.9.1.3. MX-triflute™ ve flared-triflute™ serisi SKK takımlar

Yapılan araştırmalar sonucunda bu tür takımların aynı çaptaki alışılmış vida profilli silindirik bir takıma göre daha fazla malzemeyi yer değiştirdiği belirtilmiştir. Whorl™ türü takımda yer değiştiren malzeme hacmi %60, MX-Triflute™ takımında ise %70 oranında artmaktadır. Bu durumda bu tür takımların basma kuvvetini azalttığına, malzeme hareketini kolaylaştırdığına, ayrıca pim ve pratikleşerek yumuşamış malzeme ara yüzeyinde ısı oluşumunu arttırdığı belirtilmektedir. (Şekil 4.33, 4.34, 4.35)



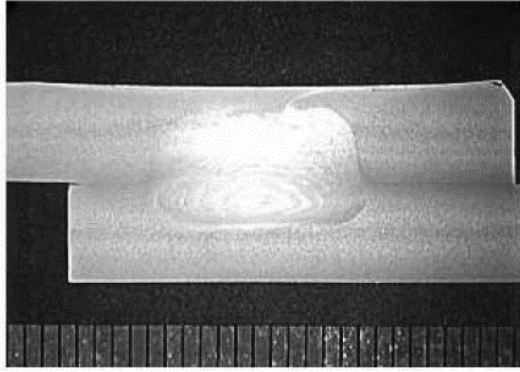
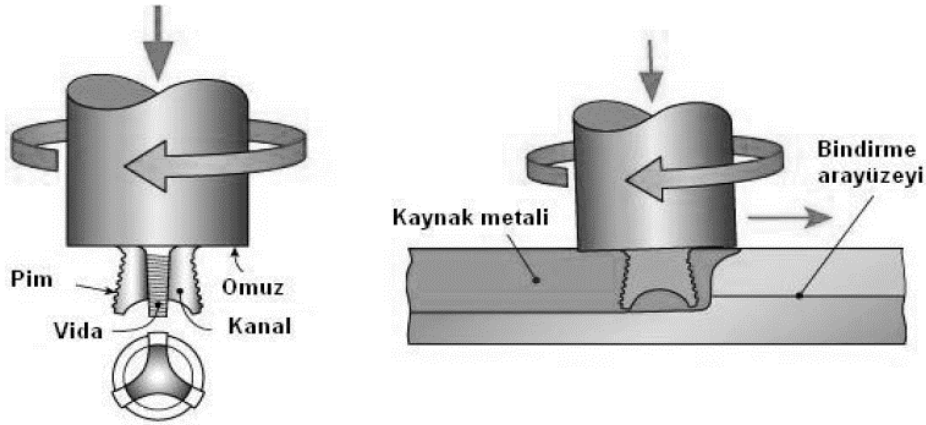
Şekil 4.33. MX-Triflute™ piminin esin kaynağı deniz kabuklarıdır

Bu tür takımların geliştirilmesi aşağıdaki avantajları getirmiştir;

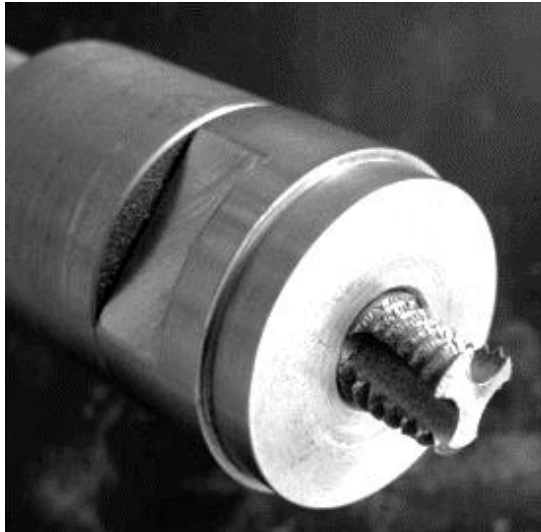
- Kaynak kuvvetinin azalması,
- Plastik hale gelen malzeme akışının kolaylaşması,
- Aşağıya doğru delme işinin kolaylaşması,
- Takım ile yumuşamış duruma gelen malzeme arasındaki ara yüzeyin artması.

4.9.1.4. Makara veya bobin biçimli SKK takımlar

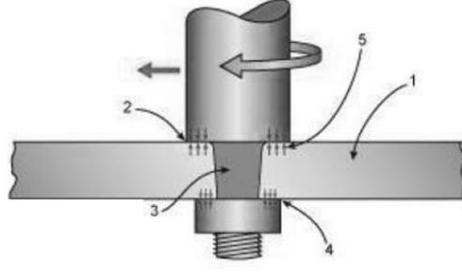
SKK yönteminde üstten parçaya bastırılan takımın plastikleşmiş malzemeyi aşağıya doğru, birleştirmenin kök kısmına sıkıştırmasından dolayı, kökün düzgün biçimlenmesi için kullanılan altlık levhaların gerekli reaksiyon kuvvetini sağlayamamaları durumunda yöntemin esnek uygulamasını sınırlar. Bu nedenle altlık kullanımını ortadan kaldıracak olan özel bir takım geliştirilmiş ve bobin veya makara görünümüne benzediği için bu ad verilmiştir. (Şekil. 4.36) (Kırcı, 2012).



Şekil 4.34. Flared-Triflute™ takım kullanılarak bindirme kaynağının gerçekleştirilmesi ve oluşan kaynak dikiş kesiti



Şekil 4.35. TWI tarafından geliştirilen Flared-Triflute™ takımı (TWI, 2015)



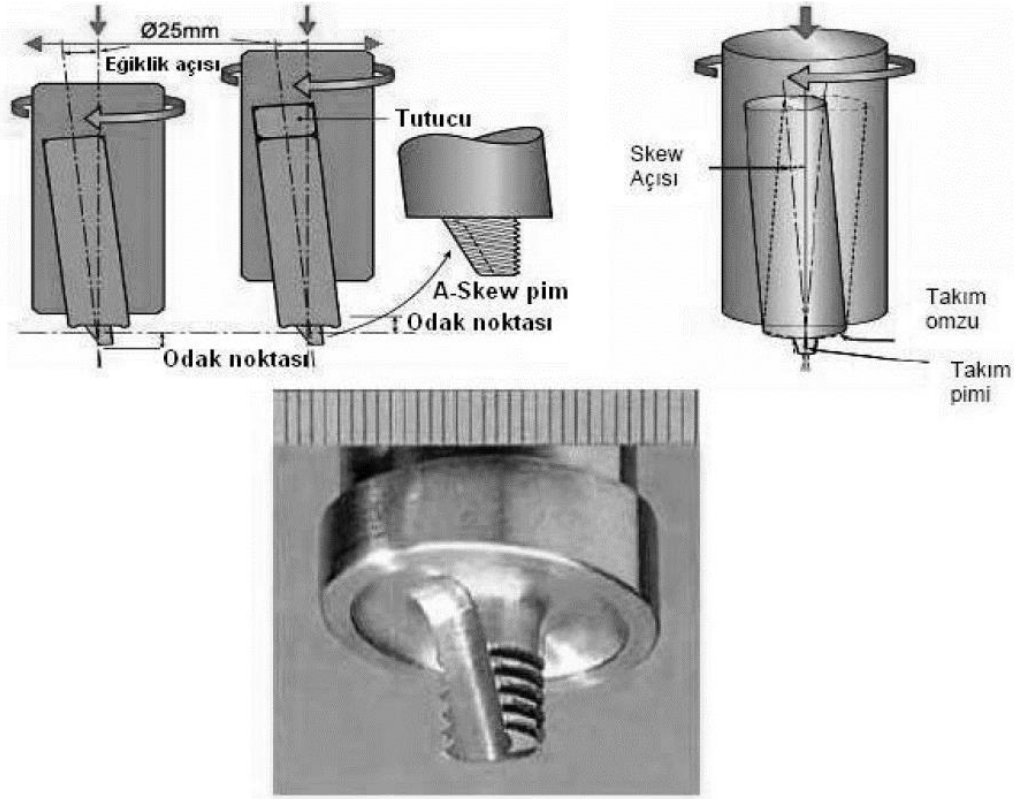
Şekil 4.36. Kaynak işleminde kullanılan bobin takımı
(1) iş parçası, (2) üst omuz, (3) prob-pim, (4) alt omuz (5) tepki kuvveti

4.9.1.5. Skew-Stir™ serisi SKK takımları

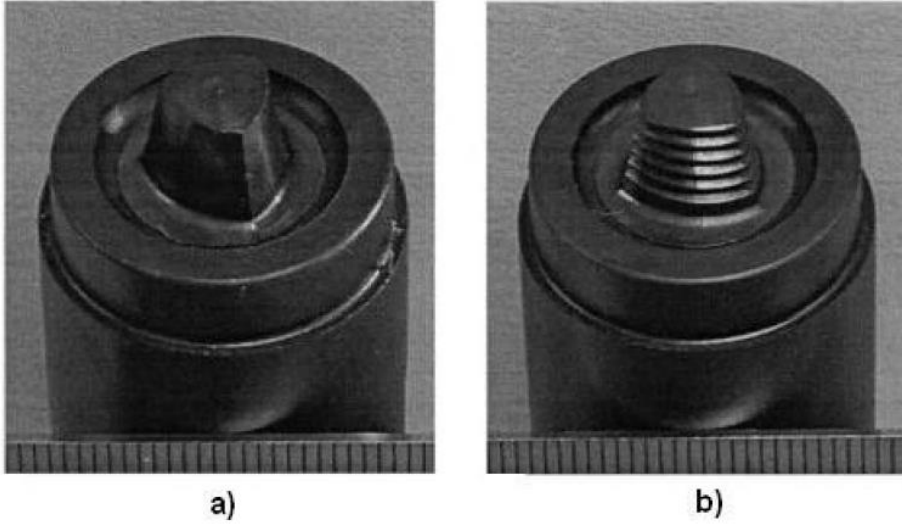
SKK için geliştirilen Skew-Stir™ biçimli pimlerin Şekil 4.37’de gösterildiği gibi makina miline biraz eğik olarak montajı yapılır, uygulama geleneksel yöntemden farklıdır. Şekil 4.37’de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenleriyle belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır (Çam, 2003, Kırıcı, 2012).

4.9.1.6. Trivex™ serisi SKK takımlar

TWI tarafından yapılan araştırmalar neticesinde Triflute™ ve MX-Triflute™ türü takımlarda karşılaşılan yanıl kuvvet zorlanmalarının azaltılması amaçlanarak Trivex™, MX-Trivex™ (Şekil 4.38) türü takımlar geliştirilmiştir. Bu takımlar ile yapılan bağlantıların mukavemet değerleri incelendiğinde Triflute™ ve MX-Triflute™ serisi takımlar ile karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir (Kaluç ve Taban, 2007; Kırıcı, 2012).



Şekil 4.37. Skew-Stir™ takımının çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir™ takımının görünüşü



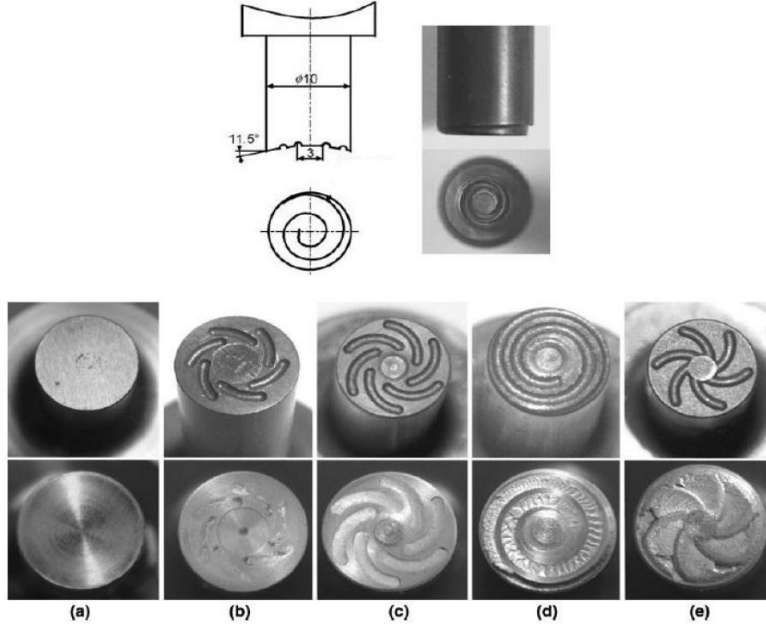
Şekil 4.38. a) Trivex™, b) MX-Trivex™ türü SKK takımlar

4.9.1.7. Pimsiz SKK takımlar

Otomotiv endüstrisinde yakıt tüketiminin azaltılması isteği üreticileri hafif metalleri daha fazla kullanmaları konusunda teşvik etmiştir. SKNK direnç nokta kaynağına nazaran sağladığı enerji verimliliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde gelecekte kullanımı açısından yüksek potansiyele sahiptir. Günümüzde Mazda firması araçlarının üretiminde SKNK yöntemini kullanarak direnç nokta kaynağına göre %90 enerji tasarrufu ve %40 yatırım maliyetlerinde azalma sağlamıştır.

Pimli sürtünme karıştırma nokta kaynağında, belli bir devirde dönen pimli takım bindirme pozisyonundaki levhalara alt levhaya temas edecek şekilde dalarak üstten uygulanan basınç kuvveti ile bağlantıyı gerçekleştirir. Sürtünme sonucu oluşan ısı ve pim sayesinde malzeme plastik şekil değiştirerek kaynak işlemi tamamlanır. Fakat yöntemin dezavantajı direnç nokta kaynağına göre çevrim zamanının fazlalığıdır.

Pimli sürtünme karıştırma nokta kaynağında, belli bir devirde dönen pimli takım bindirme pozisyonundaki levhalara alt levhaya temas edecek şekilde dalarak üstten uygulanan basınç kuvveti ile bağlantıyı gerçekleştirir. Sürtünme sonucu oluşan ısı ve pim sayesinde malzeme plastik şekil değiştirerek kaynak işlemi tamamlanır. Fakat yöntemin dezavantajı direnç nokta kaynağına göre çevrim zamanının fazlalığıdır. Yapılan araştırmalar sonucu sürtünme karıştırma nokta kaynağında en iyi mukavemet değerlerinin pimin dalma derinliği olarak üst levha kalınlığına ek olarak alt levha kalınlığının %25' ine kadar derinliğe inilerek sağlandığı görülmüştür. Son yapılan çalışmalar sonucunda 1 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların bindirme pozisyonunda pimsiz takım (omuz bölgesine görüntü açılmış) kullanarak kaynak edilebildiği kanıtlanmıştır. 1 mm kalınlığındaki 6111-T4 alüminyum malzemesi farklı omuz profilini sahip pimsiz takımlar ile 0.2 mm dalma derinliğinde kaynak edilmiştir. Omuz çapı olarak 10 mm seçilirken takımın dalma hızı 2,5 mm/s, takım dönme hızı 2000 d/d olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda pimsiz takımlı SKK yönteminin SKNK yöntemine göre çevrim zamanının kısaltılması ve sağladığı mukavemet değerleri yönünden üstünlüğü kanıtlanmıştır. Ayrıca pim kullanılmaması nedeniyle pimli takımlarda karşılaşılan yanal kuvvet azaltılmış ve kaynak sonunda oluşan anahtar deliği gibi görsel hatalar ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.39'da farklı geometrilerdeki pimsiz takımlar görülmektedir (Kırcı, 2012).



Şekil 4.39. (a) Profiliz düz takım, (b) kısa yivli takım, (c) uzun yivli takım, (d) dairesel yivli takım, (e) geniş açılı dairesel yivli takım

Çizelge 4.2’de yukarıda değinilen çoğu TWI tarafından tasarlanmış çeşitli takım tipleri, özellikleri ve kullanım yerleri özet olarak verilmiştir (Nandan et al., 2008; Barlas, 2009)

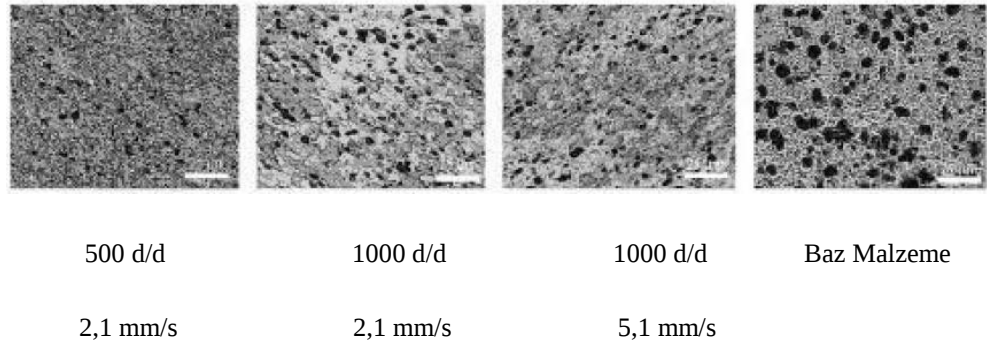
Çizelge 4.2. TWI tarafından tasarlanmış bazı takımlar ve özellikleri

	Takım Tasarımı					
	Silindirik	Whorl™	MX Triflute™	Flared Triflute™	A-Skew™	Re-Stir™
Karıştırıcı uç şeklinin özellikleri	Diş açılmış, silindirik	Diş açılmış, konik	Diş açılmış, konik, üç kanallı	Diş açılmış, üç kanallı, alt kısmı geniş	Diş açılmış, silindirik, çarpık	Diş açılmış, konik
Karıştırıcı uç hacminin, silindirik uç hacmine oranı	1	0,4	0,3	0,3	1	0,4
Döndürdüğü alan hacminin uç hacmine oranı	1,1	1,8	2,6	2,6	Karıştırıcı uç açısına bağlı	1,8
Terse dönebilme	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet
Uygulama	Alın kaynağı	Alın kaynağı	Alın kaynağı	Bindirme kaynağı	Bindirme kaynağı	Minimum asimetriye sahip kaynak bölgesi için

4.9.2. Kaynak hızı, takımın dönme hızı ve takım açısı

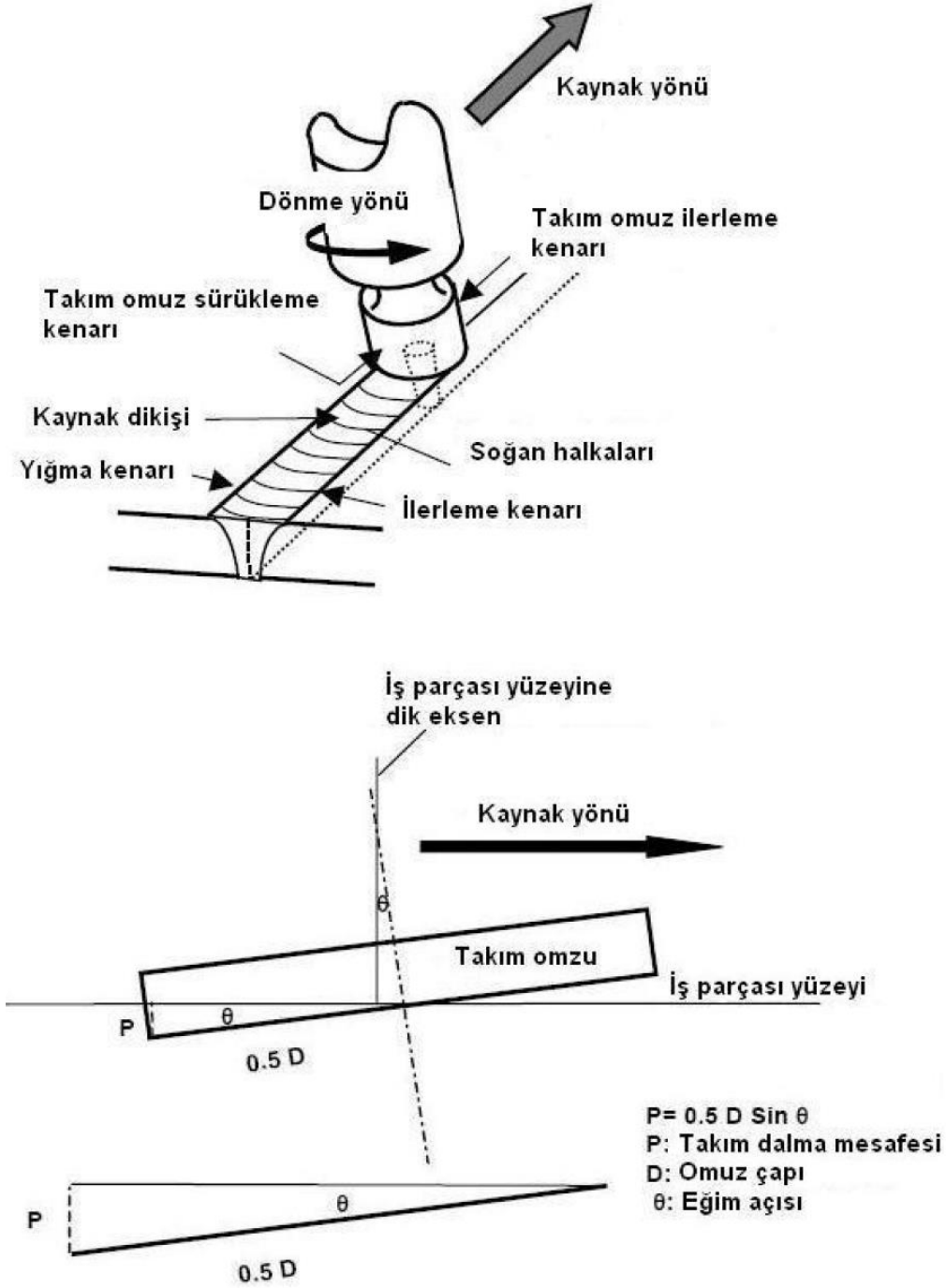
Yapılan deneysel çalışmalarda üçgen ve kare profilli takımlar ile AW-5005 serisi alüminyum alaşımını SKK yöntemiyle kaynak yaparken aynı zamanda pimsiz takım kullanılarak da kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Pimsiz takımla yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemet değerleri üçgen ve kare profilli takımlara nazaran düşükken pimsiz takımlı bağlantıların yorulma mukavemeti diğer profilli takımlara göre daha yüksektir.

Bu yöntemde uygulanacak olan kaynak hızı ve takımın dönme hızı kaynak edilecek malzemenin alaşım türüne ve kalınlığına oldukça bağlıdır. SKK’da, karıştırıcı ucun dönme ve ilerleme hızı kaynak bölgesindeki mikro yapının oluşumunda oldukça etkilidir. Karıştırıcı ucun dönme hızı arttıkça sürtünme artacağından kaynak bölgesindeki ısı girdisi de artacaktır. Aşırı ısı girdisi, birleştirme bölgesinde tane yapısının büyümesine neden olmakta ve kaynak mukavemetini olumsuz olarak etkilemektedir. SKK ile birleştirilecek olan her malzemede maksimum kaynak mukavemeti ve süreç verimini sağlamak için süreç parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.40. Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı

Şekil 4.40’da görüleceği üzere aynı kaynak hızlarında devir sayısının artırılması malzemedeki tane yapısının büyümesine, aynı devir hızlarında ise kaynak hızının artırılarak malzemeye ısı girdisinin düşürülmesi tane boyutunun küçülmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.41. SKK yönteminin şematik gösterimi ve takım açısının değişimi ile takımın dalma derinliği arasındaki ilişki (Khaled, 2005)

Ayrıca Şekil 4.41’de görüleceği üzere takıma verilen eğim açısı, takım omzunun malzemeye dalma derinliğini ve takım omzunun kaynak metali ile temas omzunun kaynak malzemesine dalma derinliğini arttırırken, pimin dalma derinliği ve pimin kaynak bölgesindeki nüfuziyetini azaltacaktır.

4.10. SKK Birleştirmelerinin Mekanik Özellikleri ve Kaynak Verimliliği

SKK ile birleştirilen alaşımların çekme mukavemetinin kaynaksız malzeme çekme mukavemetine olan oranına kaynak verimi denilmektedir. Kaynak verimi yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarında %95-119 olurken yaşlanan alaşımlarda bu oran %65-96 arasında kalmaktadır. Alüminyum alaşımların ergitmeli tungsten inert gaz (TIG) ve metal inert gaz (MIG) kaynak birleştirmelerinde daha düşük kaynak verimleri elde edilmektedir. Yaşlanan alaşımlarda ITAB da meydana gelen çökelme partiküllerinin kabalaşması ve çözülmesine bağlı olarak SKK kaynak birleştirme verimi düşmektedir. Kaynak sonrası yapılan suni yaşlandırma işlemleri 7075-T651 alaşımının kaynak çekme mukavemetini değiştirmezken, 6063-T5 alaşımının kaynak çekme mukavemetini arttırmıştır (Bilici, 2011).

4.11. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Uygulama Alanları

SKK tekniği 1991’de keşfinden 1995’te endüstriye uygulaması çok kısa zaman alan SKK tekniği, daha önce belirtilen enerji ve ekonomik üstünlükleri, çevresel üstünlükler ve metalürjik üstünlükleri ile diğer yöntemlerin önüne geçmesine rağmen, yöntemin dünyada ve ülkemizde yaygınlaşmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Bunlar;

- Endüstriyel standartların ve şartnamelerin yetersiz oluşu,
- Kabul edilmiş tasarım yeterlilik ve rehberlerinin azlığı,
- İşgücündeki eğitim eksikliği,
- İlk yatırım maliyetinin yüksek oluşu,
- Lisans alma gereksinimi olması ve bu bedelin yüksekliği,
- Endüstriyel çevrelerde dahi tam olarak anlaşılmamış bu yöntemin müşteriler tarafından benimsenmesinde yaşanabilecek güçlükler

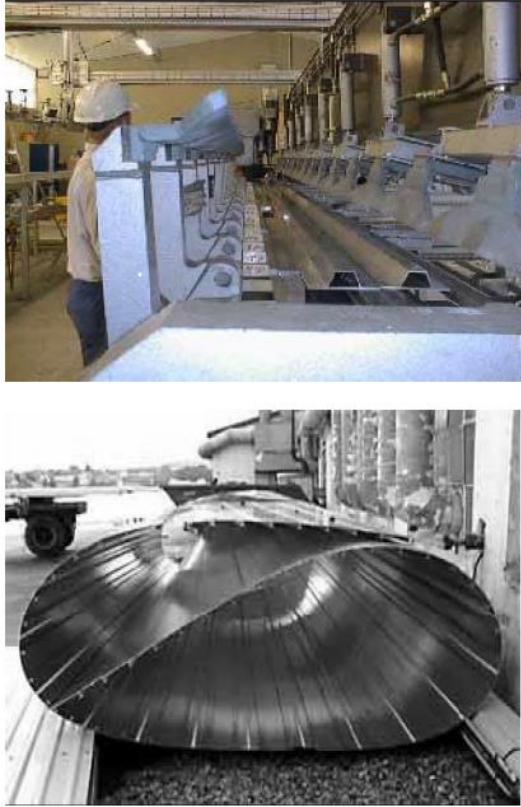
olarak sıralanabilir. (Lohwasser and Chen, 2010; Mishra and Mahoney; 2007)

SKK, belirtilen zorluklarının yanında ilk bulunduğu yıllardan itibaren özellikle alüminyum ve alaşımlarının levha, ekstrüzyon ürünleri ve döküm alüminyum parçaların yaygın olarak kullanıldığı endüstri alanlarında kullanıma

girmiştir. Bu endüstriyel alanlar havacılık ve uzay, gemi yapımı, otomotiv sektörü, raylı taşıt yapımı, zırh uygulamaları, petrokimya, kimya ve nükleer enerji sektörleridir (Kaluç ve Taban, 2007; Güngör, 2013)

4.11.1.Gemi inşa endüstrisi

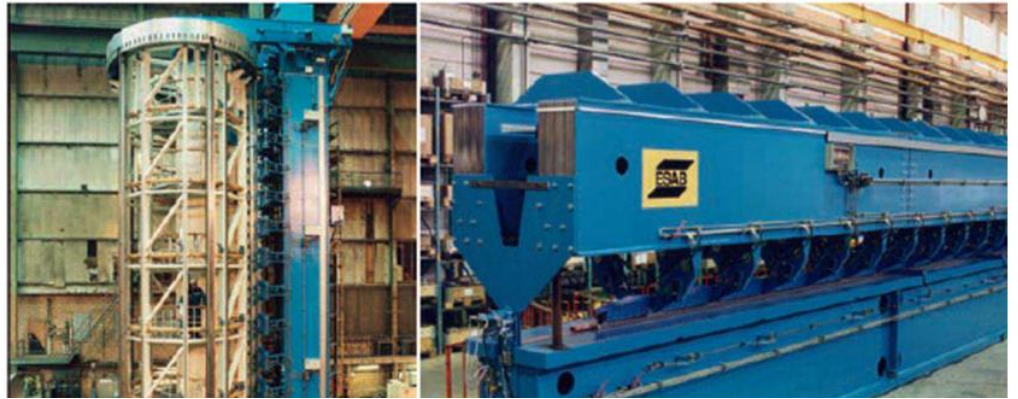
SKK'nın en büyük üstünlüklerinden olan çarpılma oluşmayan güvenilir uzun ve doğrusal kaynakların yapılabilmesi ilk endüstriyel uygulamaların, 1995'te Norveç ve İsveç'te gemi yapım endüstrisinde olmasını sağlamıştır. Yüksek korozyon dayanımı ve mukavemet değerleri nedeniyle bu sektörde yoğun olarak kullanılan 5XXX ve 6XXX alüminyum alaşımlarının yanında ergitme kaynak yöntemleriyle kaynağı zor olan 2XXX, 7XXX ve 8XXX alaşımlarının da kaynağı çelikten daha mukavemetli alüminyumların alaşımların kullanımını kolaylaştırmıştır (Şekil 4.42).



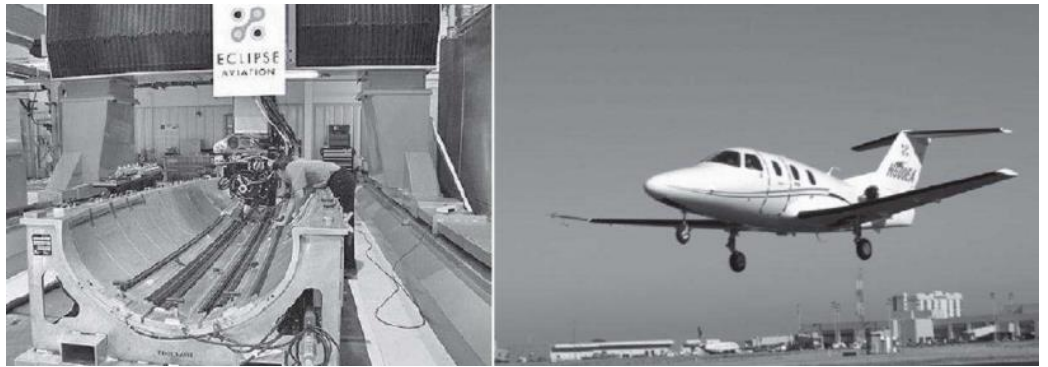
Şekil 4.42.Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin SKK ile birleştirilmesi

4.11.2.Uzay - havacılık endüstrisi

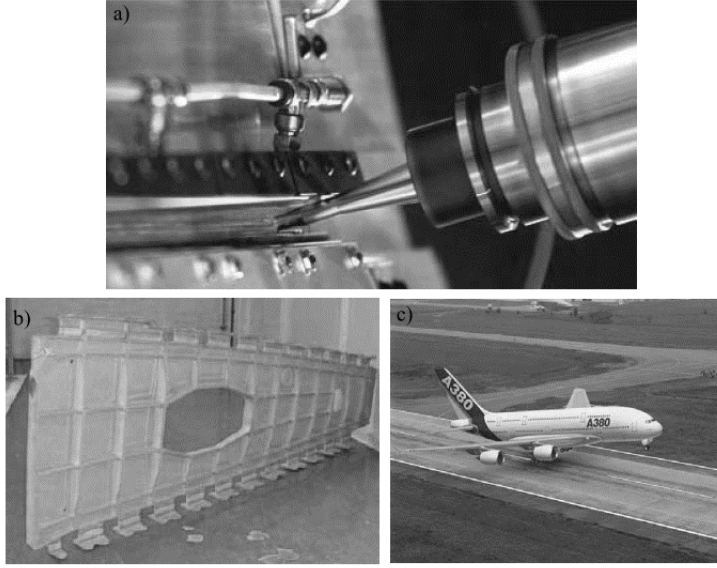
Boeing firması Delta Ihiver IV programı kapsamında roket yakıt tanklarının imali için bu yöntemi uygulamış ve SKK yönteminin sanayide kullanımının önünü açan önemli yapı taşı olmuştur (Şekil 4.43). Sivil havacılık sektöründe perçinleri ortadan kaldırmanın yanında bindirme bağlantı uygulamasını da kaldırmıştır. Yüksek mukavemet ve düşük ağırlıktaki daha önce kaynatılamayan Al-Li (AA2195) alaşımların kaynak edilmesi sağlanmıştır. Düşük ağırlık, daha düşük yakıt tüketimi anlamına geldiğinden hem üretim hem kullanımda önemli kazançlar sağlanmıştır. Elipse 500 türü özel jet uçakları sivil havacılık uygulamasının önemli bir örneğidir (Şekil 4.44). SKK Airbus A340-600 ile Elipse 500 uçak modellerinde kanat kaburga birleştirmelerinde ve yakıt tanklarının birleştirmelerinde uygulanmaktadır (Şekil 4.45).



Şekil 4.43. Boeing firmasında roket yakıt tankı imalatı



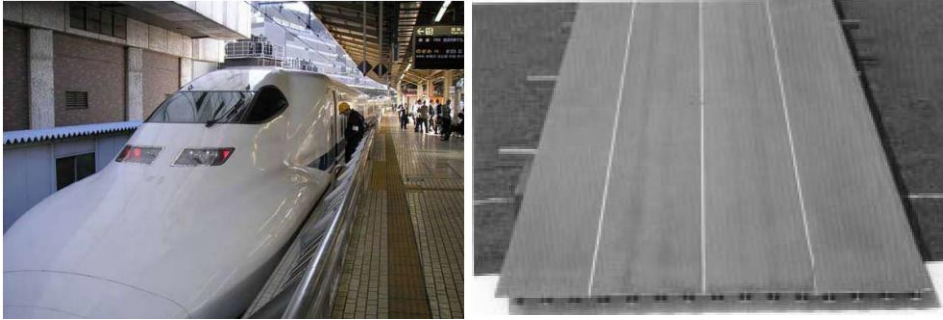
Şekil 4.44. Eclipse 500 özel jetlerin üretiminde SKK uygulamaları (Lohwasser and Chen, 2010)



Şekil 4.45. SKK ile imal edilen Airbus A340-600 modellerinde kanat kaburgaları;
(a) Kanadın SKK Prosesi Esnası, (b) SKK yapılmış kanat, (c) A380 uçak modeli (Bozkurt, 2008)

4.11.3. Demiryolu endüstrisi

Almanya’da 1998, İngiltere’de 1999 yılında meydana gelen hızlı tren kazalarının bilirkşi raporunda; yüksek mukavemetli alüminyum alaşımların ergitme kaynağı kullanılarak üretilen enine kaynaklı panellerin kaynak bölgelerinde, özellikle ısıdan etkilenmiş bölgede mukavemet kaybı oluşturduğu, bunun da çarpışma esnasında katlanmaya neden olduğu ve bunun emniyet sorunu oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu olaylar neticesinde ergitme oluşturmaksızın birleştirme sağlayan yeni bir yöntem uygulanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Şekil 4.46’da Japonya’da SKK Kullanılan hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan alüminyum paneller görülmektedir.

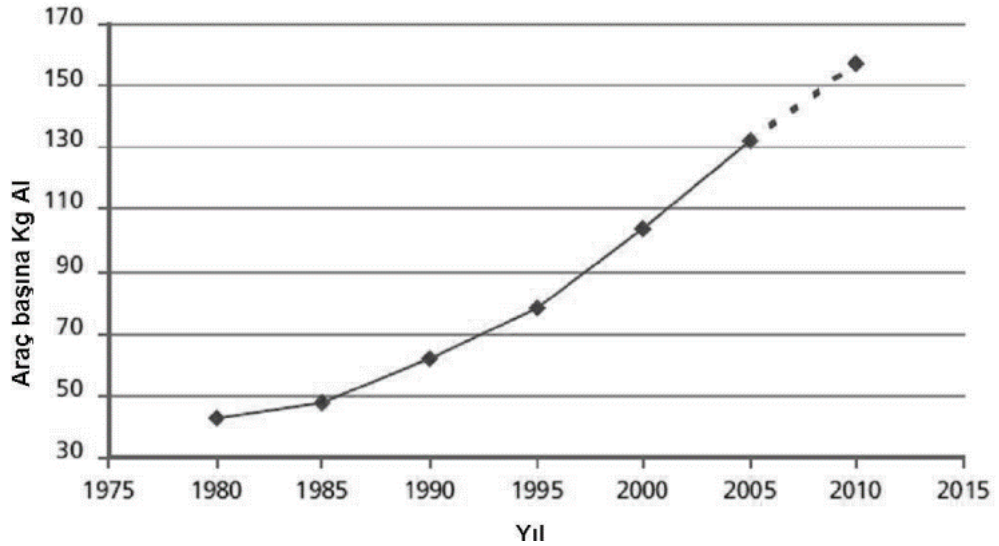


Şekil 4.46. Japonya’da SKK’nın kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan alüminyum paneller (Çam, 2005)

4.11.4.Otomotiv endüstrisi

Yakıt ekonomisi ve CO₂ salınımının önem kazandığı çağımızda alüminyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisinde kullanımı bu sorun için önemli bir çözüm olmuştur. Otomobildeki 100 kg'lık ağırlık kazancı sayesinde 100 km'de 0.35 lt yakıt tasarrufu sağlanırken, km'de 9 gram CO₂ salınımında azalma sağlanmıştır. Ağırlıktaki azalma aynı zamanda hızlanma, fren yapma, sürüş konforu ve araç kontrolünde iyileşmeler sağlamaktadır

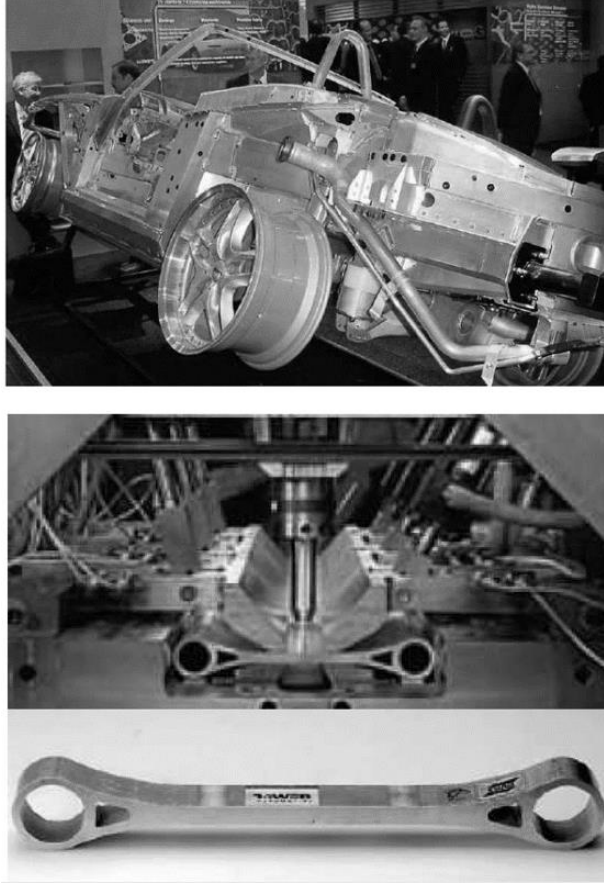
Alüminyumun yoğunluğu çeliğin üçte biri kadar olmasına karşın araçlardaki güvenlik seviyesinde azalma olmaması için çeliğin yerine kullanılacak alüminyumun kalınlığı çeliğin kalınlığının 1,5 katı olmalıdır. Bu da toplamda %50 oranında ağırlık azalması sağlamaktadır. Sağladığı bu yenilikler sayesinde alüminyumun otomobillerde kullanımı artarak devam etmektedir (Şekil 4.47) (Güngör, 2013).



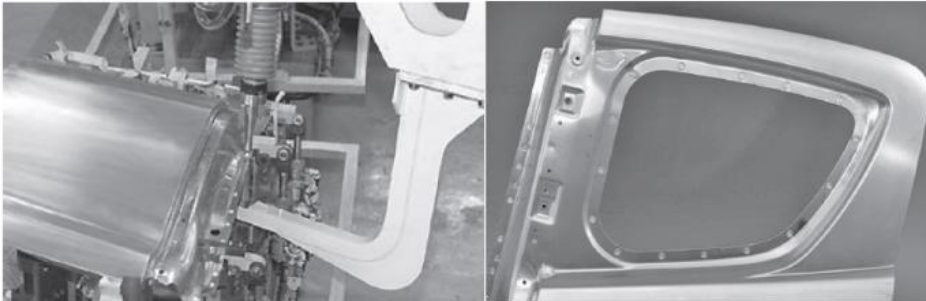
Şekil 4.47. Avrupa araçlarındaki alüminyumun yıllara göre kullanım miktarları

SKK ve SKNK yöntemlerinin özellikle alüminyum ve alaşımlarındaki uygulamasının geliştirilmesi, SKK ve SKNK'nın üstün özelliklerinin bu endüstride kullanımını arttırmıştır. SAPA firmasıncı 2002 yılında alüminyum fuarında sergilenen ABD otomotiv sektöründe kullanılan ilk SKK uygulanmış

parça ve otomobil gövdesi Şekil 4.48’de görülmektedir. Şekil 4.49’da ise robotik SKNK uygulanan Mazda R8X arka kapısı ve dış panel görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.50’de SKK yöntemi ile Norveç’te üretilmiş otomobil jantı görülmektedir.



Şekil 4.48. ABD’nde SKK uygulaması ile üretilmiş ilk parça:
Lincoln Town Car limuzinlerinin süspansiyon bağlantıları



Şekil 4.49. Robotik SKNK uygulanan Mazda R8X arka kapısı ve dış panel görüntüsü
(Lohwasser ve Chen, 2010)



Şekil 4.50. SKK yöntemi ile Norveç’ te üretilmiş otomobil jantı (Kaluç ve Taban, 2007)

4.11.5.Nükleer enerji sektörü

İsveç nükleer yakıt ve atık yönetim kurumu tarafından korozyona dayanıklı bakır dış yüzey ve yüksek mukavemetli çelik iç yüzeyden oluşan saklama kaplarının imali için SKK kullanılmıştır. Bu şekilde 5 cm kalınlığında bakır dış yüzey, 105 cm dış çapa ve 5m uzunluğa sahip saklama kapları üretilmiştir (Şekil 4.51).



Şekil 4.51. Bakır korozyon bariyeri ve çelik iç yüzeye sahip yakıt muhafazası ve 5 cm kalınlığındaki bakır kapağın kesiti

4.11.6. Askeri zırhlı araç sektörü

Yüksek balistik koruma ve statik mukavemeti nedeniyle gelişmiş amfibi saldırı aracının (Advanced Amphibious Assault Vehicle - AAV) ana yapı elemanı olarak 2519-T87 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Bu alaşım ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilmesine karşın, yeterli balistik korumayı sağlayamadığından basit alın kaynakları bile mümkün olmamıştır. Bunun için farklı bindirme üretim yöntemleri değerlendirilmiştir. SKK yönteminin geliştirilmesiyle birlikte bu alaşımlar başarıyla zırhlı araçlarda kullanıma sunulmuştur (Şekil 4.52)



Şekil 4.52. SKK yöntemi uygulanmış AAV

4.12. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları

4.12.1. Metalürjik avantajlar

- Katı-hal yöntemi olmasından dolayı porozite gibi oluşumlar önlenir.
- İş parçasında distorsiyon azdır.
- İyi ölçü kararlılığı sağlar.
- Alaşım elementlerinde kayıp oluşmaz.

- Birleşme alanında mükemmel metalürjik özellikler gösterir.
- İş parçalarında çatlama görülmez.

4.12.2. Çevresel avantajlar

- Koruyucu gaz gerektirmez.
- Yüzey temizleme işlemine gerek yoktur.
- Yağ tabakasının uzaklaştırılması için çözücü madde kullanımı gerekmez.
- Keçe, tel veya herhangi bir diğer gaz gibi malzeme kullanımında tasarruf sağlanır.
- Çevreye ve insan sağlığına zararlı dumanlar açığa çıkmaz.

4.12.3. Enerji avantajları

- Yaşlandırma işlemleriyle özellikleri iyileştirilmiş, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip Al gibi malzemelerin kullanımıyla daha az enerji tüketimi sağlanır.
- Lazer kaynağı için gerekli olan enerjinin yalnızca %2,5'i kullanılır.
- Hafif ağırlığa sahip havacılık, otomotiv ve gemi uygulamalarında düşük yakıt tüketimini sağlar

4.12.4. Üretimde düşük maliyet

- Kaynak operatörünün yüksek seviyede ustalık ve eğitilmiş olmasına gerek yoktur.

- Kaynak ağzı hazırlığı gerekmez.
- Kaynak öncesi oksit, tuval vb. temizlik işlemleri gerekmez.
- Otomasyona idealdir.
- Eğer gerekirse, kaynak işlemi düz yüzeyden tavan kaynağına kadar her pozisyonda yapılabilir.

4.12.5. Yeni ürün tasarımları ve geliştirilmeleri için fırsatlar sağlayan kaynak kalitesi

- Önceden mümkün olmayan pek çok yeni ürün dizaynlarına imkân veren ve var olan ürünlerin düşük distorsiyonlu, yüksek kalitede katı hal birleştirmeleri gerçekleştirilebilir. Örneğin; Al alaşımında olduğu gibi.
- Çatlamaya hassasiyetten dolayı ergitme kaynak teknikleriyle yapılamayan alaşımların kaynakları yapılabilir.
- Alaşımların ısı davranışında yüksek birleştirme mukavemetleri elde edilebilir.
- Kaynakta yüksek performans, kalite ve çalışma özellikleri elde edilir.
- Parazitsiz kaynak yapmak mümkündür.
- Katı faz kaynak olduğundan alaşımlarda metalürjik özellikler kaybolmaz. Hızlı katılma süreç teknikleriyle bu kompozelerden üretilen malzemeler ergitme kaynağıyla üretilmiş olsaydı, uygun olmayan metalürjik reaksiyonlar meydana gelirdi.
- Ekstrüzyonla üretilmiş malzemeler dökümle üretilmiş malzemelere, dövmeyle üretilmiş malzemeler dökümle üretilmiş malzemelere vb. farklı malzeme fırınlarında birleştirme yapılabilir.
- Kutu bölmeleri ve direk kutuları, uzun, büyük kesitler gibi pek çok bileşenli şekiller normalde pratik olmadığından ya da maliyetli

olduğundan döküm ya da ekstrüzyon olarak üretilemezdi. Fakat bu tür işlemler SKK tekniği ile üretilabilmektedir.

- Ekstre edilecek hafif panelleri büyük ebatlarda ya da ergitmeli kaynak yöntemleriyle distorsiyonsuz ekstrüze etmek zordur. Güverte, gemi ya da şasi, raylar için platform ve ağır yol araçları gibi büyük yapıları oluşturmak için SKK küt alın kaynağı yapılabilir.
- Delikli döküm ürünler üretmek zordur. Fakat iki basit katı malzemenin birlikte dökümü ya da ekstrüzyonları SKK tekniği ile kolayca üretilabilmektedir.

4.12.6. Kalite güvenceli üretim

- Proses tamamen mekaniktir. Böylece kaynak işlemi ve kaynak enerji girişi hatasız kontrol edilebilir.
- Kaynak işlemi mekanik olduğundan, özel üretim ayarlarının denetim çıktıları sayısallaştırılabilir ve eğer gerekirse her bir kaynağın geçmişteki durumunu elde etmek için bu çıktılar kaydedilebilir.
- Kaynak öncesi kök açıklığı 1,6 mm'lik bir levha için 0,2 mm ve 12,7 mm'lik bir plaka için 1,25 mm olarak tolere edilebilir.

4.12.7. Güvenlik

- Kaynak işlemi sadece normal takım korumalı dikey freze makinası gerektirir ve hepsinden önce çevre dostudur.
- Kaynak prosesi temizdir ve kaynak dumanı ya da radyasyon gibi herhangi bir güvenlik tehlikesi meydana gelmez

4.13. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Dezavantajları

- SKK yöntemiyle tek pasoda 18 mm derinliğinde kaynak yapılmasına rağmen, bazı levha alaşımlarda tek pasolu kaynak hızları makinalaştırılmış ark kaynak tekniklerinden daha yavaştır.
- Eğer tam nüfuziyetli kaynaklar yapılacaksa, kaynak edilecek iş parçalarının mengene, kelepçe, sıkma cıvataları vb. ile sıkı bir şekilde tezgâha sabitlenmesi gerekmektedir. Aksi halde, iş parçalarının birleşme yüzeylerinin birbirlerinden ayrılması sonucu istenen sağlam kaynaklı birleştirmeler yapılamaz.
- Kaynaklı birleştirmelerin sonunda “anahtar deliği” şeklindeki boşluk oluşumu meydana gelmektedir. Çoğu durumda alternatif bir kaynak tekniğiyle bu deliği doldurmak ya da birleştirmelerin bu kısımları ıskartaya ayrılmaktadır.

İş parçasının sabitlenmesi gerektiğinden dolayı uygulamalarda taşınabilir ekipmanların kullanımı sınırlıdır. (Bozkurt, 2008; Threadgill et al., 2009)

5. POLİMERLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Metallerde başarı ile uygulanan bu yöntem polimer malzemelere de uygulanmaktadır ve plastik kaynak uygulamaları ile prosesler arası rekabet için büyük bir şansı bulunmaktadır (Sorenson et al., 2001a; 2001b; Strand et al., 2003; Strand, 2003; 2004).

Bununla birlikte, polimerlerin SKK ile birleştirilmesi ile ilgili olarak, yapılan çalışmalar hala az sayıdadır ve yayınlanmış çalışmaların çoğu, çok dar bir aralıktaki polimerler çeşidini kapsamaktadır. Bu yayınlar aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Polietilen (PE) (Arıcı and Sınmazçelik, 2005; Arıcı and Şelale, 2007; Squeo et al., 2009; Rezgui et al., 2011; Brémand et al., 2010; Saeedy and Givi, 2010; Aydın, 2010; Saeedy and Givi, 2011a; 2011b; 2011c; Rezgui et al., 2010; Bozkurt, 2012; Mostafapour and Azarsa, 2012; Azarsa and Mostafapour, 2014; Azarsa et al., 2012; Hoseinlghab et al., 2015; Patel et al., 2015)
- Polipropilen (PP) (Kiss and Czigány, 2007; 2012a; Sharma and Singh, 2013; Payganeh et al., 2011; Ahmadi et al., 2011; Panneerselvam and Lenin, 2013a)
- Akrilonitril bütadien stiren (ABS) (Mendes et al., 2014a; 2014b; 2014c; Bagheri et al., 2013; Pirizadeh et al., 2014)
- Polietilen-terafitalat-glikol (PETG) (Kiss and Czigány, 2012b)
- Poliamid (PA) Panneerselvam and Lenin, 2013b; 2014; Husain et al., 2015)
- Polietil metakrilat (PMMA) (Simoés and Rodrigues, 2014)

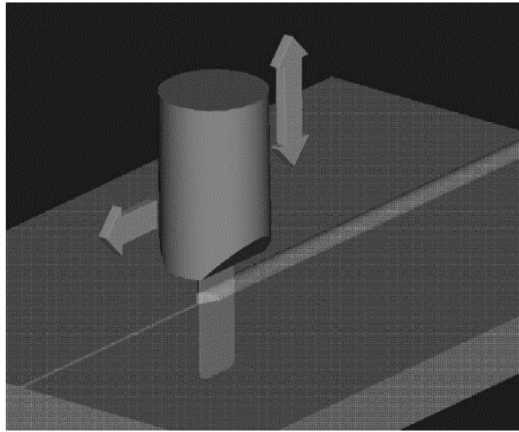
Bu çalışmalar, SKK prosesinde kullanılan takımların tipine göre iki kategoride incelenebilir.

- Metaller için kullanılan geleneksel SKK takımlarına (conventional FSW tools) benzer takımlarla yapılan çalışmalar : (Bozkurt, 2012; Arıcı and

Şelale, 2007; Arıcı and Sınmazçelik, 2005; Aydın, 2010; Saeedy and Givi, 2011c; Squeo et al., 2009; Rezgui et al., 2011; Panneerselvam and Lenin, 2013a; Panneerselvam and Lenin, 2014)

- Sabit omuzlu takımlarla (stationary shoulder tools) yapılan çalışmalar: (Mostafapour and Azarsa, 2012; Rezgui et al., 2010; Kiss and Czigány, 2012a; 2012b; Bagheri et al., 2013).

Plastiklerin SKK özellikleri üzerinde ilk çalışma, bu kaynak yöntemini bulan TWI bünyesinde başlatılmıştır (Strand, 2003). SKK 1997 yılında ilk kez plastıklere uygulanmıştır. Son yıllarda araştırmacılar termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde SKK teknolojisini adapte etmeye çalışmaktadırlar (Arıcı and Sınmazçelik, 2005). TWI araştırma grubu, dönen bir takım ile polimerik malzemelerin üzerinde SKK çalışması yapmış, kaynak uzunluğu boyunca boşluklar meydana geldiği için dikey olarak ileri - geri hareket eden bıçağı (vertical reciprocating blade) SKK takımı olarak kullanmışlardır (Şekil 5.1) (Arıcı ve Sınmazçelik, 2004; Sorensen et al., 2001a; 2001b).



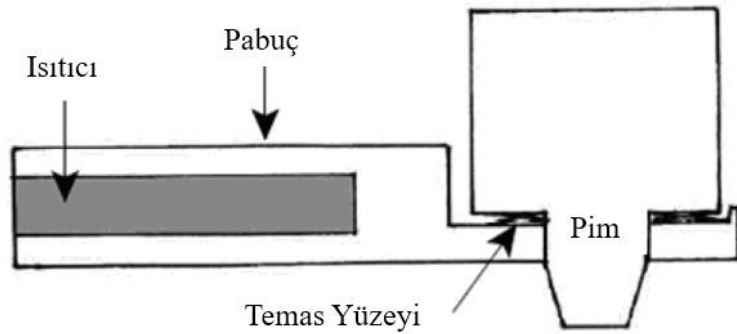
Şekil 5.1. İleri-geri hareket eden SKK bıçağı (TWI, 2015)

Yukarıda ele alındığı gibi, SKK metal malzemelerde özellikle alüminyum alaşımlarında, çok başarılı olmasına rağmen, polimerik malzemelerin kaynağı sırasında sorunları aşağıdaki problemler yaşanmaktadır (Throughton, 2008; Scialpi et al., 2009)

- Kaynak bağlantısında boşlukların oluşmasına ve düşük kaynak hızına neden olan kaynak hattında malzemenin kontrol altında tutulmasında zorluk,
- Polimerlerin kaynak hattında karıştırılması zorluğu ve düzgün olmayan taç (non-uniform crown) ve kaynak tacı (weld bead)
- Yüksek mekanik ve yüzey özelliklerinin sağlanmasında zorluk, kaynak çekirdeğinden erimiş polimerin sıkışması

Aslında, termoplastik malzemeler, zayıf ısı iletkenleridir ve difüzyon makro moleküler yapılarından dolayı etkin bir mekanizma değildir (Squeo et al., 2009)

Bu problemi çözmek için ABD’nde Brigham Young Üniversitesi’nde (BYU) araştırmacılar iyileştirilmiş bir yöntem buluşu yapmışlar ve polimerler için SKK isimli patenti almışlardır (Sorensen et al., 2001a). Patent içeriğinde olan sıcak pabuç (hot shoe) uygulaması erimiş malzeme içirme, yüzey kalitesini artırma ve birleşme (füzyon) prosesine yardımcı olma amacıyla boşlukları (void) ortadan kaldırmakta, karıştırma işlemini iyileştirmektedir. Bu çalışmalarda Şekil 5.2’de gösterilen ısıtılmış pabuçlu takımlar kullanılmıştır.



Şekil 5.2. SKK prosesinde ısıtılmış takımın gösterilişi
(John, 1999; Sorenson, 2001a; 2001b; Strand, 2003)

Önce diş açılmamış pimli takım kullanılıp, vida profili olmayan pimin yapısından dolayı gerilime neden olduğu ve kaynak bölgesinde tutulan malzemenin azalmasına yol açtığı bulunmuştur. Takım dönme hızının artması ve ilerleme hızının azalmasının kaynak mukavemetinin üzerinde pozitif bir etkisinin

olduğu sonucuna varılmıştır. Bu takım düzenlemesi ile ısı omuzdan sürtünme kaynaklı ısınma yoluyla üretilmemiş, aynı zamanda sıcak pabuç yardımıyla kaynak hattından eriyen malzemenin dışarıya enjekte edilmesi de kısıtlanmıştır (Sorensen et al., 2001a; Strand et al., 2003)

Tablo 2.4'te, BYÜ'de yüksek lisans tezi olarak yapılan çalışmada, SKK uygulanmış 6 mm kalınlığında akrilonitril butadien stiren (ABS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), poliamid (PA), polikarbonat (PC), polimetilmetakrilat (PMMA), polipropilen (PP) gibi çeşitli plastik malzemelere ait çekme deney sonuçları verilmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda PTFE türü polimerlerin SKK yöntemiyle kaynak edilemedikleri görülmüştür. Tek pasoda dış açılmış pimli ve ısıtılmış (160-177°C) takımlar ile yapılan çalışmalarda esas malzemenin çekme özellikleri ile kaynaklı bağlantıların çekme özellikleri karşılaştırılarak bağlantı performansları bulunmuştur, elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de özetlenmektedir (Sorensen et al., 2001a; Kaluç ve Taban, 2007).

Çizelge 5.1. Çeşitli tür termoplastik polimerlerin SKK bağlantılarının çekme deney sonuçları (Strand, 2004)

Malzeme	Esas Malzeme	Sürtünme Karıştırma Kaynağı	Maksimum Çekme Gerilmeleri Oranı (%)
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	
ABS	34.1	32.7	96
HDPE	22.5	21.5	95
PA (naylon)	72.4	28.4	39
PC	68.3	57.1	83
PMMA	42.0	21.5	51
PP	31.3	30.6	98

Kaynak verimliliği olarak kaynaklı parçanın çekme mukavemetinin kaynaksız ana malzeme çekme mukavemetine olan oranı tespit edilmiştir. Tablo incelendiğinde, PP için kaynaklı malzeme ile esas malzemenin çekme dayanımları arasındaki oranının (%98) yüksek olduğu görülmektedir (Strand 2004). (Mert, Kaluç) En düşük kaynak verimliliği %39 ile PA'da gerçekleşmiştir. Seth R. Strand tarafından Brigham Young Üniversitesi'nde yapılan "polimer mikro yapıların sürtünme karıştırma kaynağına etkisi" tez konulu yüksek lisans çalışmasında dönen bir pim, geniş bir omuz ve ısıtıcıyı kapsayan özel tasarım bir

takım kullanılmış ve PP plakalar farklı takım çapları ve kaynak parametrelerinde denenmiştir.

PP üzerine yapılan bir çalışmada 6,4, 9,5 ve 12,7 mm pim çaplı takımlarla (Şekil 4.72 ve 4.73) takım dönme hızı 1080 d/d kaynak hızı 51, 102, 203 ve 305 cm/dk kaynak değişkenleri ile takımın 160 ile 177°C sıcaklıklara ısıtılarak oluşturulan bağlantıların eğme mukavemet özellikleri karşılaştırılmıştır.

Daha sonra BYÜ polimerlerin SKK özellikleri hakkındaki çalışmaları genişletmiştir. Bu çalışmalarda Şekil 5.3 ve 5.4’de gösterilen ısıtılmış takımlar kullanılmıştır (Strand, 2003).

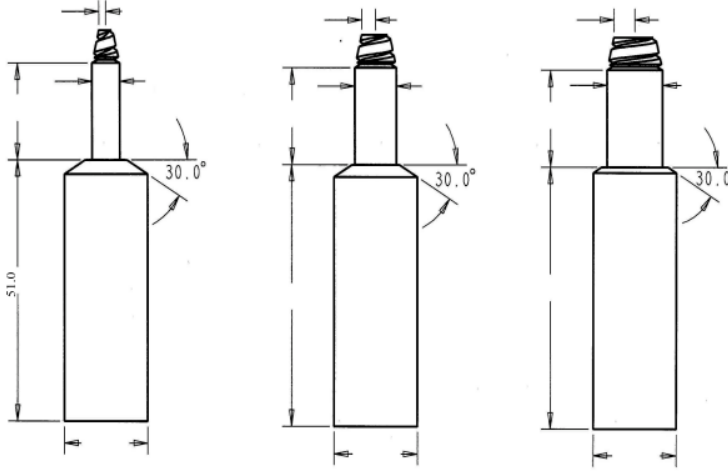


Şekil 5.3. Termoplastik polimerlerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan ısıtıcı sistemli takım (Strand, 2003)

Daha sonra kaynak sırasında oluşan mikro yapıları ve mekanik özellikleri değerlendirmek için plakalar eğme testine (bending test) tabi tutulmuş ve mikro yapısal gözlemler yapılmıştır (Strand, 2004).

Kaynak takımının ilerleme hızının etkisinin yanında kolay akışı sağlayan (the smoothing shoe) pabuç sıcaklığının etkisi de incelenmiştir. İlerleme hızının artması ile üç noktalı bükme (three point bending test) testinde maksimum gerilme ölçülmüş ve kaynak dikişi tarafında tolere edilebilen maksimum sehim düşmüştür. Bağlantıların eğme performanslarının iyi olduğu saptanmıştır (Strand et al., 2003).

Bu çalışmadan görüleceği üzere, kesik konik vidalı takım kullanılarak gerçekleştirilmiş SKK bağlantılarında takımın ısıtılması ile kaynaklı bağlantıların kalitesi ve kaynak hızının artırılması sağlanmıştır.

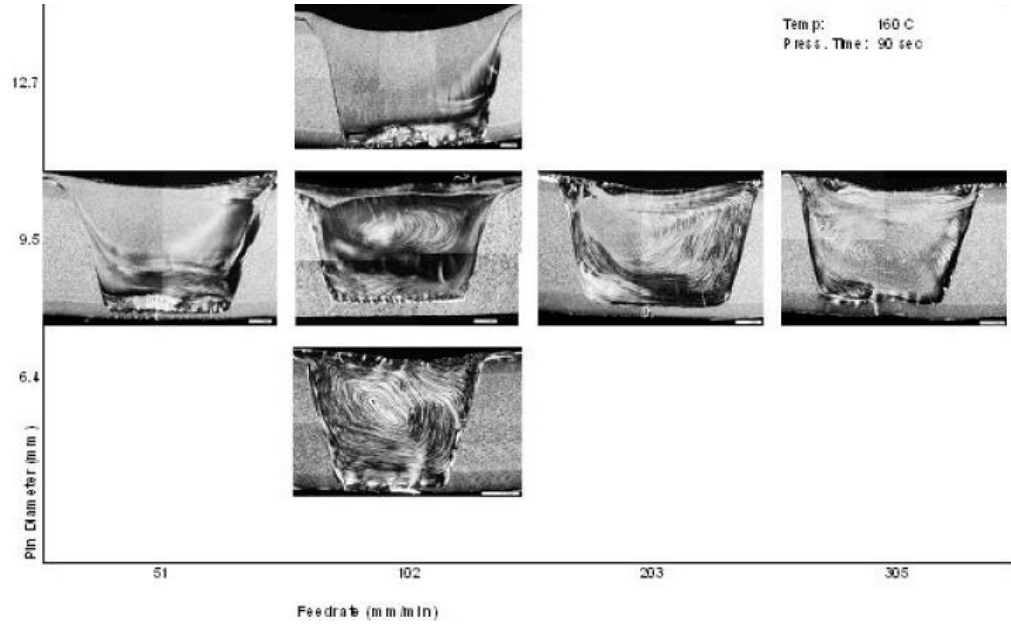


Şekil 5.4. Termoplastik polimerlerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan 6,4 - 9,5 ve 12,7 mm pim çaplı takımlar (Strand, 2003)

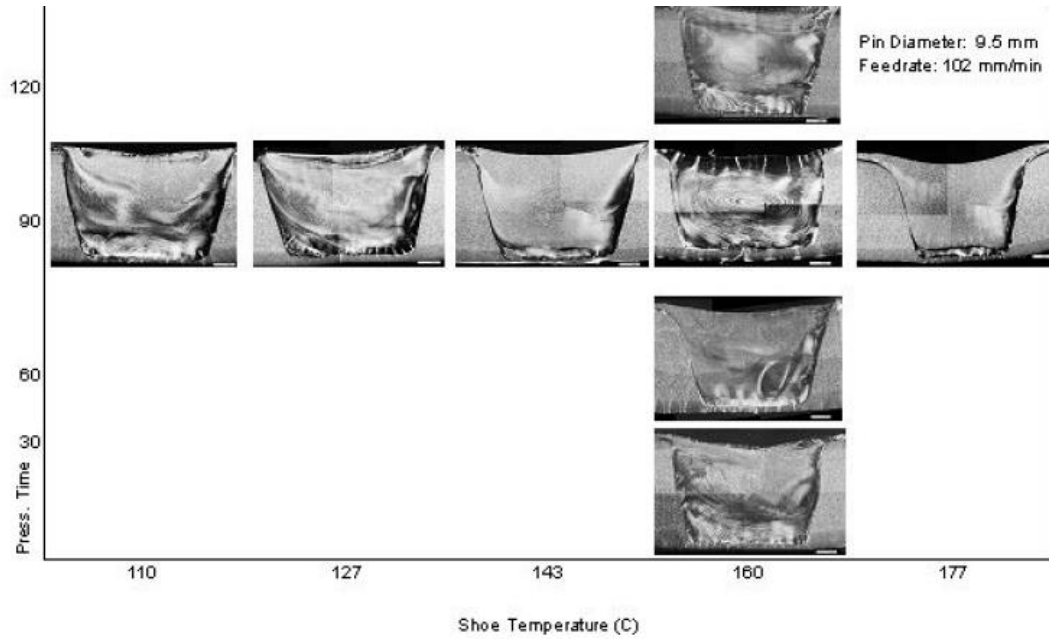
Burada amaç polimerlere uygulanan diğer kaynak yöntemlerine alternatif olabilecek olan bu yeni yöntemin hızlı ve ekonomik uygulanabilirliğinin kanıtlanmasıdır. Kaynak bölgesi aynen metal kaynak bağlantılarında olduğu gibi kullanılan vida dişlerinin etkisi ile iç içe geçmiş halkalardan oluşmaktadır ki bu daha önce de belirtildiği üzere soğan halkaları olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca takımın ısıtılması amacı ile tasarlanmış pabuç içinden geçen takım parçalarının birleşme yüzeylerine bastırıldığından dolayı levha üst yüzeyinin içeri çökmesi en aza indirgenmiştir. Bu sayede dışarıdan estetik görünen bağlantılar elde edilebilmektedir (Şekil 5.5).

Son olarak ABS plakaların kaynağında iki seviyeli deney tasarım (DOE) yöntemi ile takım ilerleme ve dönme hızının ve takım geometrisinin çekme mukavemeti, bükülme modülü (flexural modulus) ve çarpma enerjisi üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Analiz yönteminde pek çok sorun olmasına rağmen, düşük dönme hızı ve yüksek ilerleme hızında konik takım kullanılarak daha iyi kaynak özelliklerine ulaşılabileceği gösterilmiştir. Polimerlerin mikro yapı incelemeleri detaylarındaki zorluklardan dolayı, kaynak bölgesi ve çevresinde oluşan supermoleküler yapı güçlkle incelenmiştir. Polimerlerin SKK yöntemi ile ilgili çok az yayın olmasına rağmen Nelson (2000) bu konuda bir patent almıştır

Arıcı and Sınmazçelik (2005) ve Arıcı and Şelale (2007) konvansiyonel SKK takımları kullanarak 5 mm kalınlığındaki PE plakaların çift taraflı SKK deneylerini yapmışlardır (Şekil 5.6).

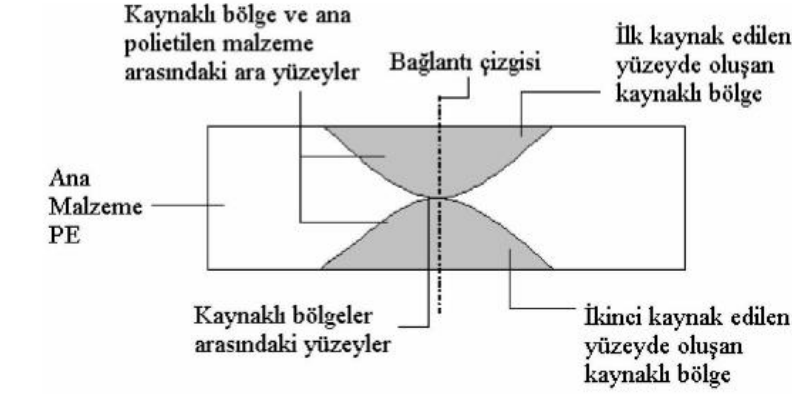


(a)

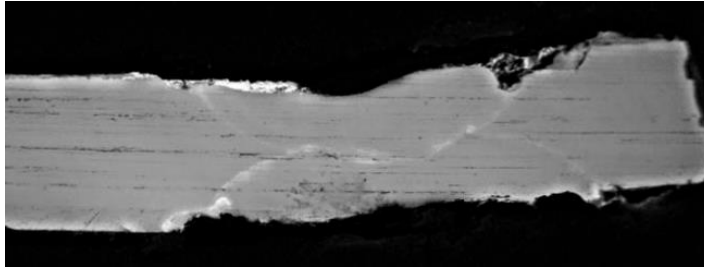


(b)

Şekil 5.5. 6 mm kalınlığında PP levhaların SKK yöntemi ile birleştirilmesi
 (a) farklı takım ilerleme hızı ve pim çapına göre oluşan kaynak bölgeleri
 (b) farklı pabuç sıcaklığı ve baskı süresine göre oluşan kaynak bölgeleri



(a)



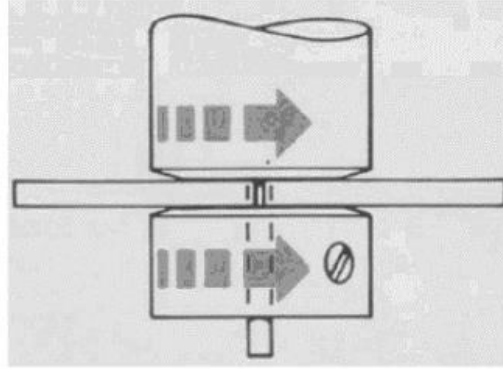
(b)

Şekil 5.6. Çift taraflı SKK uygulamasında kaynak bölgesinin (a) şematik (b) fotografik gösterimi

Bozkurt (2012) tarafından raporlandığı gibi kaynak kökündeki çatlak hatalarından kaçınmak için, bu araştırmacılar plakalar üzerinde çift taraflı kaynak (double pass) hattında, 1000 d/d takım dönme ve 60 mm/dk takım ilerleme hızları kullanarak alın kaynağı yapmışlardır. Şekil 5.7’de şematik olarak gösterilen çift taraflı kaynak uygulaması önerilmiştir (Şelale, 2006).

600 ve 800 d/d’lık dönme hızlarında yetersiz ısı üretimi olurken, 1000 d/d takım dönme hızında uygun kaynak şartlarına erişildiğini belirtmişlerdir. Bu araştırmacılar kaynak sırasında, birleşme bölgesinde malzemenin bir kısmının dışarı atıldığını gözlemlemişlerdir. Arıcı and Şelale (2007) çift taraflı kaynak (double pass) üzerindeki çalışmalarını sürdürmüşler ve kaynak mukavemetine etki eden kaynak bölgenin kalınlığının artan takım eğim açısı ile azaldığını bulmuşlardır.

Çift taraflı kaynakların dayanımı tek taraflı kaynaktan daha yüksek olmaktadır. Takımın 1° eğime sahip olmasının da SKK mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir. (Arıcı and Sınmazçelik, 2005; Şelale, 2006; Arıcı and Şelale, 2007;)



Şekil 5.7. SKNK kaynağının çift taraflı uygulaması (Strand, 2003)

Arıcı and Şelale (2007) PE plakaların SKK prosesinde kaynak kök hasarını ortadan kaldırmak ve kaynak verimliliğini artırmak için, çift taraflı kaynak (double pass) hattı uygulamasını incelemişse de PE malzemeyle yapılan kaynakların çekme mukavemeti baz malzemeye göre %90'dan az olmuştur. Araştırmacılar çift taraflı kaynak (double pass) hattı uygulamasını önerse de çift taraflı kaynak aslında proses süresini ikiye katlanmakta ve tek taraflı kaynak uygulamasına göre daha fazla enerji ihtiyacı doğurmaktadır (Kiss and Czigány, 2012a; 2012b).

Kiss and Czigany (2007) PP malzemenin SKK prosesi üzerine çalışmış ve kaynak bölgesinin mukavemetinin baz malzemeninkinin %50'sinden daha az ve kaynak bölgesi tokluğunun uzak alanlara göre daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar bu davranışı kaynak hattında üretilen ısının dağılımını dikkate alarak ve bu dağılımın kaynak hattı çevresindeki bölgelerde malzemenin düzgün olmayan bir kristalleşme hızına neden olduğu şeklinde açıklamışlardır.

PP ile yapılan başka bir araştırmada kaynak parametreleri kadar takım geometrisinin önemi ortaya çıkartılmıştır (Kiss and Czigány, 2007). Yapılan bir çalışmada SKK birleştirmesinin farklı kısımlarında yapılan camsı geçiş sıcaklığı ölçümlerinde farklı mikro yapıların oluştuğu tespit edilmiştir (Arıcı ve Ertürk, 2007).

Plastik malzemelerde mekanik bölünme (Smith et al., 2001) olarak adlandırılan molekül ağırlığının azalması olayı plastiğin sertliğini ve mukavemetini düşürmektedir (Lim et al., 2004; Costa et al., 2005; Capone et al., 2005). Plastiklerin SKNK birleştirmelerinde sıvılaşmanın gerçekleşmesi ve

kaynak takımının yaptığı basınç tesiri ile mekanik bölünme oluşmakta ve mukavemet düşmektedir (Oliveira et al., 2010; Gan et al., 2010). Kaynak sırasında aşırı sürtünme ısısı oluşturan takım geometrisi ve kaynak parametreleri (çok uzun dönme süresi, yüksek dönme hızı vb.) mekanik bölünmeyi etkilemektedir.

3 mm kalınlığında PE levhaların SKK prosesinde takımın ön ısıtılması ile birlikte levhaları da ön ısıtarak Squeo et al. (2009) çalışmıştır. İki farklı çapta olan silindirik çelik pim test edilmiş ve takım ilerleme ve dönme hızlarının birçok kombinasyonu, mekanik testler için çekme cihazı ve termal testler için ise DSC (differential scanning calorimeter) cihazı kullanılarak denenmiştir (Squeo et al., 2009; Bagheri et al., 2013).

Önceki araştırmacılar gibi, Squeo et al. (2009) de takımın ön ısıtma prosesiyle kaynak kalitesinin iyileştirilebileceği sonucuna varmışlardır. Bunun yanında araştırmacılara göre optimum SKK şartlarına ulaşmada koşul proses parametrelerinin daha çok optimizasyonuna ihtiyaç olduğudur. Prosesi daha sağlamlaştırmak (robustization), daha mukavemetli bağlantılar oluşturmak (baz malzemenin çekme mukavemetine yakın) ve daha fazla proses tekrarlanabilirliğini elde etmek için plastik malzemenin sıcak takım (hot tool) ile ısıtılması iyi bir yöntem olmuştur. Araştırmacılar, polimerik malzemeler için SKK prosesinin umut verici bir teknik gibi görünüyor olsa da proses optimizasyonunun gerekliliğini ve, SKK yönteminin düşük makina ve takım maliyetleri sebebiyle, geleneksel birleştirme teknolojilerine geçerli bir alternatif olabileceğini değerlendirmek için bağlantıların son performanslarına bakıldığında performansların yeterli olduğunu ve yöntemin henüz olgunlaşmış bir kaynak teknolojisi olmadığını açıklamışlardır. SKK sırasında kaynak takım ucu çevresindeki plastiğin sıcaklığının ergime sıcaklığı üzerine çıktığı tespit edilmiştir (Aydın, 2010; Squeo et al., 2009).

Takım ucunun dönme hareketi ve takım omuzunun sürtünme hareketi kaynak edilecek malzemeyi sürtünme ısısı ile ısıtmaktadır. Kaynak parametreleri ve takım geometrisi oluşan sürtünme ısısını ve malzeme sıcaklığını direkt olarak etkilemektedir (Gan et al., 2010).

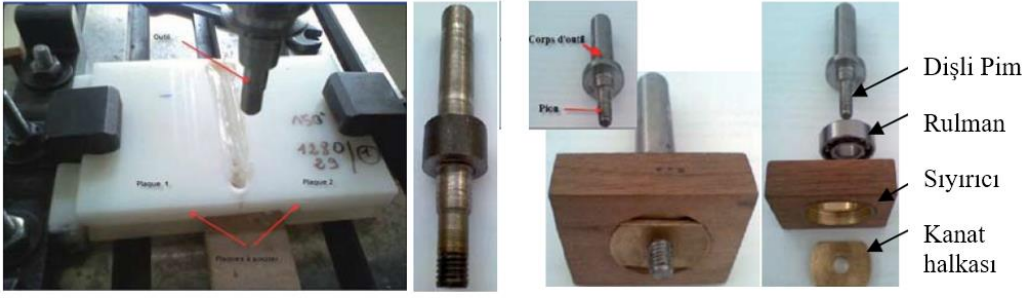
Aydın (2010) ve Arıcı and Şelale (2007) tarafından kullanılabenzer bir takım ve proses parametrelerini kullanmıştır. Fakat baz malzemeyi ön ısıtmaya tabi tutarak tek taraflı kaynakla (single pass) deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE polimerin kaynaklanabilirliğini araştırmak için üç farklı ısıtma işlemi kullanılmıştır. Bu işlemler, oda sıcaklığında kaynak ve metal kalıp içerisinde 50°C ve 80°C’de plastik numunelerin tabandan

ön ısıtma yapılarak kaynaklanmasıdır. Deneylerde, önceden ısıtılmış kaynak bağlantılarında %72'lik bir verim elde edilmiştir. 50°C'de ön ısıtma ile yapılan kaynakta verimlilik yapılarak %89 olarak optimum değerlerde kaydedilmiştir. Ancak takım ile birlikte dönen omuz yüzeyde bozulmaya sebep olmuştur. Araştırmacı ön ısıtmanın düşük dönme hızlarında bile yeterli ısıtma sağlayabildiğini bildirmiştir. Kaynak yüzeyi morfolojisi ve genel özelliklerin de ön ısıtma ile geliştirilebileceği tayin edilmiştir.

SKK prosesinde orta yoğunluktaki PE plakaların kaynak kalitesi üzerinde değişen kritik proses parametrelerinin etkileri Saeedy and Givi (2010) tarafından araştırılmıştır. Araştırmacılar takım dönme hızı seviyeleri 1000 ile 1800 d/d arasında takım ilerleme hızları 12 ile 20 mm/dk arasında ve takım eğim açılarını da 1° ve 2° olarak seçmiştir. Takım dönme hızı ve takım eğim açısı kaynak bağlantısının uzaması ve kaynak mukavemeti için sırasıyla anahtar role sahip olduğu gösterilmiştir. PE plakalar üzerinde bu kaynak yöntemi uygulanarak, optimum kaynak durumunda baz malzemenin %70 oranında kaynak mukavemeti elde edilmiştir.

Ayrıca, diğer araştırmalarda, değişen proses parametrelerinin (takım dönme ve ilerleme hızı ve eğim açısı) PE malzemelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini çalışmıştır. Çekme mukavemeti değeri baz malzeme ile karşılaştırıldığında %75'lik bir kaynak verimliliğine ulaşılmıştır (Saeedy and Givi, 2010, 2011a).

Rezgui et al. (2010) HDPE malzemenin SKK için sabit omuzlu takım kullanmıştır. Takım omuzu ağaç (wood) malzemeden yapılmış ve M10, M12 ve M14 standardında silindirik dişli pim profilleri denenmiştir (Şekil 5.8). SKK parametrelerin optimizasyonu için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Takım dönme hızı seviyeleri 900 ile 3000 d/d arasında takım ilerleme hızları 16 ile 44 mm/d arasında seçilmiştir. Kaynağın polimerin erimesiyle oluştuğunu ve ısı tesiri altında kalan küçük çaplı bölgenin ITAB oluşumundan malzemenin düşük termal iletkenliğinin sorumlu olduğunu raporlamışlardır. Çok küçük uzama durumunda bile numunelerin hasarına neden olan kaynak hattındaki süreksizliklerin varlığı göz önüne alınarak kaynakların çekme davranışları analiz edilmiştir. Düşük ısı iletkenliği olan bir sıyrıcı (scraper) üzerinde olduğu yeni kalıp tasarımı kaynak numunelerinin yalıtılmasını sağlamıştır. Takım omuzu kullanmak yerine sıyrıcılı takım kullanılması sürtünmeden kaynaklı ısıyı korunuyla kaynak sonrası hattaki kabarcıklar ve bölünmüş kaynak görünümü engellenir.



(a) Kalın plakaların SKK alın kaynağı

(b) Takım ve sıyırıcı sistem

Şekil 5.8. Sıyırıcılı ahşap omuzlu SKK takımı

Rezgui et al. (2010) kaynak takımının (pim boyutu) alanının ve dönme hızının kaynak sırasındaki sıcaklık artışını ve kaynak mukavemetini etkilediğini araştırmışlardır. Çevresel hız, takım çapı ve dönme hızı ile değişirken bu iki parametrenin, karşılıklı olarak birbirini etkilediği fakat dönme hızı etkisinin daha önemli olduğu kabul edilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımının uygulanması ve Taguchi yaklaşımı ile optimizasyon yapılması ile takım dönme ve ilerleme hızları, pim çapı ve kaynak başlangıcındaki ön ısıtma için bekleme süresi akış gerilmesini (flow stress) ve kaynak numunelerin maksimum sıcaklığını etkilediği fakat akma gerilmesini (yield stress) önemli ölçüde etkilemediği belirtilmiştir.

2011 yapılan çalışmada da Rezgui et al (2011) ANOVA yöntemi ile HDPE malzemelerin SKK proses parametrelerini optimize ettikten sonra da benzer yorumları yapmıştır.

Payganeh et al.(2011) %30 cam elyaf (GF) takviyeli PP polimer kompozit malzemede alın kaynağında çekme mukavemeti ve kaynak görünümünde SKK proses parametrelerinin (takım pim geometrisi, takım dönme hızı, takım ilerleme hızı, takım eğim açısı) etkisini araştırmıştır. Takım pim geometrisinin kaynak görünümü üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve çekme mukavemeti ve kaynak görünümünde takım dönme hızı ve takım eğim açısının takım ilerleme hızınıninkinden daha önemli bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Ahmadi et al. (2011, 2012a, 2012b) %20 cam elyaf katkılı kompozit PP plakaları için SKK proses parametrelerini optimize etmek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Dönme hızının en baskın, eğim açısının ise en az öneme sahip kaynak parametresi olduğu bulunmuş ve maksimum kaynak mukavemeti için

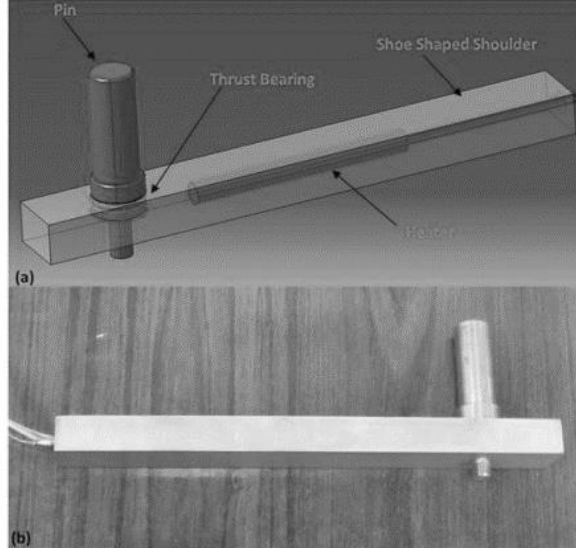
kaynak parametrelerinin optimum değerlerini dđnüş hızı, kaynak hızı ve eğim açısı için sırasıyla 1000 d/d, 20 mm/dk ve 1° olarak belirtilmiştir.

Bozkut (2012) HDPE plakalarının SKK kaynağında, takım olarak 18 mm çaplı bir omuz ve 6 mm çaplı bir pim kullanmıştır. Takım dönme hızı seviyeleri 1500, 2100, 3000 d/d, seçilmiş takım ilerleme hızları 45 ile 115 mm/d arasında değiştirilmiş ve eğim açıları 1°, 2°, 3° olarak denenmiştir. 132 °C erime sıcaklığına sahip HDPE'nin SKK prosesi sırasındaki sıcaklık değişimleri 120 ve 165 °C arasında ölçülmüştür. Zayıf çelme mukavemetine neden olan kaynak boşlukları ve kaynak kökünde çatlaklar gözlemlenmiştir.

Mostafapour and Azarsa (2012), örneğin, HDPE kaynak yapılması için, elektrikli bir rezistans ile ısıtılan sabit alüminyum omuz (stationary aluminium shoulder) kullanmıştır (Şekil 5.9 ve 5.10). Omuz sıcaklıkları 80, 110 ve 140°C'ye ayarlanmış, pim olarak 10 mm çaplı vida kullanılmıştır. Takım dönme hızı olarak 1000 ve 1600 d/d arasında ve takım ilerleme hızı 10 ve 40 mm/dk arasında hızlar değiştirilmiştir. Yazarlara göre, polimerin düşük ısı iletkenliği nedeniyle, pim etrafında yarı-erimiş polimer bir havuz oluşmuştur ve kaynak esnasında üretilen ısı kaynak dikişinde yoğunlaşmıştır. Takım karıştırma kabiliyetinin ve kaynak kalitesinin geliştirilmesine neden olan erimiş havuz hacmi dönme hızının artmasıyla çoğalmıştır. Ancak, omuz sıcaklığı 80 ve 110°C'ye ayarlandığında kaynak malzemesine bozunma gözlemlenmiştir. Takımın penetrasyonundaki eksiklik ve baz malzemenin tabanı ve kaynak dikişi arasındaki bağlantının olmaması başlıca kaynak hatası olarak bildirilmiştir. Isı girişinin bütün kaynak malzemesinin eritilmesi için yeterli olması durumunda kaynak hatası sıklığının azaltılabildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.9. HDPE malzemenin ısı destekli SKK prosesi



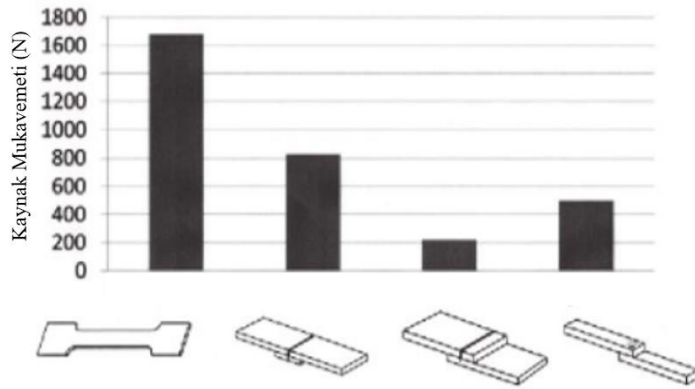
Şekil 5.10. Polimer SKK prosesi için tasarlanan takımın (a) şematik (b) fotografik gösterimi

Kiss and Czigány (2012a; 2012b) ısıtmalı olmayan sabit omuzlu bir takım PTFE (non-heated PTFE stationary shoulder) malzemenin SKK prosesini farklı pim çapları ve SKK parametreleri kullanarak gerçekleştirmiştir. İç gerilmeleri analiz etmek amacıyla, gerilmelerin optik olarak ölçülmesini sağlayan yöntemler kullanarak ve kaynak dikişi ve ITAB bölgesini görselleştirmek için kısmi kristal PP baz malzemesi yüksek şeffaflık derecesindeki ve düşük kristalleşme eğilimi olan PETG olarak değiştirilmiştir. PP kaynaklar için, kaynakların ilerleme ve yığılma tarafları arasında anlamlı farklar gözlemlenememiştir. PETG kaynaklar için, kaynak ve baz malzeme arasında keskin bir süreksizliğin olduğu bildirilmiştir. Gerilme için optik fotoğraflardaki renk saçaklarının oluşumu, takım dönmesi ile indüklenen moleküler oryantasyona ve ısıdan kaynaklanan artık gerilimlere bağlanmıştır.

SKK parametreleri optimize etmek için Sharma and Singh (2013), Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Takım dönme hızı seviyeleri 1500 ile 900 d/d, takım ilerleme hızları 60 ile 80 mm/dk ve takım omuz çapları ise 8 ile 12 mm arasında seçilmiştir. Optimum kaynak koşullarında baz malzemenin %70'i kadar bir çekme mukavemetine ulaştıklarını bildirmişlerdir. Maksimum darbe mukavemeti için PP'nin SKK prosesinde optimize edilmiş parametreleri takım dönme hızı 900 d/d takım ilerleme hızları 70 mm/dk ve takım omuz çapı 10 mm olarak bulmuşlardır.

Inaniwa (2013) HDPE poliamid 6 (PA6) ve PVC malzemelerin kaynaklanabilirliğini ve kaynak mukavemeti üzerinde malzemelerin fiziksel özelliklerinin farklı etkilerini araştırmıştır. Maksimum kaynak verimlilikleri bahsedilen malzemeler için sırasıyla %70, 45 ve 35 olarak bulunmuştur.

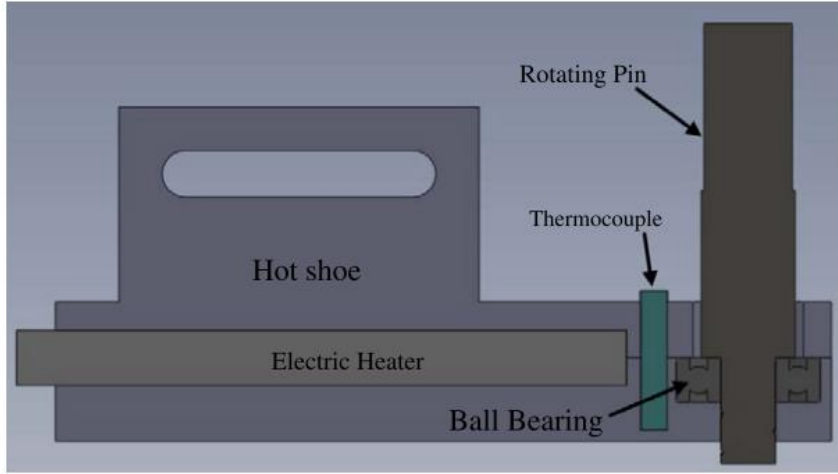
Hira (2013) PE, poliamid 66 (PA66) ve polifenilen sulfid (PPS) malzemelerin SKK davranışı ve bu polimerlerin alın, dikiş ve nokta karakteristiklerini araştırmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. PE malzeme için SKK alın, bindirme ve nokta kaynağı mukavemet değerleri karşılaştırması (Hira, 2013)

Panneerselvam and Lenin (2012; 2013a) SKK sonuçlarına pim geometrisinin etkisini analiz etmek için baz malzeme olarak PP ve geleneksel SKK takımı kullanmıştır. Kare, üçgen, diş (yiv) açılmış ve konik pim geometrileri kullanılmış, takım dönme hızı seviyeleri için 1500 ile 2250 d/d, takım ilerleme hızları için ise 30 ile 60 mm/dk arasında değişen değerler seçilmiştir. pim geometrisi ve kaynak parametrelerine göre, birleşme, porozite, kavite ve boşluk gibi bazı kaynak hataları değinilmiştir. Ayrıca kaynağın ağırlıklı olarak geri çekilme tarafında meydana gelen zayıf birleşmeler ve diş (yiv) açılmış pimli kaynak takımı ile en iyi sonuçların alındığı gözlemlenmiştir.

Bagheri et al. (2013), ABS malzemenin kaynağı için ısıtılmış pabuçlu sabit omuzlu takım (50, 80 ve 100 °C) ve konvansiyonel olmayan 10 mm çaplı ve 7 mm hatve boylu yivli pim kullanmıştır (Şekil 5.12). Takım dönme hızı olarak 800, 1250 ve 1600 d/d takım ilerleme hızı olarak da 20, 40 ve 80 mm/dk kullanılmıştır. Takım dönme hızını artırmakla, kaynaklanan plakaların yanmasına ve erimiş malzemenin sıkıştırılmasına neden olan sıcaklıktaki önemli bir artışın gözlemlendiği sonucuna varılmıştır.



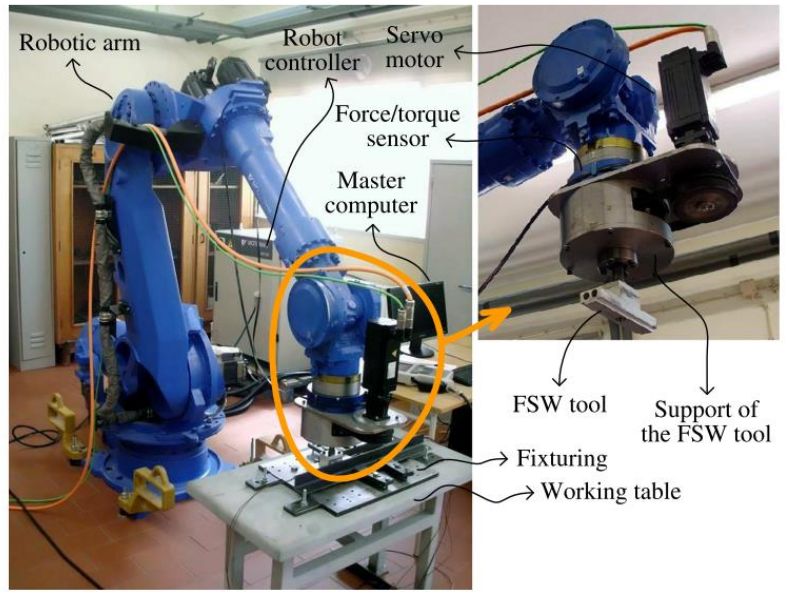
Şekil 5.12. Sıcak pabuç takım tasarımının şematik gösterimi

Diğer taraftan, düşük dönme hızları için, malzeme yetersiz karıştırılması ve baz malzemenin kaynak noktası ile birleşme zorluğu yaşandığı gözlenmiştir. Aynı şekilde, en yüksek ilerleme hızlarında, kaynak hattının kesintisiz olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlara takım pabucunun ısıtılması ile ulaşıldığı bildirilmiştir. Maksimum çekme mukavemetine 100°C'ye kadar ısıtılmış kaynak pabucu uygulaması ile erişilmiştir. Ancak, optimum kaynak koşullarına rağmen, kaynak hatlarında kesintilerin olduğu ve yığma tarafında çekme numunelerinin başarısızlığı gözlenmiştir. Maksimum çekme mukavemetinin maksimum ısı girişinin olduğu maksimum dönme hızı, maksimum pabuç sıcaklığı ve en düşük ilerleme hızında olduğu bildirilmiştir.

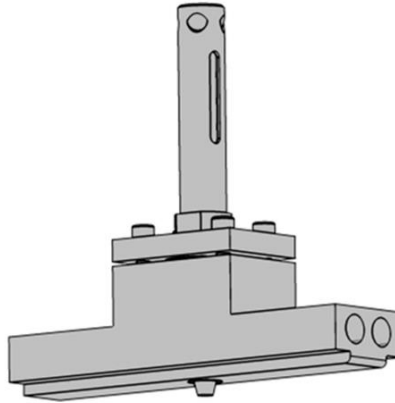
Simoes and Rodrigues (2014) metallerin SKK prosesindeki termo-mekanik koşullarının literatürde yoğun bir şekilde analiz edildiğine değinmiş ve malzeme akışı ve polimerlerin SKK prosesinde yer alan termo-mekanik olayların analizi ile ilgili çalışmasını sunmuştur. Analiz literatür özetine ve farklı SKK şartlarında PMMA üzerinde gerçekleştirilen SKK'ların muayenesine dayanmaktadır. Polimerlerin özellikle reolojik ve fiziksel özellikleri ve SKK prosesindeki termo-mekanik koşulları nedeniyle, metallerden tamamen farklı olduğu belirtilmiştir (Singla et al., 2014).

Mendes et al. (2014a, 2014b, 2014c) çalışmaları kapsamında ABS plakaların sürtünme karşıtıma kaynağında eksenel kuvvet, dönme ve ilerleme hızları, morfoloji üzerinde takım sıcaklığı, kaynak kalitesi, çekme mukavemeti ve çekmede uzama oranlarının etkisini robotik kaynak sistemi (Şekil. 5.13) ve bu amaç için geliştirilmiş olan sabit omuz takımı (stationary shoulder tool) (Şekil

5.14) kullanarak araştırmıştır. Yüksek eksensel kuvvetin erimiş polimer malzemenin sıkışmasını desteklediğini bu durumun kaynak içine hava giriş önlediğini böylece kaynağın soğumasına yardımcı olduğunu ve büzülme, çekme ve boşluk oluşumu gibi istenmeyen kaynak hatalarının önlendiğini bulmuşlardır. Yüksek eksensel kuvvet uygulamanın çekme mukavemetini ve çekmede uzama oranını iyileştirdiğini de gözlemlemişlerdir. Ek olarak, dönme hızının, yeterli plastikleştirilme ve polimerin karıştırılmasına yön veren ısı üretiminin başta gelen faktörü olduğu bildirilmektedir.



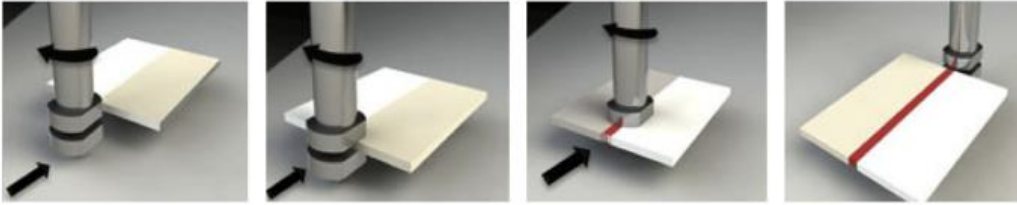
Şekil 5.13. Robotik SKK uygulaması



Şekil 5.14. Uzun sabit omuzlu ve konik dişli pimli SKK takımı

Jaiganesh et al. (2014) farklı takım profilleri kullanarak (kare, silindirik ve üçgen dişli (yivli) pim profili) ile 5 mm kalınlığında PP plakaları birleştirmek amacıyla 800 ile 1200 d/d arasında değişen takım dönme hızlarını, 40 ile 200 mm/dk arasında değişen takım ilerleme hızlarını ve 1 ile 5 kN arasında değişen aksel kuvvetleri çalışmıştır. Optimum takım dönme hızı olarak 950 – 1000 d/d, takım ilerleme hızı olarak 9-12 mm/dk ve eğim açısı olarak da 1° denenerek baz malzemenin çekme mukavemetine göre %45’lik bir kaynak verimi elde edilmiştir.

Pirizadeh et al. (2014) ABS plakaların birleştirilmelerindeki kaynak kök hatalarını ve arkaya doğru yarılmaları (back slit) ortadan kaldırmak için iki omuzlu yeni bir takım geliştirmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. İki omuzlu takımla SKK prosesi

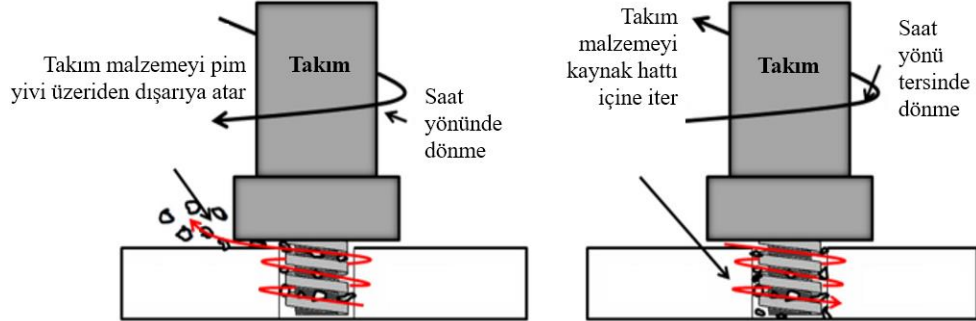
Panneerselvam and Lenin (2013b; 2014) SKK testlerini daha önceki çalışmalardaki gibi konvansiyonel dönen takım ile farklı bir baz malzeme poliamid 6 (Naylon 6) kullanarak yapmışlar. Bu araştırmacılar, kaynak kalitesi üzerinde takım dönüş yönünün etkisini analiz etmek için 1000 d/d dönme hızında ve 10 mm/dk ilerleme hızında kaynak yapan özel olarak tasarlanmış sol dişli pim profil takımını kullanmışlardır. Saat yönünün tersine dönen takım ile üretilen SKK bağlantılarında kaynak hatası görülmemiş, saat yönünde dönen takım ile üretilenlere göre kaynak mukavemetinde iyileşme sağlanmıştır. Saat yönünde dönen takım ile üretilen kalitesiz zayıf kaynakların nedeninin karıştırılan malzemenin kaynak hattından dışarı çıkarılması olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 5.16).

Husain et al. (2015) SKK yöntemiyle birleştirilen poliamid (naylon 66) levhaların mekanik özelliklerine proses parametrelerinin etkisini, beş seviyeli dönme hızını ve üç seviyeli ilerleme hızını proses parametresi olarak kullanarak tam faktöriyel deney tasarımı ve varyans analizi yöntemi ile araştırmışlardır. Sonuçlar, dönme hızının artışı ile kaynak mukavemetini arttığını bununla birlikte,

1570 d/d'dan daha yüksek dönme hızlarında kaynak mukavemetinin azalacağını göstermektedir. Takım ilerleme hızı ile ilgili olarak bu hızın artışı durumunda kaynak mukavemetinin azaldığı sonucuna varılmıştır ve baz malzemenin çekme mukavemetine göre %55'lik bir kaynak verimi elde edilmiştir.

Hoseinlaghab et al. (2015) sürtünme karıştırma yöntemi ile kaynaklanmış PE plakaların sürünme davranışları üzerindeki takım geometrisi etkisini çalışmışlar ve eğim açısının azaltılması durumunda kaynağın sürünme karşı direncinin arttırıldığını bildirmişlerdir.

Son olarak, Patel et al. (2015) ANOVA ile UHMWPE tabakaların çekme mukavemeti üzerindeki SKK parametrelerin etkisini çalışmıştır. Pim uzunluğu ve dönüş hızı kaynak mukavemeti için baskın faktörler olarak bulunmuştur. Maksimum kaynak mukavemeti için optimum takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve pim uzunluğu sırasıyla 1000 d/d, 60 mm/dk ve 6 mm olarak ifade edilmiştir.



Şekil 5.16. Saat yönü ve saat yönü tersine dönen takımın etkisi

6. OPTİMİZASYON VE DENEY TASARIMI

6.1. Modelleme ve Optimizasyon Teknikleri

Uygun kaynak parametrelerini seçmek için, istatistiksel regresyon teknikleri veya yapay sinir ağları (artificial neural networks - ANN) gibi nöral hesaplama (neural computing - NC), genetik algoritma (genetic algorithm- GA), yanıt yüzeyi yöntemi (response surface method - RSM), deney tasarımı (design of experiments - DOE) ve Taguchi yöntemi olarak üzerinde bir çok matematiksel model kaynak performansı ile kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi kurmak için geliştirilmiştir.

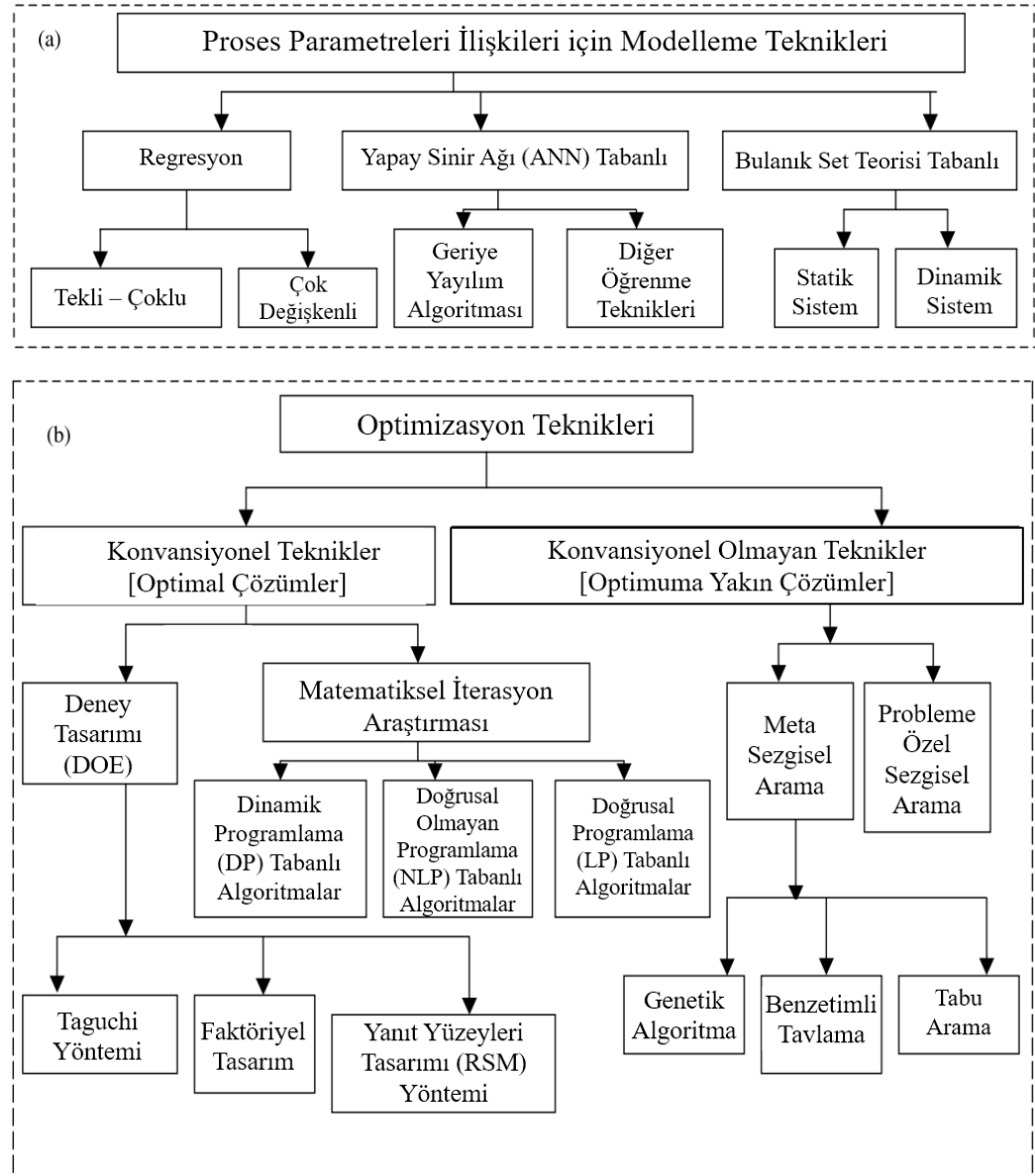
Araştırmacılar tarafından geliştirilen parametre optimizasyon teknikleri konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan teknikler olarak sınıflandırılabilir. Şekil. 6.1 (a) ve (b)'de sırasıyla, proseslerde farklı giriş-çıkış ve proses içi parametre ilişkilerini modellemenin ve optimizasyon tekniklerinin genel sınıflandırılması yapılmıştır.

Konvansiyonel teknikler lokal optimum çözüm sağlarken, dış etkilerin modellenmesi (extrinsic model) ve amaç fonksiyonuna dayalı konvansiyonel olmayan teknikler, sadece bir tahmin yaklaşımıdır ve yakın optimal (near-optimal) proses şartlarını sağlamak için uygulanırlar. Konvansiyonel teknikler genel olarak iki kategoriye ayrılabilir. Birinci kategoride Taguchi metodu ve yanıt yüzeyi tasarım metodolojisi gibi deneylerin istatistiksel tasarımı içeren deneysel teknikler vardır. İkinci kategoriye doğrusal programlama (linear programming - LP), doğrusal olmayan programlama (non-linear programming - NLP) ve dinamik programlama (dynamic programming - DP) algoritmaları tekrarlamalı (iterative) matematiksel arama teknikleri dahildir.

Son zamanlarda araştırmacılar tarafından kullanılan yeterince genel ve kapsamlı konvansiyonel olmayan meta-sezgisel (meta-heuristic) arama tabanlı teknikler, genetik algoritma (genetic algorithm - GA), tabu arama (tabu search - TS) ve benzetilmiş tavlama algoritması (simulated annealing SA) tekniklerine dayanmaktadır. Mukherjee and Ray'de (2006) bu tekniklerin her biri için kritik değerlendirmeler yapılmıştır.

6.2. Deney Tasarım Yöntemlerinin Gelişimi

16 ve 17. yüzyılda Francis Bacon (1581–1626) araştırmaların ancak doğru planlanmış deneylerle değişkenlerin etkilerini çözümleyebileceklerini savunmuştur. “Experimentum Crucis” adlı eserinde, deneyde sadece bir faktör A değiştirildiğinde ve diğer faktörler ve şartlar aynı kaldığında, gözlem değerindeki farklılıkların nedeni A faktörüdür açıklamasına yer vermiştir.



Şekil 6.1. Modelleme (a) ve optimizasyon (b) tekniklerinin sınıflandırılması

Daha sonra uygulanan her seferinde tek faktör (one factor at a time - OFAT) yöntemi, 20. yüzyıla kadar değişmez deney tasarımı (DT) olarak kalmıştır. Bu düşünce ancak İngiliz istatistikçi Sir Ronald Alymer Fisher (1890–1962) tarafından değiştirilmiştir. Fisher modern matematik odaklı istatistiğin kurucusudur. 1925 yılında “Statistical Methods for Research Workers” başlıklı eseri yayınlanmış ve bunu 10 yıl sonra yazdığı temel eser olan “The Design of Experiments” takip etmiştir (Tozkoparan, 2010)

Deney tasarımı, Fisher tarafından, tarım alanlarında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher ayrıca, deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan ‘Varyans Analizi’ yöntemini de geliştirmiştir. Yöntem, kısa süre içinde, Amerika’da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için yoğun olarak uygulanmış ve Amerika’nın bu alanda dünyada lider konumuna gelmesine büyük katkıda bulunmuştur. Tarım alanında, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere uygulanmıştır. Daha sonra kimya ve ilaç sektöründe de uygulanmış olmasına rağmen, imalat sektöründeki uygulamaları, 1970’lere kadar son derece kısıtlı kalmıştır. (Durmaz, 2008)

Fisher’in kesin olarak koyduğu sonuçlar “one factor at a time” yönteminin araştırmalar için faydalı, uygun bir yöntem olmadığıdır. Bunun nedeni biyolojik, tıp ve teknolojik problemlerin çözümünde bu yöntemin faktörlerin karşılıklı etkileşimleri konusunda çok az bir açıklama yapmasıdır. Buna karşın çok faktörlü deney tasarımları, faktörlerin birbirlerinden bağımsız etkileşimleri durumunda, aynı işlem yoğunluğunda çok daha doğru sonuçlar doğurmaktadır (Fisher, 1935)

Böylece Fisher faktöriyel deney tasarımı veya kısmi faktöriyel tasarım adı verilen modern deney planlarının ilk uygulayıcısıdır. Faktöriyel varyans analizi, ortogonal polinomlar yardımı ile değerlendirme yöntemleri, tam veya kısmi faktöriyel deney planları gibi yöntemler Fisher’in eserlerinde yer almaktadır.

1937 yılında Fisher’in yardımcısı olarak beraber çalıştığı L.H.C. Tippet ile kısmi faktöriyel deney planlarını tasarlayarak uygulamıştır. Daha sonraları Cochran ve Cox, Davies, A. Linder, yakın zamanda da Box, Hunter, Hicks, Scheffler ve G. Taguchi bu geleneğe devam ettiler ve eserlerini yayınlayarak modern deney tasarımı yöntemlerine büyük katkıda bulundular (Tozkoparan, 2010).

Amerika’da imalat sektörü, 1980’lerin başında, deney tasarımı Japon kalitesinin nedenlerini araştırırken yeniden keşfedilmiştir. Deney tasarımı, o tarihlerde Japonya’da Genichi Taguchi’nin önderliğinde yoğun ve etkili olarak uygulanmıştır. Taguchi, üretimdeki uygulamalarla yöntemin imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır (Şirvancı, 1997).

Taguchi deney tasarımlarında genellikle kısmi faktöriyel deney planlarını başlangıç olarak göz önünde bulundurmuş ve ortogonal dizilerin tanımını yaparak yeni ve işletmelerde çalışanların kolayca uygulayabilecekleri deney yöntemini ortaya koymuştur.

Günümüzde deney tasarımı, mevcut süreçlerin performansını geliştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Yeni süreçlerin yapılandırılmasında da yaygın bir kullanımı bulunmaktadır. Deney tasarımı tekniğini süreçlerde uygulayarak aşağıdaki sonuçlar alınabilmektedir (Montgomery, 2008; Myers et al., 2012)

6.3.OFAT

Czitrom (1999) yaptığı bir çalışmada, çoğu mühendis ve bilim adamının deneylerini OFAT’la yaptığını belirtmiş ve OFAT’la yapılmış üç gerçek mühendislik deneyinde deney tasarımının her birinde uygulanmasıyla daha az deney yapmak, faktörlerin etkilerini daha doğru tahmin etmek ve faktörler arasındaki etkileşimi tahmin etmek noktasından daha avantajlı olduğunu belirtmiştir.

Anderson (2005), 2^k olarak ifade edilen, k deneylerdeki faktör sayısı, faktöriyel tasarımın uygulamacıya OFAT’a göre daha az deney yapma imkânı verdiğini ve bunun faktör sayısı artıkça daha da arttığını belirtmiştir. Ayrıca OFAT ile optimize edildiği düşünülen faktörler etkili bir deney tasarım yöntemi olan yanıt yüzeyleri yöntemi (response surface method - RSM) ile analiz edildiğinde, OFAT ile bulunan optimum noktanın asıl optimum noktadan uzak olduğunu belirtmiştir

Lye (2002) mühendislik deneylerinde yaygın olarak kullanılan OFAT yönteminin faktörlerin etkisi ve birbirleriyle etkileşimi hakkında bilgi vermek noktasında yetersiz olduğunu belirtmiştir. Faktöriyel deney tasarım yönteminin prosesi tanımak, önemli faktörleri görmek, faktörler arasında

etkileşim olup olmadığını anlamak, matematik modeli tahmin etmek ve cevabı (response) optimize etmek noktasında çok daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Frey et al. (2003) yaptıkları çalışmada, OFAT yönteminin mühendislik sistemlerindeki parametre tasarımının deneysel çalışmalardaki rolü üzerine çalışmıştır. Sonuçta da eğer yapılacak deney sayısı azsa bunda OFAT yöntemini düşünülebileceği, aksi takdirde ortogonal seri tasarımının düşünülmesinin faydalı olacağını belirtmişlerdir.

Girdileri ve çıktısı olan bir proses düşüldüğünde girdiler; sıcaklık, pH, konsantrasyon, partikül boyutu, katalist tipi vb. gibi prosesi etkileyen herhangi bir parametre olabilir. Bu prosesin içinde ne gibi bir mekanizmanın işlediğini bilindiği varsayıldığında, bunu anlamak için girdilerin optimum olduğu noktaların veya proses girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkinin tespit edilmesi gerekir ve bu yüzden deneyler yapılır.

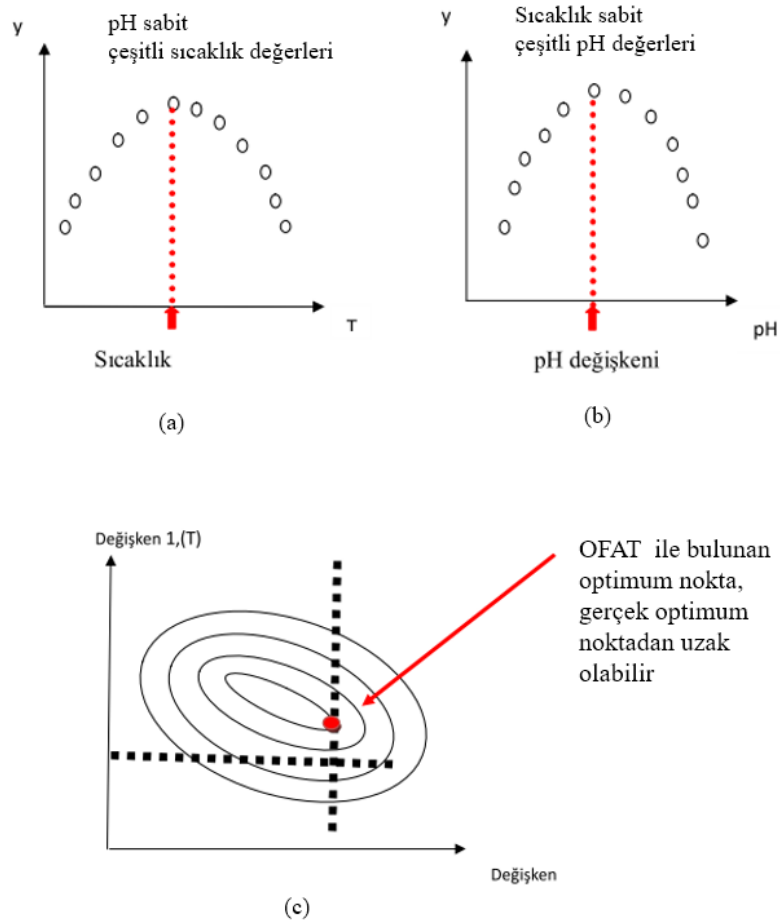
Bugün çoğu deney karmaşık bir prosesin optimum şartlarının bulunması ve çıktının maksimum yapılması için sistematik olmayan bir yolla yapılır. Bir girdi (parametre) değiştirilirken diğer girdiler sabit tutulur, bu girdi için optimum nokta bulunduktan sonra aynı işlem diğer girdiler için de tekrarlanır. Böyle bir yöntem OFAT diye adlandırılır. Şekil 6.1’de görülebileceği gibi OFAT yöntemi girdiler (parametreler) arasındaki etkileşimin fazla olduğu durumlarda optimum noktanın yeri açısından net bilgi vermemektedir. OFAT’la yapılan deneylerde bulunduğu düşünülen optimum nokta, gerçekte optimum nokta olmayabilir. Bununla beraber deneyi yapan kişi optimum noktayı bulduğunu zanneder (Mendelhall and Sincich, 2003).

Şekil 6.2’den de görülebileceği gibi OFAT yaklaşımında elde edilen sonuç açısından birçok problem vardır. Asıl optimum noktaya ulaşamaz. Etkisiz ve gereksiz birçok deneme yapılır. Faktörler aynı anda değiştiği zaman optimum noktaların ve çıktının maksimum noktasının ne olacağı hakkında yeteri kadar bilgi vermeyebilir (yani etkileşimler ihmal edilir). Çıktının maksimum noktası asıl maksimumdan farklı olabilir.

6.4. Deney Tasarımı

Araştırmacılar tarafından bir sistem veya prosesin belirli bir özelliği veya parçasına ait detayları incelemek üzere yapılan faaliyetlere deney

denilmektedir. İstatistikte deney, yeni gerçekler elde etmek, önceki sonuçları doğrulamak veya reddetmek için planlanmış bir iş olarak algılanmaktadır. Gerçekleştirilen deney belirli bir sürecin devamının veya değiştirilmesinin önerilmesi konusunda bir karara ulaşılmasında yardımcı olacaktır. Deneyler bir veya birkaç soruya yanıt bulmak için gerçekleştirilebilir. Deneyler, kesin ve karşılaştırmalı deneyler ile tek ve çok etmenli deneyler olarak iki farklı türde yapılır (Çömlekçi, 2003). Kesin ve karşılaştırmalı deneyler, bilinmeyen bir ilke veya etkiyi ortaya çıkarmak için yapıldığı gibi, aynı zamanda bilinen veya ileri sürülen bir tezi onaylamak için de yapılan deneylerdir.



Şekil 6.2. OFAT yaklaşımı (a) Sıcaklık için OFAT (b) pH için OFAT (c) Gerçek yüzeyde OFAT

Tek ve çok etmenli deneyler ise, bir veya birden çok etmenin bir durum veya proses üzerindeki etkisini belirlemek için sadece o an için

tasarlanan şartlarda yapılan deneylerdir. Bu deneyler aynı zamanda çalışmanın konusu olan deney tasarımları için yapılan deney türleridir. Tasarlanmış deney terimi ise; bir sistem veya prosese ait girdi faktörlerinin amaçlı bir takım değişikliklere tabi tutulması ve bu değişiklikler sonucu oluşan çıktı üzerindeki değişme sebeplerinin belirlenmeye çalışılması için denemeler yapılması demektir (Çömlekçi, 2003). Deney tasarımı kavramı ile ilgili farklı tanımlar yapmak mümkündür. Deney tasarımı; bağımlı faktördeki değişikliğin nedeni olarak ele alınan bağımsız faktörün etkilerinin ölçülmesi işlemini yürütmek için kullanılan tekniktir (Şanyılmaz, 2006). Deney tasarımı, bir prosesteki girdi faktörleri üzerine istenilen değişikliklerin sistematik bir şekilde yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi ve yorumlanması olarak da tanımlanabilir (Çömlekçi, 2003, Box, 2010)

Kalite mühendisliğinde DT'nın tasarımcıya kazandırdığı en büyük faydalardan bir tanesi de prosesteki değişkenliğin azaltılarak kalitenin geliştirilmesidir. Bilindiği gibi kalite mühendisliğinin temel noktası değişkenliğe neden olan faktörlerin tespit edilip giderilmesi ile prosesteki değişkenliğin en küçüklenmesi veya başka bir ifade ile kararlılığının artırılmasıdır (Çömlekçi, 2003).

Deney tasarımı teknikleri, yeni bir proses geliştirmede ve performans arttırma amacıyla mevcut prosesi düzeltme çalışmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Deney tasarımının amaçları kısaca aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Şanyılmaz, 2006; Montgomery, 2008):

- Sonuç üzerinde en etkin girdi faktörlerini belirlemek.
- Performans karakteristiğini hedef değere en yakın sonuca ulaştıracak girdi faktörlerinin seviyelerini belirlemek.
- Kontrol edilemeyen girdi faktörlerinin çıktı üzerindeki etkisinin en az olacağı kontrol edilebilen girdi faktörleri kombinasyonunu oluşturmak.

Deney tasarımında, süreci etkileyen her türlü etken “faktör” olarak adlandırılır. Faktörlerin çeşitli kategorileri, dereceleri ve yoğunlukları ise “seviye” olarak adlandırılır. Bir deney tasarımı sırasında birden fazla faktör ve seviye grupları bulunabilir (Çömlekçi, 2003, Box, 2010). Bu süreç veya

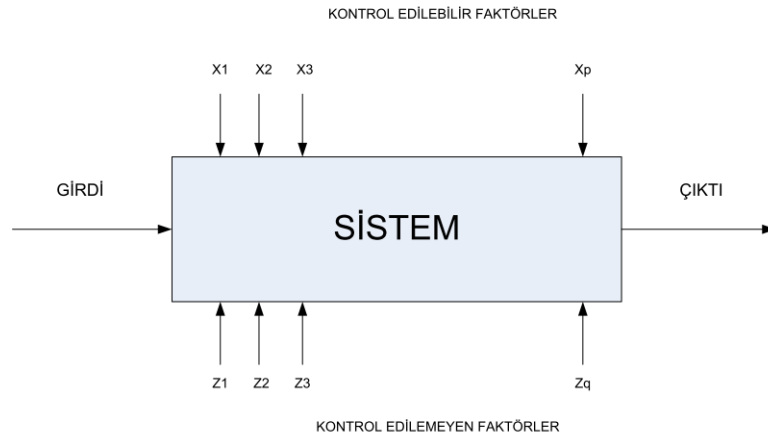
sistem, Şekil 6.2'deki modelle temsil edilebilir, (Montgomery, 2008). Süreci makina, insan, yöntem kombinasyonları, veya girdileri gözlemlenebilir çıktıya dönüştüren kaynaklar olarak görebiliriz. Süreç değişkenleri $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ gibi kontrol edilebilir ve $z_1, z_2, z_3, \dots, z_q$ gibi kontrol edilemeyen değişkenler olmak üzere iki bölüme ayrılır.

Şekil 6.3 üzerinden DT amaçları şöyle sıralanabilir:

1. y çıktısında en fazla hangi değişkenlerin etkili olduğunu belirleme
2. y çıktısını istenilen optimum seviyede tutmak amacıyla etkili x değişkenlerini hangi seviyelerde tutmak gerektiğini belirleme
3. y çıktısının değişimini minimumda tutmak amacıyla etkili x değişkenlerini hangi seviyelerde tutmak gerektiğini belirleme $z_1, z_2, z_3, \dots, z_q$ gibi kontrol edilemeyen değişkenlerin tesirlerini minimumda tutmak amacıyla, etkili x değişkenlerini hangi seviyelerde tutmak gerektiğini belirleme

6.5. Deney Tasarımı İlkeleri

Deney tasarımı sırasında kullanılan 3 önemli ilke vardır. Bunlar rassallaştırma (randomization), tekrarlar ve bloklama ilkeleridir (Çömlekçi, 2003).



Şekil 6.3. Bir prosese veya sistem için genel modelleme

6.5.1. Rassallaştırma

Deney tasarımına rassallık kavramını getiren ve rassallaştırmanın deney tasarımı için ne kadar önemli olduğunu anlatan kişi Fisher olmuştur. Rassallık; çevresel gelişmelerin belli bir kurala ve düzene bağlı olmadan tesadüfi olarak oluşmasıdır. Rassallıkla kastedilen, deney bireysel koşullarında hem deneysel materyallerin, hem de sıralamanın rassal olarak dağıtılmasıdır. İstatistiksel yöntemler, gözlemlerin ve hataların bağımsız dağılmış rassal değişkenler olmasını gerektirir. Rassallık, çoğunlukla bu varsayımı geçerli kılar. Deneyleri doğru şekilde rassallaştırmak ile, var olabilecek dışsal faktörlerin deney sonuçlarına etkilerini de yok etmiş olur.

Deney tasarımı için rassallaştırmanın en önemli yolu bağımsız faktörlerin seviyelerinin her bir deney için rassal olarak atanmasıdır. Rassallaştırma aynı zamanda deney verilerinin toplanması sırasında da uygulanmalıdır. Rassallaştırma, deney sonuçlarını analiz etmede kullanılacak istatistiksel yöntemler için gereklidir ve önyargının giderilmesine yardımcı olur. (Durmaz, 2008)

Örneğin, alüminyum sertleştirilmesi deneyinde, örneklerin farklı kalınlıklarda olduklarını ve soğutma aracı üzerinde kalınlığın etkisi olduğunu varsayalım. Eğer, yağ ile soğutmada kullanılan örneklerin tümü, su ile soğutmada kullanılan örneklerden daha kalınsa, bir soğutma yöntemini diğerine tercih ederken yanılığa düşmemek olası değildir. Oysa örnekleri soğutma araçlarına rassal dağıtma, bu problemi yok edecektir (Çömlekçi, 2003, Box, 2010).

6.5.2. Tekrarlama

Tekrarlama, temel deneyin tekrarlanması anlamına gelir. Örneğin, alüminyum alaşımının soğutulması örneğinde, bir örneğin yağ ile soğutulması ve bir örneğin su ile soğutulması ile bir tekrar yapılmış olunur. Böylece, her bir soğutma yöntemi için beşer adet örnek kullanıldığında, beş adet tekrar yapılmış olur.

İki önemli özelliği vardır: Birincisi tekrar ile, deney sahibi, deneysel hataları tahmin etme şansını yakalar. Hata tahmini, toplanan veriler arasındaki

farklılıkların istatistiksel olarak önemli olup olmadığını belirlemede temel noktadır. İkinci olarak, veriler hakkında daha kesin bilginin elde edilmesini sağlar. Bunun anlamı şudur: n tekrar sayısı arttıkça, örnek ortalamasının varyansı azalır; daha kesin sonuç elde edilir (Çömlekçi, 2003, Box, 2010).

6.5.3. Bloklama

Bloklama bir deneyin hassasiyetini ve kesinliğini arttırmak için kullanılan bir teknik olup, deney alanının bölümlere ayrılması demektir. Her bir bölüm homojen olarak veya farklı etkileri test edebilmek için belirli farklı özelliklerine göre bölünmüş olabilir.

Boklamada temel düşünce, benzer deneysel birimlerin gruplara bölünmesidir. Bu şekilde yapılmış olan deneylerin sonuçlarındaki değişkenlik, her bir blok içindeki faktör ve seviyelerinin etkilerinin farklılığını ortaya koymaktadır. Bu sayede kontrol edilemeyen diğer faktörlerin etkisi minimize edilebilmektedir. Faktör ve seviyeleri her bloktaki birimlere rassal olarak atanır. Bloklar arasındaki değişkenlik deney hatasından arındırılarak deneyin hassasiyeti artırılır. Bloklar aynı birimleri içerdiğinden, aynı koşullar altındaki faktör ve seviyelerinin karşılaştırılması sağlanır.

6.6. Deney Tasarımı Aşamaları

Deney tasarım ve analiz aşamalarında istatistik yaklaşımını kullanabilmek için, üzerinde çalışılacak konunun açıkça ifade edilmesi ve anlaşılması, verilerin toplanma şekli ve bu verilerin nasıl analiz edileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Deney tasarım önerileri ve her bir maddenin temel noktaları aşağıda özetlenmiştir (Şanyılmaz, 2006; Box, 2010).

- Problem seçme ve tanımlama
- Faktörleri, seviyelerini ve aralıklarını seçme
- Çıktı değişkeninin seçilmesi
- Deney tasarımını seçme

- Deneyi gerçekleştirme
- Verilerin istatistik analizlerini yapma
- Sonuç ve neriler

6.6.1. Problem seçme ve tanımlama

Deney gerektirecek bir problemi fark etmek pratikte çoğunlukla kolay değildir. Bir deney gerekleşeceğı zaman, amaç ile ilgili tüm detaylar göz önünde bulundurulmalıdır. Probleme net bir çözüm getirmek için problemin iyi belirlenmesi ve anlaşılması gerekmektedir, (Özkurt, 1999).

6.6.2. Faktörleri, seviyelerini ve aralıklarını seçme

(2. ve 3. adımlar eşzamanlı veya ters sırada yapılabilir.) Deneyde değıştirilecek faktörler seçilmeli, bu faktörlerin değışim aralıkları ve denemelerde hangi seviyelerde tutulacağı belirlenmelidir. Bu faktörlerin istenilen seviyelerde nasıl kontrol altında tutulacağı ve nasıl ölçölmeleri gerektiğı de üzerinde düşünölmesi gerekli konulardan biridir. Bunun için de süreç bilgisi gerekli olacaktır.

Bu süreç bilgisi, pratik deneyim ve teorik bilgilerin kombinasyonlarından oluşabilir. Deneyin amacı faktör inceleme olduğı zaman, faktör seviyelerini az sayıda tutmakta fayda vardır. Genelde iki seviye seçme, bu tür çalışmalarda iyi sonuçlar vermektedir. Aralık seçme de önemli bir konudur.

Faktör incelemede ilgilenilen aralığın geniş seçilmesi yine verimli sonuçlar çıkaracaktır. Daha sonra, hangi değışkenlerin önemli olduğunu ve hangi seviyelerde iyi sonuçlar verdiğini öğrendikçe, ilgilenilen aralık daha çok daraltılabilir.

6.6.3. Çıktı değişkeninin seçilmesi

Çıktı değişkeninin seçilmesinde dikkat edilecek nokta, üzerinde çalışılan süreç hakkında gerekli bilgiyi sağlamasıdır. Birden fazla çıktı değişkeni seçilmesi de mümkündür, 1, 2, ve 3. adımlar deney öncesi planlama adı altında toparlanırlar.

6.6.4. Deney tasarımı seçme

Yukarıdaki deney öncesi planlama aktiviteleri doğru bir şekilde yapıldıktan sonra, bu aşama daha kolay hale gelir. Örnek sayısının seçilmesi, her bir deney koşulunun deneme sırasının ve tekrarlanma sayısının belirlenmesi, blok veya daha başka kısıtlayıcı şartların bulunup bulunmadığının saptanması gibi kriterler, deney tasarımı oluşturur (Özkurt, 1999). Bu adımı destekleyecek istatistiksel paket programları da mevcuttur. Bu programa; faktör sayıları, seviyeler, aralık (minimum değer-maksimum değer) girilir ve istenilen tasarıma göre analizler yapılır. Tasarımı seçerken, deney amaçlarını da göz önünde tutmak gereklidir. Hangi faktörlerin çıktıda farklılık oluşturduğu ve ne derecede etkili olduklarını, bu amaç çerçevesinde inceleriz.

Bu durumda hangi faktörlerin farkı oluşturduğu ve çıktı üzerinde ne derece etkili olduğunu bulmak isteriz. Bizim için benzerliğin / eşitliğin önemli olduğu durumlar da ortaya çıkabilir. Örneğin, A standart ve B daha maliyetli yöntem olmak üzere, iki farklı üretim yönteminin karşılaştırılması ile ilgilenilebilir. Bu durumda, iki yöntemin çıktı üzerinde fark oluşturmadığını ispatlamaya yönelik bir deney de olabilir

6.6.5. Deneyi gerçekleştirme

Deneyi gerçekleştirirken, her şeyin planlandığı gibi yapıldığından emin olmak için süreci takip etmek çok önemlidir. Deney prosedüründeki hatalar, deney geçerliliğini yok edecektir.

6.6.6. Verilerin istatistiksel analizlerini yapma

Veri analizlerini destekleyecek pek çok yazılım paketleri bulunmaktadır, adım 4'te de deney tasarımı seçiminde bu paketlerden faydalanılmaktadır. Özellikle basit grafiksel yöntemleri, sapma/hata analizleri ve model uygunluk kontrolleri önemli analiz teknikleridir. Hata analizleri ve model uygunluk sınamaları da kullanılan önemli analizlerdendir. İstatistiksel yöntem, faktör veya faktörlerin etkilerini kanıtlayamaz. Sadece sonuçların güvenilirliği veya geçerliliği üzerine yol göstericidir. Yerinde kullanımında, istatistiksel yöntem hiçbir şeyi ispatlamaya yönelmez, ancak oluşan farklılıkları ölçmemize ve belirlenen bir güven aralığı atamamıza yarar. İstatistiksel yöntemlerin en önemli avantajı, karar verme sürecine nesnellik katmasıdır.

6.6.7. Sonuç ve öneriler

Veri analizlerinden sonra, deney sahibi, sonuçlara göre çıkarımlar yapmalı, nasıl hareket edileceğini belirlemelidir. Bu safhada grafiksel gösterimlerden sıkça faydalanılmaktadır. Tüm bu süreç boyunca, unutulmamalıdır ki deney öğrenme sürecinin bir parçasıdır: Sistem ile ilgili hipotezler formüle edilir, bu hipotezlerin geçerliliğini araştırmak için deneyler yapılır, çıkan sonuçlara göre yeni hipotezler formüle edilir, ve böylece devam eder. Görülmektedir ki, deney, iteratif bir çalışmadır. Çalışmanın başlangıcında çok büyük, kapsamlı, tek bir deney yapmak hatalı bir davranıştır. Başarılı bir deney için, ilgili önemli faktörleri, bu faktörlerin değişeceği aralığı, doğru seviye sayılarını ve bu değişkenlerin doğru ölçüm ünitelerini bilmek gerekmektedir. Genellikle, bu soruların cevabı tam olarak başlangıçta bilinmez, ancak deney süreci süresince öğrenilir. Deneyde ilerledikçe, bazı değişkenler ilave edilir, bazıları çıkarılır, bazı faktörler için aralık değiştirilir veya farklı çıktı değişkeni üzerinde durulmaya başlanılır. Genel bir kural olarak, mevcut kaynakların %25'inden fazlası ilk deney için kullanılmaz. Böylece deney süresince, diğer aşamalar için de yeterli kaynak kalınması sağlanmış olunur.

6.7. Deney Tasarım Türleri

Deney tasarımı türlerini genel olarak aşağıdaki gibi 5 ayrı grupta incelemek mümkündür (Antony, 2003)

- Tesadüf parselleri deney tasarımı
- Tesadüf blokları deney tasarımı
- Latin karesi deney tasarımı
- Tam faktöriyel deney tasarımı
- Kısmi faktöriyel deney tasarımı

6.7.1. Tesadüf parselleri deney tasarımı

En basit deney tasarımı türüdür. Deney birimlerine faktörler tamamen tesadüfi olarak dağıtılır. Bu tür deney tasarımlarının uygulanabilmesi için deney materyalinin tamamen homojen olması gerekir. Diğer bir ifade ile deneme materyalinin bu gibi özellikleri belli bir grupta diğerlerine göre üstün veya düşük bir etki meydana getirmemelidir. Çok sayıda deneyin uygulanacağı durumlarda böyle bir homojen materyalin bulunması çok zordur. Bu nedenle bu tip deney tasarımları, imalat alanından çok bazı laboratuvar veya sera çalışmalarında kullanılır. Tesadüf parselleri deney tasarımı, belirlenen faktörlerin deneylere atanması sırasında rassallık önemlidir. Bu yüzden yapılacak deneylerin sırası, hangi tasarımın hangi denek üzerinde uygulanacağı gibi durumlar rassal sayılar yardımıyla belirlenebilir. Bu sayede yapılacak deney sayısının düşük olması sağlanır. Tesadüf parselleri deney tasarımı, elde edilen veriler, varyans analizi kullanılarak kolaylıkla analiz edilebilmektedir.

Örnek olarak; tamamen aynı özelliklere sahip olduğu kabul edilen bir tarla üzerinde tohumların verimliliği üzerine yapılacak bir çalışmada, seçilecek en uygun DT çeşidi, tesadüf parselleri DT'dir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi A,B,C ve D gibi dört farklı tohumunun verimliliğinin araştırılacağı bir DT için, tarla 4 eşit bölüme ayrılır. Bu bölümler yapılacak 3 tekrarlama için 3 eşit parsel ayrılır. Çizelge 3.1.'de X_n ($X = A, B, C, D$) olarak gösterilen değerler her bir tohum çeşidi için yapılan 5 farklı tekrarlamanın deney sonuçlarıdır. Tesadüf parselleri DT'da, elde edilen veriler, varyans analizi kullanılarak kolaylıkla analiz edilebilmektedir.

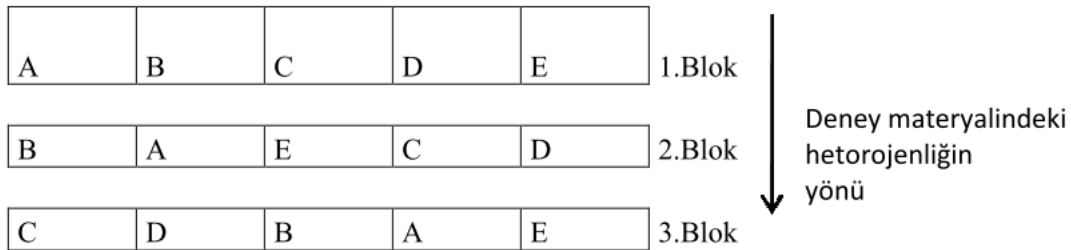
Çizelge 6.1. Tesadüf parselleri DT örneği

A	B	C	D
A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
A ₃	B ₃	C ₃	D ₃
A ₄	B ₄	C ₄	D ₄
A ₅	B ₅	C ₅	D ₅

6.7.2. Tesadüf blokları deney tasarımı

Tesadüf blokları deney tasarımı yöntemi, deney materyallerinin hepsinin homojen olmadığı durumlarda kullanılır. Üzerinde deney tasarımı uygulanacak olan materyal aynı büyüklük ve şekilde bloklara ayrılır veya mümkün olduğunca homojen özelliklerine göre gruplandırılır. Bu blokların veya grupların sayısı yapılacak tekrarlar sayısı kadardır. Bu bloklar veya gruplar etkisi araştırılacak faktör sayısı kadar parsellere ayrılır. Eğer c faktör sayısı ve r tekrarlar sayısı var ise toplam “c.t” kadar parsel olacaktır. Bu deney tasarımı yöntemi heterojen deney materyalleri üzerinde homojen bloklar oluşturarak, deney materyallerinin bloklar içerisinde homojen kalmasını sağlar. Oluşturulan blokların homojen olduğu kabul edilir.

Örnek olarak, etkisi araştırılan A, B, C, D, E gibi 5 faktör olsun, 3 tekrarlı bir tesadüf blokları DT kurmak için, Şekil 6.4’deki gibi 5’er parsel bölünmüş 3 blok oluşturulur ve her blok içindeki parsellere bu 5 faktör rassal olarak atanır.



Şekil 6.4. Tesadüf blokları DT örneği

6.7.3. Latin karesi deney tasarımı

Deneyde kullanılacak materyaller değişik konularda farklılık gösteriyorsa, faktörlerin deney materyali üzerindeki etkisinin bu farklılıkların etkilerinden arındırılması için Latin karesi deney tasarımları uygulanır. Bu iki farklı özelliği sıra ve sütunlara dağıtarak her bir özellik için diğer özellikten kaynaklanan değişkenliği kontrol altına almak mümkün olacaktır. Böylece hata olasılığı azalır ve buna bağlı olarak hata karesi ortalaması azalacaktır. Bu da faktörlerin etkilerinin daha hassas olarak değerlendirilmesini sağlayacaktır. Latin karesi deney tasarımında sıra ve sütun sayısı, etkisi araştırılacak faktör sayısına ve birbirlerine eşittir. Buna göre Latin karesi deney tasarımında faktör sayısının karesi kadar deney yapılacaktır. Deney tasarımının ismindeki kare ifadesi buradan gelmektedir. Latin karesi deney tasarımı genellikle faktör sayısının 5 ila 12 arasında olduğu deney tasarımları için tercih edilir. 4x4 veya daha küçük Latin karesi deney tasarımlarında hata serbestlik derecesi küçük olduğundan, 12x12 ve daha büyük Latin karesi deney tasarımları için ise deney sayısının çok olması nedeniyle tavsiye edilmez (Hicks and Turner, 1999).

Diğer DT'lerde olduğu gibi burada da sıra ve sütunlara atanacak faktörler rassal olarak seçilmelidir. Ancak bu yapılırken her bir sıra ve sütunda faktörlerin yalnız birer kez olması gerekmektedir. Bu yüzden bloklar içinde rassallaştırma uygulanır.

Örnek olarak; A, B, C ve D gibi dört farklı gübre çeşidinin (faktör) bir tarla üzerindeki verimliğe etkisinin araştırılacağı bir DT'da, tarlanın sağdan sola gidildikçe sulanmasından dolayı ve yukarıdan aşağı geldikçe alacağı rüzgar sebebiyle her bölümünün aynı özelliklere sahip olmadığını farz ediliyor. Bu durumda gübrelerin tarla üzerindeki etkisinin en doğru şekilde belirlenebilmesi için tarlaya Çizelge 6.2 'deki gibi 4x4 Latin karesi DT uygulanır (Hicks and Turner, 1999).

Çizelge 6.2. Latin karesi DT örneği

	1	2	3	4
1	C	D	A	B
2	D	A	B	C
3	B	C	D	A
4	A	B	C	D

Latin karesi DT genellikle ziraat ile ilgili deneylerde kullanılmaktadır. Ancak bu imalat endüstrisinde kullanılmadığı anlamına gelmez. İmalat endüstrisinde Latin karesi DT'nin kullanımına örnek olarak; aynı malı üretmek için geliştirilen A, B ve C gibi 3 makinanın performanslarının karşılaştırılması verilebilir. Bu örnekte makinaların operatörlerinin farklılığı ve operatörlerin sabah, öğle ve akşamki çalışma verimliliğinin farklarından dolayı kaynaklanan kontrol edilemeyen etmenler vardır. Böyle bir durumda uygulanacak en iyi DT yöntemi 3x3 Latin karesi DT olacaktır.

Çizelge 6.3 'deki gibi düzenlenen 3x3'lük DT sayesinde makinaların operatör farklılıkları ve zaman farklılıklarından dolayı kaynaklanan performans farklılıkları hesaba katılarak en iyi performansa sahip makina seçilebilecektir (Hicks and Turner, 1999).

6.7.4. Tam faktöriyel deney tasarımları

Faktöriyel deney tasarımları seviye sayısı birden çok olan, birden fazla sayıdaki faktörlerin etkilerinin deney materyali üzerindeki etkilerinin ele alındığı deney tasarımı yöntemleridir.

Çizelge 6.3. İmalat endüstrisi için Latin karesi DT örneği

	Operatörler		
	1	2	3
	A	B	C
	C	A	B
Çalışma saatleri	B	C	A

Faktöriyel tasarım, deneydeki her bir faktörün tüm seviyelerinin diğer faktörlerin her bir seviyesini içeren, mümkün olan bütün kombinasyonlarının yapılması ile oluşur. Faktöriyel deney tasarımların en önemli avantajı, tüm faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimleri en kolay ölçülebilen deney tasarımı yöntemi olmasıdır. Faktöriyel deney tasarımları deneyde mümkün olan bütün

kombinasyonları denediği için diğer tasarım türlerine göre zaman ve maliyet kaybına neden olan bir yöntemdir (Hicks and Turner, 1999).

Örnek olarak 2 seviyeli 7 faktörü olan bir deneyde gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı bütün faktör seviyelerinin çarpımına eşittir. Çizelge 3.4’de görüldüğü gibi $2^7=128$ deney yapılması gerekir. Çizelge 6.4.’de her biri 2 seviyeli A, B, C, D, E, F ve G gibi 7 faktörün etkisinin araştırılacağı bir faktöriyel DT örneği gösterilmiştir. Burada, çizelge içerisinde yer alan her bir kare bu 7 faktörün her birinin bir seviyesini içeren bir deney kombinasyonudur. Örnek olarak X_i ile olarak gösterilen deney kombinasyonu, A’nın 2., B’nin 1., C’nin 1., D’nin 1., E’nin 2., F’nin 2. ve G’nin 1. seviyelerinin kombinasyonunun etkisini gösteren deneyi ifade etmektedir. Faktöriyel DT’lerin en önemli avantajı, tüm faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimleri en kolay ölçülebilen DT yöntemi olmasıdır. (Montgomery, 2008)

Çizelge 6.4. Tam faktöriyel tasarım örneği

				A ₁				A ₂			
				B ₁		B ₂		B ₁		B ₂	
				C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
D ₁	E ₁	F ₁	G ₁								
			G ₂								
		F ₂	G ₁								
			G ₂								
	E ₂	F ₁	G ₁								
			G ₂								
		F ₂	G ₁					X _i			
			G ₂								
D ₂	E ₁	F ₁	G ₁								
			G ₂								
		F ₂	G ₁								
			G ₂								
	E ₂	F ₁	G ₁								
			G ₂								
		F ₂	G ₁								
			G ₂								

6.7.5. Kısmi faktöriyel tasarım

Kısmi faktöriyel tasarım tam faktöriyel tasarımdaki zaman ve maliyet kaybını azaltmaya yönelik olan bir deney tasarımı yöntemidir. Bu tür tasarımlarda ortogonal diziler kullanılır. Her bir deneyde birden fazla sayıda faktörün seviyesi değiştirilerek az sayıda deney ile bütün faktörlerin seviyelerinin denenmesi mümkün olmaktadır. Kısmi faktöriyel deneylerde amaç deney sayısını azaltmaktır. Ancak bunu yaparken incelenen faktörlerde değil faktörler arasındaki etkileşimlerin sayısında bir azaltma yapmak daha uygun olacaktır. Performans karakteristiği üzerindeki etkisinin az olacağı kabul edilen ve serbestlik derecesi yüksek olan etkileşimlerin sayısında bir azaltma yapılabilir. Kısmi faktöriyel tasarımda deney sayılarının azaltılmasının diğer önemli bir yolu da faktör seviyelerinin mümkün olduğunca ‘yüksek değer’ ve ‘düşük değer’ olarak 2 seviyeli seçilmesidir. Bu şekilde deneylerin tüm kombinasyonlarının yapılması yerine sadece sonucu etkileyeceği düşünülen faktör ve seviyelerin performans karakteristiği üzerine olan etkisi araştırılabilir. Kısmi faktöriyel deney tasarımlarının en büyük dezavantajı tüm deneylerin yapılmamasından dolayı bazı etkileşimlerin etkilerinin tam olarak anlaşılamamasıdır. Örnek olarak her biri 2 seviyeli bir DT için kısmi faktöriyel DT kullanılarak 2^k sayıda deney yapmak yerine 2^{k-p} kadar deney yapılır. Aynı zamanda bu DT $1/2^p$ kısmi faktöriyel DT olarak adlandırılır. Kısmi faktöriyel DT en büyük dezavantajı tüm deneylerin yapılmamasından dolayı bazı etkileşimlerin etkilerinin tam olarak anlaşılamamasıdır. 2^{4-1} kesirli faktöriyel tasarımı örneği Çizelge 6.5’de verilmiştir. Çalışmanın ana konusunu olan Taguchi yöntemi de bir çeşit kısmi faktöriyel deney tasarımı türüdür (Şanyılmaz 2006; Bayrakdar, 2009).

Çizelge 6.5. 2^{4-1} kesirli faktöriyel tasarımı

Deney No	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

6.8. Deney Tasarım Uygulamaları

Deneyisel tasarım yöntemleri birçok disiplinde kendine uygulama alanı bulmuştur. Aslında deneyler bilimsel sürecin bir parçası olarak görülebilir. Genelde, tahminler yapılan süreç hakkında yapılan aktiviteler süresince öğrenilir, süreçten veri elde edebilmek için deney yapılır, yeni tahminler oluşturmak için deneyden elde edilen bilgiler kullanılır, tekrar bu tahminleri sınamak için deneyler yapılır ve böylece devam eder (Özkurt, 1999). Deney tasarımları mühendislik dünyasında üretim süreçleri performanslarını iyileştirmede önemli bir role sahiptir. Ayrıca, yeni süreçler geliştirilmesinde de yoğun uygulamaları vardır. Süreç geliştirilmesinde, deney tasarım tekniklerinin uygulanması şu sonuçları doğurabilir:

1. İyileştirilmiş süreç çıktısı
2. Azaltılmış değişkenlik ve istenilen özelliklere daha yakın uygunluk
3. Azaltılmış geliştirme zamanı
4. Azaltılmış maliyetler

Deney tasarım yöntemleri, yeni ürünlerin geliştirildiği ve mevcut ürünlerin iyileştirildiği mühendislik tasarım aktivitelerinde de önemli rol oynar. Mühendislik tasarımı alanında deney tasarım uygulamalarına aşağıdaki örnekler gösterilebilir.

1. Temel tasarım konfigürasyonlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi.
2. Malzeme alternatiflerinin değerlendirilmesi.
3. Ürünün değişik ortam koşullarından etkilenmemesini sağlayacak tasarım parametrelerinin seçilmesi, ki böylece ürünün dayanıklı olmasının sağlanması
4. Ürün performansı üzerinde etkisi olan tasarım parametrelerinin belirlenmesi.

Bu alanlarda kullanılan deney tasarımları, daha kolay üretilen ürünler, performansı ve güvenilirliği iyileştirilen ürünler, azaltılan ürün maliyetleri, kısaltılan ürün tasarım ve geliştirme aşamaları süreleri ile sonuçlanabilir.

6.9. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi

Düşük maliyetli, yüksek kalitede ve güvenilir ürünler üretmek veya hizmet sunmak bugünün global ekonomisinde hayatta kalabilmenin anahtarıdır. Bir çok kalite uzmanı bunu sağlamanın en iyi yolunun, ürün tasarımına odaklanmak olduğunu belirtmektedir. Bu da aslında kaliteyi kontrol ile sağlamak yerine tasarım aşamasında sağlamanın daha kolay olacağını göstermektedir.

Kaliteyi tasarlamak, üretilmiş ürünü muayene ile iyi veya kötü olarak ayırmaktan ve kötü olarak ayrılmış ürünleri yeniden iyileştirip iyi ürün haline getirmekten çok daha ucuzdur. Bundan dolayı yeni felsefe düşük maliyetli, ancak yüksek kaliteli ürünleri üretebilmek için teknolojiyi ve istatistiki yöntemleri henüz tasarım aşamasında etkin bir şekilde kullanmak olmalıdır (Singh, 2012).

Kalite bir çok kişi tarafından toleransları sağlamak, sıfır hata veya yalnızca müşteri tatmini olarak tanımlanmıştır. Fakat bu tanımlar kalite ve bu kaliteyi sağlamak için gerekli maliyet arasındaki ilişkiye bir açıklık getirmemiştir. Ancak Taguchi'nin kalite anlayışı, kalite ile maliyet arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde tanımlamaktadır. Bu ilişki sadece üreticiyi ilgilendiren bir ilişki değil aynı zamanda müşteriye hatta toplumu ilgilendiren bir ilişkidir. Taguchi kaliteyi, “Ürünün, müşteriye ulaştıktan sonra toplumda meydana getirdiği kayıptır” şeklinde tanımlamıştır. Bir ürününün kalitesi söz konusu ürünün farklı performanslarının geliştirilmesi ile oluşur. Üründen beklenen özellikler, ürünün kalitesinde etkin rol oynayacağından tasarım aşamasında ortaya konmalıdır

Dr. Genichi Taguchi kaliteyi geliştirmek için temeli deney tasarımına dayanan, Taguchi yöntemi olarak bilinen deney tasarım yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemine, robust (gürbüz) tasarım ve ortogonal diziler gibi kavramların dahil edilmesiyle oluşturulmuştur. Üretim endüstrisindeki önemli gelişmelerinden bir tanesi de modern çevrim dışı kalite kontrol tekniklerinin ürün veya proses mühendisliğine uygulanması ile ilgilidir. Bu kalite tekniklerinin çoğu W.E. Deming tarafından şekillendirilmiştir. Taguchi yönteminin felsefesi bu kalite teknikleri üzerine kurulmuştur.

Taguchi'ye göre kalitenin sağlanabileceği en önemli nokta, üretim öncesinde yapılan tasarım faaliyetleridir. Taguchi yönteminin asıl amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Bunu sağlamak için, bu

değişkenliğe sebep olan kontrol edilebilir faktörler tanımlanmalı ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisinin en az olacağı ürün ve proses geliştirme süreci tasarlanmalıdır (Babu, 2011)

6.9.1. Taguchi felsefesi

Rekabetçi bir ekonomide işletmelerin yaşamını sürdürebilmesi için kalite geliştirme ve maliyet azaltma çalışmalarının sürekli olması gerekir. Çalışmaları sonucunda gereken oranda kar elde edemeyen firmalar varlığını sürdüremeyeceklerdir. Serbest piyasada satış fiyatının oluşmasında rakip firmaların benzer ürünlerinin satış fiyatı ile piyasa koşulları etkili olmaktadır. Bu nedenle bir işletmenin karını belirleyen en önemli faktörler işletmenin pazar payı ile üretim sürecidir. Pazar payını arttırmanın da en önemli yolu pazara, uygun fiyatta ve kaliteli ürünler sunabilmektir. Bu yüzden kalite önemlidir. Varlığını devam ettirebilen işletmeler, hiçbir zaman kalitesini yeteri kadar fazla, üretim maliyetini de yeteri kadar az olarak görmeyen işletmelerdir. Çünkü pazar koşullarının dinamizmi içinde müşteri beklentileri sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle işletmelerin kalite geliştirme ve maliyetlerin minimizasyonu çalışmaları sürekli olmalıdır. Taguchi ürün ve sürece ilişkin performans karakteristiklerini etkileyen faktörleri iki grupta toplamıştır. Bunlar, kontrol edilebilen faktörler ve kontrol edilemeyen (gürültü) faktörlerdir. Taguchi yönteminin amacı kontrol edilemeyen faktörlerden en az etkilenen, kontrol edilebilen faktörler kombinasyonunu oluşturmaktır. İstatistiksel deney tasarımları, ürünün performansındaki değişkenliğe etki eden parametrelerin etkilerini azaltmada kullanılabilir (Taguchi et al., 2005). Deney tasarımı daha önce geliştirilmiş olmasına rağmen, bu kavramı ürün performansındaki varyansın azaltılması için ilk uygulayan Taguchi olmuştur. Taguchi deney tasarımının kullanımının şu noktalarda önemli olduğunu belirtmiştir:

- Ortalama ya da hedef değerden olacak varyansın minimize edilmesi,
- Çevre koşullarına karşı gürbüz ürün üretilmesi,
- Parçalardaki varyansa karşı duyarlı olmayan ürünlerin üretilmesi,
- Ürünlerin ömür uzunluğu konusunda yapılan testler.

Bunlardan ilk üç tanesi Taguchi'nin parametre tasarımı adını verdiği kategorilerdir. Taguchi deney tasarımında, ürün ya da sürecin performans karakteristiğini etkileyen faktörleri ikiye ayırır (Logothetis and Wynn, 1994).

- Kontrol edilebilen faktörler (tasarım faktörleri), bunlar değerleri tasarım ya da süreç mühendisi tarafından kolayca belirlenebilen faktörlerdir.
- Kontrol edilemeyen faktörler (gürültü faktörleri), bunlar çoğu kez üretim ortamı ile ilişkili olan varyansın kaynaklarını oluştururlar.
- Genel performansı, ideal olarak, bunlardaki varyansa duyarlı olmamalıdır. Kontrol edilebilen faktörler kendi içinde üçe ayrılmaktadır.
- Sinyal faktörleri (hedef kontrol faktörleri): Bunlar söz konusu olan ortalama tepki düzeyini etkileyen faktörlerdir.
- Varyans kontrol faktörleri: Bunlar tepkideki varyansı etkileyen faktörlerdir.
- Maliyet faktörleri: Bunlar ortalama tepkiyi ya da varyansı etkilemeyen ve ekonomik koşullara göre belirlenen faktörlerdir.

Taguchi'nin felsefesi şu şekilde özetlenebilir (Fowlkes and Creveling, 1995)

- Üretilen bir ürünün kalitesine ait önemli bir boyut da o ürünün toplumda meydana getirdiği kayıptır.
- Rekabetin olduğu bir ekonomide kaliteyi sürekli geliştirmek ve maliyetleri azaltmak işletmenin kalıcılığı için zorunludur.
- Sürekli bir kalite geliştirme programı ürün hedef değerlerinden sapmaları sürekli azaltmayı içerir.
- Bir ürünün performansındaki bir sapmadan dolayı tüketicide meydana gelen kayıp yaklaşık olarak o sapmanın karesi ile orantılıdır.
- Üretilen bir ürünün nihai kalitesi ve maliyeti (geniş bir şekilde) ilgili ürünün tasarım mühendisliği ve üretim prosesi tarafından belirlenir.

- Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için ürünün performans karakteristikleri üzerinde etkili olan parametrelerin lineer olmayan etkilerini kontrol altına almak gerekir.
- İstatistiki olarak tasarlanmış deneyler ürün veya proseslere ait performans sapmalarını azaltmak için kullanılır.

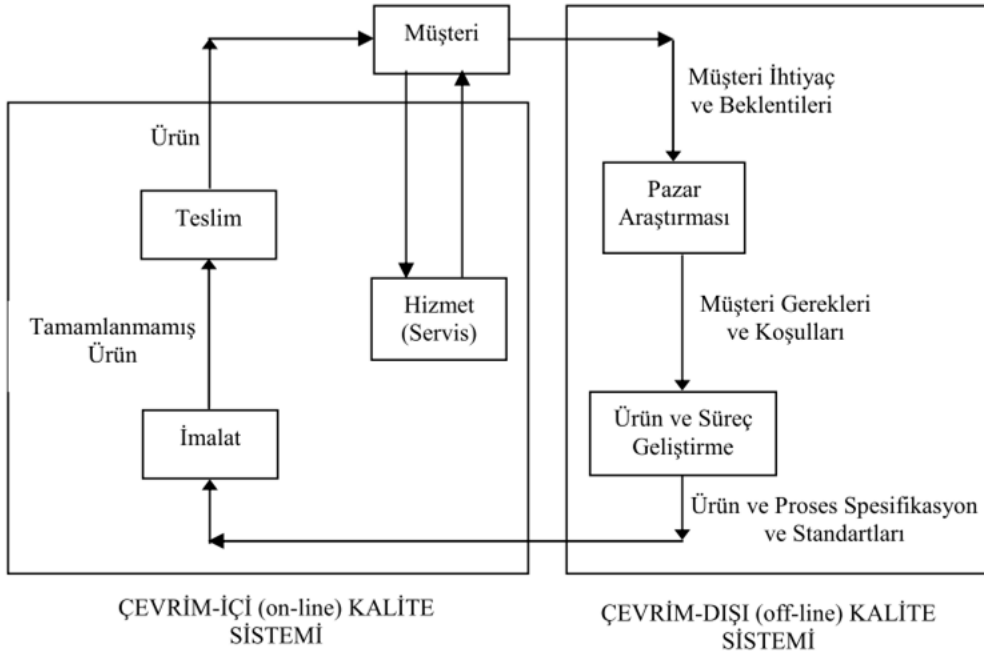
İkinci dünya savaşının sonlarına doğru, Japonya'nın günümüze kadar ki, hızlı gelişmesinin temelleri atılmıştır. Bu dönemdeki en önemli projelerden biri Japon telefon sisteminin geliştirilmesiydi. Projenin amacı ABD'nde Bell Laboratuvarları'nda kullanılan telefon sisteminin aynısının Japonya'ya kurulmasıydı. Ancak Japon Nippon Telefon ve Telgraf Araştırma Merkezi, Bell Laboratuvarları'nın ancak %2'si kadardı. Bu nedenle projenin bitirilmesinin 20 yıl süreceği tahmin ediliyordu. Genichi Taguchi, proje süresini kısaltmak amacıyla, tüm araştırma personeli için yöntemlerin standardize edilmesini ve faktöriyel tasarımların kullanılmasını önerdi. Kabul edilen önerisi sayesinde proje 4 yılda bitirilmiş ve Taguchi çok büyük bir üne kavuşmuştur. (Bayrakdar, 2009)

6.9.2. Taguchi yönetiminde kalite kontrol sistemi

Kaliteyi sağlamak için yapılan faaliyetler Taguchi tarafından on-line ve off-line olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. DT, Taguchi'nin kalite sisteminde, off-line kalite kontrol içinde, ürün ve proses tasarımı aşamalarında kullanılmaktadır. Bu durum Şekil 6.5'de gösterilmiştir (Peace, 1993; Taguchi, and Wu, 1985).

On-line kalite kontrol; ürün imalatı sırasındaki ve imalat sonrası, örneğin servis sırasındaki, kalite faaliyetlerini kapsar. İstatistiksel proses kontrolü ve çeşitli muayeneler, on-line kalite kontrol faaliyetlerindendir.

Off-line kalite kontrol; pazar araştırması ile ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler ürüne doğrudan müdahale yerine, üretimin başlamasından önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarıdır. Off-line kalite kontrol yöntemleri ürünlerin kullanım ömrü, üretim ve geliştirme maliyetlerini azaltarak, üretilebilirlik ve ürün kalitesini iyileştirmek için kullanılır.



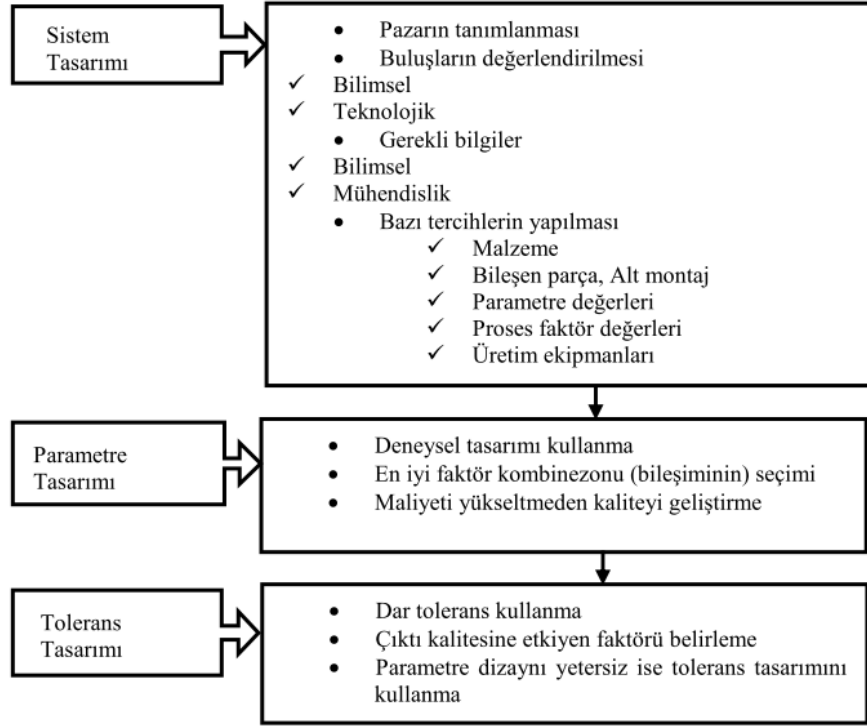
Şekil 6.5. Taguchi'nin üretim - kalite çemberi

Taguchi off-line kalite kontrolün her iki aşamasında da kalite güvenirliliğini sağlamaya yönelik 3 aşamalı bir yaklaşım getirmiştir. Kalite sağlama aşaması olarak hem ürün tasarımı için hem de proses tasarımı için tanımlanan kalite aşamaları; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı aşamalarıdır (Taguchi and Wu, 1985). Taguchi yönteminin sistematüğini oluşturan, kalite aşamaları Şekil 6.6'de gösterilmiştir.

6.9.3. Sistem tasarımı

Sistem tasarımı, prosesin ilk aşamasıdır. Bu aşamada tasarımcı tarafından ürünün istenen fonksiyonlarının sağlanabilmesi için teknolojiler tasarlanır ve ürün için en uygun olan bir tanesi seçilir. Üretilmesi düşünülen ürün ile ilgili pazarın tanımlanması, konu ile ilgili yapılan yeni buluşların değerlendirilmesi, mühendislik bilgilerinin toplanması, malzeme ve ekipmanla ilgili gerekli tercihlerin yapılması bu aşamanın konusunu oluşturur. Sistem tasarımında hem tüketici gereksinimlerinin hem de imalat süreci gereksinimlerinin anlaşılması gerekir. Bir ürün, tüketici gereksinimlerine

göre tasarlanmamışsa pazarlama aşaması zor olacaktır. Benzer şekilde imalat gereksinimlerini karşılayamıyorsa ürünün üretilmesi mümkün olmaz.



Şekil 6.6. Taguchi yönteminin sistematığı

Sistem tasarımı daha çok kavramsal yönlü bir aşama olduğu için mühendislik deneyimi gerektirir ve istatistiksel yöntemlerin bu aşamadaki rolü azdır. Kalitenin tasarımı ve geliştirilmesi çalışmalarına yatırıma hazırlık aşaması da denilebilir. Burada temel amaç üretim aşamasında spesifik limitler ve toleranslar dahilinde en küçük maliyetle mamul üretimini gerçekleştirmektir. Bunun için pazar araştırması, teknolojik gelişmeler ve bilimsel buluşlardan faydalanılabilir (Taguchi et al., 2005).

6.9.4. Parametre tasarımı

Parametre tasarımı; Taguchi'ye göre, ürün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapılabileceği aşama, hem ürün hem de proses tasarımı için parametre tasarımı aşamasıdır. Ürün parametre tasarımı, ürün

parametrelerinin, malzeme formülasyon değerleri, çeşitli boyutlar, yüzey örnekleri gibi, optimal değerlerin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Ürün parametre tasarımı ve proses parametre tasarımında temel amaç, üründe ve proseste varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin (parametrelerin) değerlerini optimal seçerek, ürün ve prosesteki varyasyonu en aza indirmektir. Taguchi, bu amaçla yapılan ürün ve proses tasarımına sağlam tasarım demektedir. (Bayrakdar, 2009; Byrne and Taguchi, 1987)

Burada sağlam, kontrol edilemeyen faktörlere, örneğin, nem, toz, ısı gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve proses anlamında kullanılmaktadır. Sağlam Tasarımda, kalitesizlik yaratan ve kontrol edilemeyen bir faktörün etkisi, kontrol edilebilen başka bir faktörün ayarlanması sonucu azaltılmaktadır. DT bu amaçla kullanıldığı zaman, maliyeti artırmadan kaliteyi geliştirmek mümkün olmaktadır.

Ürün ve proses parametre tasarım aşamalarında, optimal değerlerin belirlenmesi ve optimal ayarların yapılması gereken çok sayıda faktör vardır. Üstelik bu faktörlerin bir çoğu birbirleriyle etkileşim durumundadır. Bu kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin, ürün ve ürünün performansına olan etkilerinin belirlenebilmesi için en etkin yöntem istatistiksel DT yöntemidir. DT aracılığıyla, bir çok faktörün ürün üzerindeki etkisi ekonomik olarak (düşük maliyetle) belirlemek ve varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemleri tasarım aşamasına almak mümkün olmaktadır (Taguchi et al., 2005, Nair, 1992).

6.9.5. Tolerans Tasarımı

Tolerans tasarımı aşamasında, parametre tasarımı aşamasında oluşturulan kalite karakteristiğinin, toleranslarının ölçümü ve iyileştirilmesi yapılır. Parametre tasarımı aşamasında imalat maliyetlerini düşürebilmek için toleranslar oldukça geniş tutulur. Eğer parametre tasarımında değişkenlik istenen seviyeye düşürülmemişse tolerans tasarımına başvurulur.

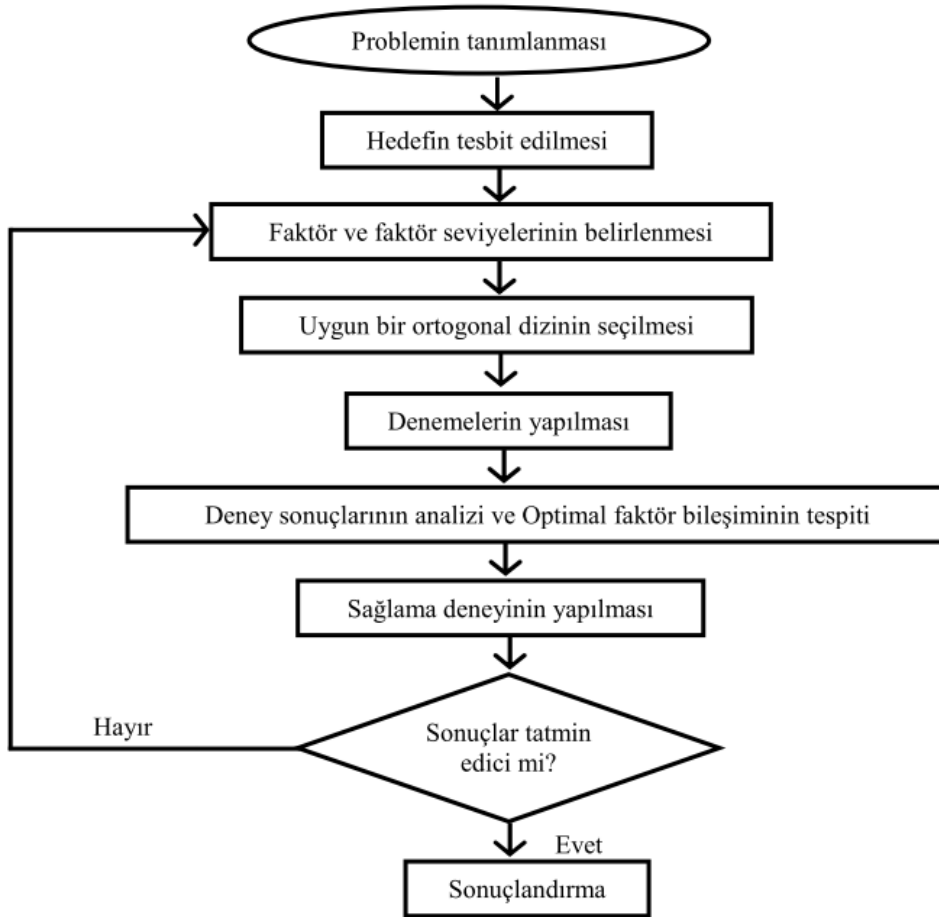
Tolerans tasarımı, daha yüksek bir ürün kalitesi ve daha güvenilir bir ürün fonksiyonu için toleransları daraltırken aynı zamanda maliyetlerinde artmasına neden olur. Bu yüzden tolerans tasarımı aşaması parametre tasarımı aşamasından sonra gelir. Böylece sadece gerekli olduğu durumlarda ve gerekli olduğu kadar tolerans tasarımı yapılarak ürün tasarımının maliyetinin artmaması istenir. Kalitenin parametre tasarımında sağlanması istenir. Çünkü parametre tasarımında kaliteyi sağlamak, tolerans tasarımına göre daha az maliyetlidir. Tolerans tasarımında değişkenlik, performans karakteristiği üzerinde önemli etkiye sahip olan faktörlerin toleransları ve maliyetleri dikkate alınarak hesaplanır. Toleransın dar olması imalat maliyetlerini, geniş olması da performans değişkenliğini arttırır. Parametre tasarımında düşük maliyetli, geniş ölçüde toleransa sahip bileşenler veya faktörler kullanılabilir. Değişkenliği istenilen değere düşürmek için bu bileşenlerin kalitesinin geliştirilmesi halen gerekiyorsa tolerans tasarımı gündeme gelir.

Tolerans tasarımında ürünlerdeki değişkenliğe katkısı en fazla olan faktörler belirlenir. Böylece bütün performans faktörlerinin toleranslarının sıkı olması yerine önemli bileşenlerin performans faktörlerinin toleransları küçük, diğerlerinin ki ise normal bırakılması sağlanır. Böylece tolerans tasarımı için maliyeti düşürülür. Tolerans tasarımı aşamasında toplam ürün varyansı üzerinden yapılacak olan tasarımlar hem maliyeti azaltır hem de kayıp fonksiyonu gibi bir çok alanda verilerin rahatlıkla kullanılmasına olanak sağlar. Tolerans tasarımı, faktör varyansı ile ilgilenilen performans karakteristiği varyansı arasındaki ilişki üzerine kuruludur. Bir miktar ilave harcama yapılarak performans karakteristiğinin varyansı azaltılırsa (kalitesi geliştirilirse) performans varyansı da azalacaktır. Sonuçta birim başına olan toplumsal kayıp da azalacaktır. Bir ürün veya prosesin kalite karakteristiğini belirleyen iki temel özelliği vardır. Bunlardan birincisi ürünün hammaddesinin kalitesi, diğeri ise imalatı sırasında kullanılan yöntem ve bileşen parçalarıdır. Bu yüzden tolerans tasarımı aşamasında kullanılacak ölçüm aletlerinin seçimi ve kalibrasyonu önemlidir. (Taguchi et al., 2005; Phadke; 1989).

6.9.6. Taguchi yönteminde parametre tasarımı

Genichi Taguchi sağlam parametre dizaynının öncülerinden biri olarak kabul edilmektedir, parametre dizaynı, üretim ve proses dizaynı sırasında,

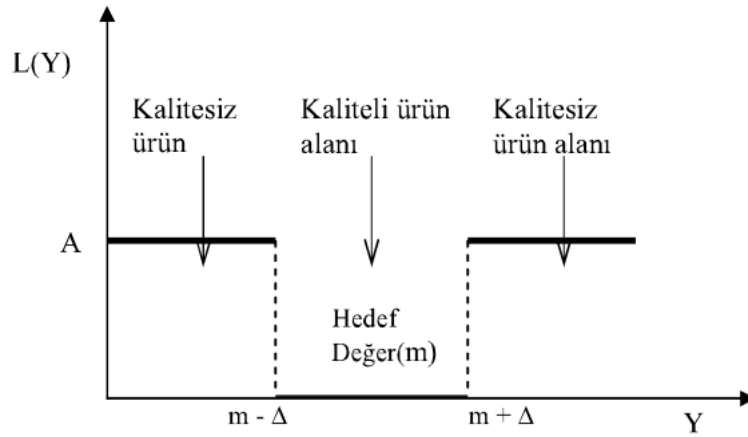
varyasyon ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı olan duyarlılığın azaltılması için kullanılan bir mühendislik yöntemidir. Taguchi dizaynları uygun bir şekilde kullanıldığı takdirde, çeşitli çalışma koşullarında çok güçlü ve etkili bir yöntemdir. Sağlam parametre tasarımında temel amaç, proses hedef değerini korurken varyasyonu minimize edecek faktör seviyelerini belirlemektir. Varyasyona etki eden faktörleri belirledikten sonra, kontrol edilebilir faktörler üzerinde ayarlamalar yapılabilir. Kontrol edilemeyen faktörler ise değişiklikler karşı duyarsız hale getirilmeye çalışılır. Proses tasarımında temel amaç, sürekli aynı çıktıyı üretmektir. Üretim dizaynında ise temel amaç, çevre faktörlerine rağmen sürekli bir performans ölçüsü yakalamaktır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Parametre tasarımı akış şeması

6.9.7. Taguchi kayıp fonksiyonu

Taguchi'nin kalite felsefesinin dayandığı temel nokta kayıp fonksiyonudur. Kayıp fonksiyonu, ürünlerdeki kalitesizlikten dolayı meydana gelen tüketici memnuniyetsizliğinin derecesini belirleyen sürekli bir fonksiyondur (Ross 1989). Kayıp fonksiyonu, kalitenin parasal açıdan değerlendirilmesini sağlar, buna göre dağılımın orta değeri en az, uç değerleri ise en fazla kayba neden olmaktadır. Kayıp tüketici memnuniyetsizliği olabileceği gibi üreticiye gelen ilave işçilik, malzeme, enerji ve garanti giderleri de olabilir. Bunların yanı sıra firma adının kötü bir şöhret kazanması ve uzun dönemdeki pazar payındaki azalmalarda kayıp olarak değerlendirilebilir. İstenen kalite düzeyinden (hedeften) uzaklaştıkça kalitesizlikten meydana gelen maliyet artacaktır. Ürün performansının güvenilirliği ve sürekliliği azalmasından dolayı en büyük zararı tüketici dolayısıyla toplum görmektedir. Düşük kalite, tüketiciyi beklentilerini karşılayacak başka ürünler aramaya yöneltecektir. Bu durumda toplumda meydana gelen kayıp aynı zamanda işletmeyi de etkileyecektir. Bu yüzden kalite önemlidir. İşte bundan dolayı ürünler kaliteli veya kalitesiz olarak iki grupta ele alınan bir basamak fonksiyonu değil (Şekil 6.8), sürekli bir fonksiyon ile değerlendirilmelidir.

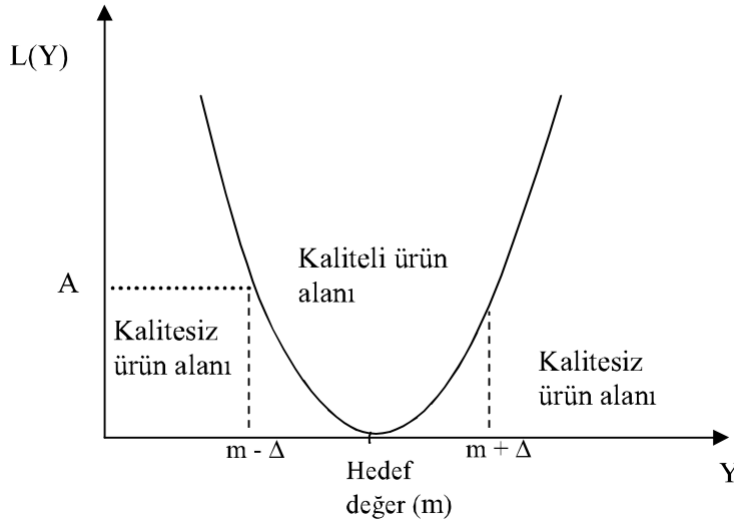


Şekil 6.8. Geleneksel kayıp fonksiyonu

Taguchi, bir ürünün sahip olması gereken saymaca ya da hedef ölçülerden sapma miktarını, bütün toplumun uğrayacağı maddi zarar ile ilişkilendirmiş ve bunu matematiksel olarak eşitlik (6.1)'deki gibi ifade etmiştir. (Phadke 1989).

$$L(y) = k(y - T)^2 \quad (6.1)$$

Burada, y performans karakteristiğinin (kalite değişkeni/kriteri) ölçülen gerçek değeri, T nominal ya da hedef değer, k ise sapmayı parasal bir birime dönüştürecek uygun bir katsayıdır. Gerçek ölçü değeri ile hedef değer arasındaki fark yani değişkenlik topluma kuadratik şekilde artan bir zarar olarak dönmektedir (Şekil 6.9).



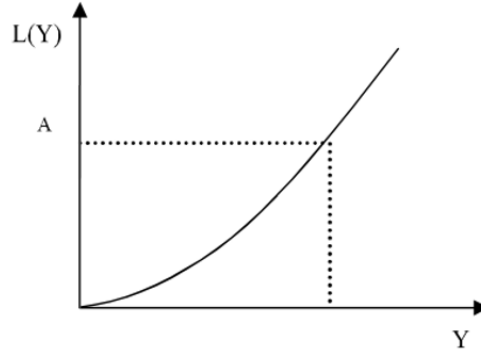
Şekil 6.9. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu (Ross,1989)

Kayıp fonksiyonunun biçimi, performans karakteristiği (Y)'nin özelliğine göre belirlenir. Y 'nin özelliğine göre kullanılan kayıp fonksiyonları bazı durumlarda simetrik, bazı durumlarda simetrik olmayan bir yapı gösterir. Taguchi'nin geliştirdiği kayıp fonksiyonlarından en çok kullanılanları şu şekilde sıralanabilir.

Hedef değer en iyi : Eşitlik 6. 1'de ifade edilen temel kayıp fonksiyonudur.

En küçük en iyi : Simetrik olmayan bir kayıp fonksiyonu türüdür. Hedef değer m 'nin en küçük değer olan '0' değerini aldığını kabul edilirse kayıp fonksiyonu eşitlik (6.2)'deki gibi yazılabilir. (Şekil 6.10)

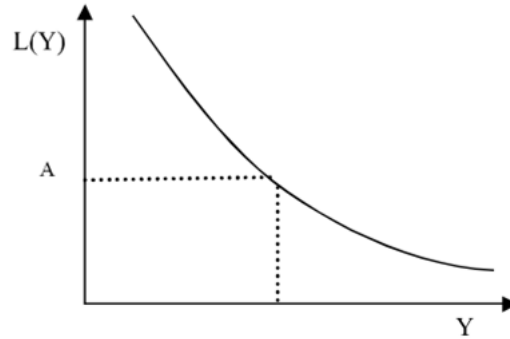
$$L(y) = ky^2 \quad (6.2)$$



Şekil 6.10. "En küçük en iyi" kayıp fonksiyonunun grafiksel gösterimi

En büyük en iyi : Bu da simetrik olmayan bir kayıp fonksiyonu türüdür. Burada amaç hedef değerin maksimum (sonsuz) olmasıdır. Burada hedef değerin sonsuz değerini aldığı kabul edilirse, kayıp fonksiyonu eşitlik (6.3)'de gösterildiği gibi yazılabilir (Şekil 6.11) (Taguchi et al., 1989)

$$L(y) = ky^{-2} \quad (6.3)$$



Şekil 6.11. "En büyük en iyi" kayıp fonksiyonunun grafiksel gösterimi

6.9.8. Performans karakteristiği (kalite karakteristiği)

Performans karakteristiği, bir ürün veya prosesin kalitesini belirleyen özellikleridir. Taguchi yönteminin amacı, bu karakteristiklerin hedef değer etrafındaki değişkenliğini azaltmaktır. Bir ürünün birden fazla performans karakteristiği olabilir. Bu karakteristiklerin her biri ürünün ayrı bir özelliğini

temsil eder. Bu özelliklerin içinden tüketici gereksinimlerine göre ve ürünün kullanım amaçlarına göre en uygun olan özellik performans karakteristiği olarak seçilmelidir. Yüksek kaliteli bir ürün, ekonomik ömrü boyunca farklı çalışma koşulları altında fonksiyonunu daima hedef değer civarında yerine getirir. Performans karakteristiğinin hedef değer civarındaki değişkenliği performans değişkenliği olarak adlandırılır. Hedef değer civarında daha küçük performans değişkenliği daha iyi kalite anlamına gelmektedir. Performans karakteristiğinin etkin olarak değerlendirilmesi için sürekli olarak ölçülmesi gereklidir. Çünkü ancak bu şekilde kalitedeki çok küçük değişiklikler belirlenebilecektir. Bazı durumlarda performans karakteristiğinin ölçümleri sürekli olarak yapılamayabilir. Böyle durumlarda yaklaşık bir sürekli dağılım elde edebilmek için, ölçüm değerlerinin sayısı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır (Şanyılmaz 2006)

6.9.9. Performans istatistiği ve sinyal / gürültü (S/N) oranı

Performans istatistiği, kontrol edilebilen faktörlerin farklı seviyelerinin karşılaştırılıp en uygun faktör-seviye kombinasyonunun seçilmesini sağlayan bir değerlendirme yöntemidir. Taguchi'nin kontrol edilebilen faktörlerin ve kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisini ölçmek için ortalama ve standart sapma ile birlikte kullandığı performans istatistiklerinden bir tanesi de Sinyal/Gürültü (Signal to Noise – S/N) olarak adlandırılan performans istatistiğidir (Taguchi, 1990).

Verilerin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak ve toplanabilirliğini sağlamak için genellikle performans istatistiği olarak ortalama yerine S/N oranını kullanılır. Böylece, ortalama ile standart sapma, aynı analiz tekniği ile analiz edilmiş olur. S/N oranı en basit ifade ile ortalamanın standart sapmaya oranı olarak kabul edilir. Bu oranın kullanılması, performans karakteristiğinin ölçülmesinde ortalama veya standart sapmanın tek tek kullanılmasına göre daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar (Box, 2010).

S/N oranı ile hem ortalama, hem de ortalamanın etrafındaki değişkenlik kontrol edilebilmektedir. Ortalama dikkate alınmadığında varyans tek başına bir anlam taşımayacağından S/N oranı bulunurken dikkat edilmesi gereken nokta, ortalama ve varyansın aynı anda kontrol edilmesidir. Kontrol edilemeyen faktörleri tam olarak ölçmek çok zor veya imkansız olduğundan

Taguchi S/N oranını hesaplarken, kayıp fonksiyonunda olduğu gibi yaklaşık fonksiyonlar kullanılmaktadır. S/N oranının yapısına (sürekli veya kesikli oluşuna ve statik veya dinamik oluşuna) göre farklı S/N oranları vardır.

Taguchi'nin performans karakteristiğinin olması istenilen durumlarına göre geliştirdiği S/N oranları içerisinde en fazla kullanılan 3'ü aşağıda verilmektedir (Phadke, 1989; Ross 1996).

- Performans karakteristiğinin “Hedef değer en küçük” olduğu durumda (gürültü, zararlı maddeler, kirlenme vb.). Bu tür problemlerde, performans karakteristiği y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda S/N oranı eşitlik (6.4)'de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.4)$$

- Hedef değer en büyük (güç, mukavemet vb.). Bu durumda y'nin hedef değeri sonsuzdur ve S/N eşitlik (6.5)'deki gibi tanımlanır.

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6.5)$$

- Hedef Değer En iyi (ürün boyutları, elektrik voltajı vb.). Bu tür problemlerde, y için belli bir hedef değer verilmiştir. (Eşitlik (6.6))

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (6.6)$$

Yukarıda S/N oranları için belirtilen eşitliklerde “y” performans karakteristiği değerini, “s²” ise varyansı ifade etmektedir.

S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülmektedir. Analizlerde S/N'nin en büyük değeri daha tercih edilir durumu belirtmektedir.

S/N oranı, çok sayıda tekrarı mevcut varyasyonu yansıtan tek bir değerle birleştirir. Her üç tip problemde de, amaç S/N oranını maksimize etmektedir. Taguchi'ye göre, S/N oranlarının maksimize edilmesi, bir yandan sinyali artırırken, diğer yandan da değişkenliği azaltmaktadır. (Baynal, 2003; Lochner and Matar, 1990; Durmaz, 2008)

- S/N oranlarının bir kaç farklı şekli, optimizasyon prosesinin amaçları esasına göre kullanılır. Bununla beraber bütün S/N oranları aşağıdaki özelliklere sahiptir
- S/N oranı, gürültü faktörleriyle neden olunan sistem yanıtındaki değişkenliği gösterir.
- S/N oranı ortalamanın düzeltilmesinden bağımsızdır. Bu ölçüm (metrik) hedef değer değişse bile kalitenin tahmininde faydalı olacaktır.
- S/N oranı nispi kaliteyi ölçer; çünkü karşılaştırma amaçları için kullanılmaktadır.
- S/N oranı, ürün kalitesinde pek çok faktörün etkileri analiz edildiği zaman kontrol faktörleri etkileşimi gibi gereksiz karmaşıklıklara neden olmaz.

6.9.10.Taguchi yönteminin temel çalışma biçimi

Taguchi Yöntemi, çok sayıda faktörün bağlı olduğu ürün ve prosesin kalitesini artırmak için geliştirilmiştir. Her bir faktörün izin verilen aralıklar içerisinde tüm olabilecek kombinasyonları etkili bir biçimde bu test ve geliştirme stratejisi içerisinde kurulabilmektedir. Mühendislik projeleri çok sayıda faktör içerdiği için, bir grup olabilecek kombinasyon denenemeyecek kadar geniştir. Üstelik özel projeler için etkili faktörler arasında etkileşimlerin olması deneme sayısını artırmaktadır. Taguchi faktöriyel deneyler için özel bir tasarım geliştirmiştir. Bu tasarım ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Bu tasarımların kullanılması verilen faktörlerin en az sayıda deneyle incelenmesine olanak tanımaktadır. (Kamber, 2008)

Tüm faktörlerin sabit seviyeli olduğu ve etkileşimlerin önemsiz olduğu durumlarda standart ortogonal diziler kullanılmaktadır. Faktörlerin karışık seviyeli olduğu ve etkileşimlerin inceliği durumlarda ortogonal dizilerin modifiye edilmesi gerekmektedir.

İçerisinde çok sayıda faktörün olduğu ilk deney tasarımı planının geliştirilmesi İngiliz Sir R. A. Fisher tarafından 1920 yılında yapılmıştır. Bu yöntem genelde faktöriyel tasarım olarak bilinir.

Tam faktöriyel tasarım verilen deney seti için tüm olanaklı kombinasyonları denemektedir. Çoğu endüstriyel deney genellikle çok sayıda faktör içerir. Tam faktöriyel tasarımda çok geniş bir deney seti incelenir. Örneğin tam faktöriyel tasarımda 7 faktörlü ve her bir faktörün 2 seviyeli olduğu bir deney için tam 128 deneye ihtiyaç vardır.

Kısmi faktöriyel tasarımda deney sayısını azaltmak için tüm kombinasyonlar arasından belirli grup seçilerek o grup üzerinde inceleme yapılır. Kısmi faktöriyel tasarım iyi bir kestirme yol olarak bilinse de uygulamalar ve analiz için belirli kuralı yoktur. Taguchi yöntemi bu konuda iki önemli boşluğu tamamlamaktadır. Bunlar;

- Deney koşullarına uygun olarak seçilebilecek OD'ler net bir şekilde tanımlanmıştır.
- Sonuçların analizinde standart yöntemler belirlenmiştir.

Taguchi yaklaşımı standart deney tasarımı tekniklerinin ve analiz yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Bu kombinasyon diğer istatistiksel yöntemlerde nadiren bulunan tutarlılık ve yeniden üretilebilirlik özelliklerini taşımaktadır. Taguchi yönteminde bütün kombinasyonların denendiği tam faktöriyel tasarımda, faktör seviyesi arttıkça, deney sayısı 2 seviyeli deneylerde ikinin kuvvetleri şeklinde artmaktadır.

Farklı faktör ve seviyeli deneyler için tam faktöriyel tasarım ve Taguchi yöntemi için gerekli deneme sayıları Çizelge 6.6'da verilmiştir. Burada deney sayılarındaki farklılık bariz bir şekilde görülmektedir (Mitra, 2011).

Çizelge 6.6. Taguchi ve tam faktöriyel tasarım için kombinasyonlar

Faktör	Seviye	Deney sayıları	
		Tam faktöriyel tasarım	Taguchi metodu
2	2	$4 = 2^2$	4
3	2	$8 = 2^3$	4
4	2	$16 = 2^4$	8
7	2	$128 = 2^7$	8
15	2	$32768 = 2^{15}$	16
4	3	$81 = 3^4$	9

6.9.11. Deney Tasarımı

Deney tasarımı içerisinde geçen tasarım kelimesi zihinsel olarak yapılan proje veya planları ifade etmektedir. Tasarım farklı koşullarda gerçekleştirilebilir. Mühendislikte tasarım denildiği zaman genelde ürün tasarımı ve proses tasarımı akla gelir (Şirvancı, 1997).

Deney tasarımı yapılmadan önce ürün ve proses hakkında mutlaka yeterli bilgiye sahip olunmalıdır. Deneyde kullanılacak faktörlerin ve onların çıktı üzerine etkileri tanımlanmalıdır. Faktörler hakkında ayrıntılı bir bilgiye sahip olmak için genelde o konu ile ilgili tüm insanlardan bilgi alınır. Taguchi tüm faktörlerin ve bunların seviyelerinin tespit edilmesi için beyin fırtınası tekniğini önemli bir adım olarak görmüştür.

Taguchi tasarımı seçilirken kontrol faktörü sayısı, her bir faktörün seviye sayısı, deney çalıştırma sayısı ve diğer şartların sisteme etkileri (maliyet, zaman, üretebilme durumu) göz önüne alınmalıdır.

Deneyler statik ve dinamik sonuçlu olmak üzere 2 türlü yapılabilmektedir. Statik sonuçlu deneylerde kalite değişkenleri sabit seviyedir. Dinamik sonuçlu deneylerde ise kalite değişkenleri verilen değer aralıklarındadır (Şirvancı, 1997).

6.9.11.1. Statik Sonuçlu Tasarım;

Taguchi yönteminin başlıca 2 amacı vardır. Bunlar;

- Kalite değişkenini hedefe mümkün olduğunca yaklaştırmak.
- Varyansı, yani hedef değerden sapmayı minimize etmektir.

Statik sonuçlu tasarımlar kalite değişkeninin sabit seviyeli olduğu tasarımlardır. Bu tür tasarımlarda hedef değerden sapmayı minimize etmek için bir değişim ölçüsü gerekmektedir. İşte bu noktada Taguchi deney sonuçları arasındaki farklılığı minimize etmek için S/N oranlarını geliştirmiştir.

Statik bir tasarımda Taguchi tarafından belirlenmiş S/N oranları, sistemden istenen amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Bu aşamada iyi bir mühendislik bilgisi ve sistemin iyi analiz edilmesi çok önemlidir. (Kamber, 2008)

6.9.11.2. Dinamik Sonuçlu Tasarım

Kalite değişkeninin sabit bir sayı değil de, belirli bir değer aralığında olduğu tasarımlardır. Dinamik sonuçlu bir deney, işleme başlama anı ile sonuç arasındaki fonksiyonel ilişkiyi analiz etmek ve geliştirmek için kullanılır. Genel olarak gürültü faktörünün, kalite değişkenlerinin sistemin giriş anma bağlı olarak belirli değerler aldığı durumlarda kullanılır. Buna örnek olarak otomobilin ivmelenmesi verilebilir. Burada işleme başlama anı, otomobilin gaz pedalına basılmasıdır ve dinamik sonuç otomobilin hızıdır. İdeal olarak işleme başlama anı ile sonuç arasında doğrusal bir ilişki olması gerekir. Duyarsızlık bu ilişki içerisinde gürültü faktörleri yüzünden minimum varyasyona ihtiyaç duyar. Bu yüzden dinamik tasarımlar da mümkün olduğunca deneme sayısı fazla tutulmalıdır (Şirvancı, 1997).

6.9.12.Taguchi yönteminin uygulama prosedürleri

Deney planları Taguchi tarafından parametre dizaynı olarak tanımlanmakta olup, amacı ürün veya proses parametrelerinin, ürün özelliklerinin optimum seviyeye erişmesini sağlayan ve gürültü faktörlerine karşı en az etkileşimde bulunan değerlerin ortaya konulmasıdır (Şirvancı, 1997). Bir optimizasyon çalışması 5 ana bölümden oluşur (Phadke,1989). Bunlar;

1. Deneylerin planlanması,
2. Deneylerin yapılması,
3. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi,
4. Deney sonuçlarının doğrulanması,
5. Standartlaştırmadır.

Taguchi yönteminin uygulama prosedürleri sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Kamber, 2008):

1. Problemin belirlenmesi.
2. Hedeflerin belirlenmesi.
3. Kalite değişkenleri ve ölçüm sisteminin belirlenmesi.
4. Kalite değişkenlerini etkileyen faktörlerin seçimi ve seviyelerinin tespit edilmesi.
5. Faktörlerin kontrol ve hata faktörleri olarak ayrılması.
6. Etkileşimlerin belirlenmesi.
7. Uygun ortogonal dizinin seçimi.
8. Ortogonal dizi Seçimi
9. Kontrol faktörleri ve etkileşimlerin sütunlara atanması.
10. Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi.

6.9.12.1. Problemin belirlenmesi.

Sistemdeki problemin belirlenmesi ve net bir şekilde ifade edilmesi, deney tasarımındaki en önemli adımı oluşturmaktadır. Çünkü bütün deney bu basamağın çıktıları üzerine inşa edileceğinden yapılacak hata tekrar başa

dönülmesine sebep olabilecektir. Daha önce karşılaşılan herhangi bir problemin çözümünde veya Kaizen felsefesi gereği yapılan sürekli kalite geliştirme çalışmalarında tespit edilmiş herhangi bir aksaklık üzerinde durularak problem tespit edilmektedir.

Bu konuda yapılan en büyük hata, yönetim, mühendislik, ve pazarlama gibi, bir sistem içindeki farklı bölümler arasındaki yanlış anlamalar ya da ifade yetersizlikleridir. Sistem ya da ürünle ilgili olan her tarafın görüşü alınmalıdır. Özellikle imalat sistemlerindeki problemlerin tespitinde bizzat ürün ve imalat ile ilgili müşteri, tedarikçi ve operatör gibi grupların görüşlerine eksiksiz yer verilmelidir. Gerçek problem araştırılmalı, problemin belirtilerinin problemmiş gibi algılanmasından kaçınılmalıdır. Sorunlar, çoğu zaman ideal durum ile gerçek durum arasındaki farktan ileri gelmektedir. Genellikle ürün uygunsuzlukları veya verimsizlik (makina arızaları, yüksek enerji sarfiyatları ya da ıskarta ürünler) şeklinde, piyasa, müşteri ya da operatör şikayeti olarak karşımıza çıkarlar. Örneğin bir prosesten her zaman tasarımıdaki toleranslar dahilinde ürün çıksa bile ürünler arasındaki değişkenliğin büyük olması bir sorundur ve azaltılması için bir deney tasarımı gerçekleştirilebilir. Sorunların tespitinde Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment (QFD), Pareto analizi, beyin fırtınası öncelikli başvurulacak yöntemlerdir (Şanyılmaz 2006).

6.9.12.2. Hedeflerin belirlenmesi

Her işletmenin kendine göre belli hedefleri vardır. Bunlar belli bir üretim sayısına ulaşmak, müşteri beklentilerini karşılamak. maliyeti düşürmek vb. olabilir. Bu noktada Taguchi yönteminin uygulandığı bir yerde de başlıca iki hedef vardır. Bunlar;

- kalite değişkeninin istenilen değere getirilmesi ve
- varyasyonun düşürülmesidir. (Kamber, 2008)

6.9.12.3. Kalite karakteristiklerinin tespiti

Ürünün müşteri tarafından istenilen fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için gerekli ve kalitesini belirleyen özelliklerine kalite değişkeni (karakteristiği) denir. Ürün ya da prosesteki problemin tespitinin ardından, sistemde sorgulanacak çıktı niteliğindeki kalite karakteristiği tespit edilmelidir. Ayrıca kalite değişkenlerinin ölçümü için gerekli aletlerin seçimi ve ölçme yöntemleri ilgili mühendislik birimlerine başvurularak belirlenir.

Örneğin araç boyama prosesinin iyileştirilmesine yönelik bir problem için kalite karakteristiği boya kalınlığı ya da boyama süresi iken araç boyama prosesindeki değişkenlik probleminin kalite karakteristiği boya kalınlığı değişkenliği olabilir. Kalite karakteristiği seçilirken prosesin niteliği dikkate alınmalıdır. Ürünün taşınması, sağlaması beklenen kalite karakteristiği bir sistem için bir ya da daha fazla olabilir. Ancak birden fazla kalite karakteristiği seçilmesi halinde analiz ayrı ayrı yapılmalı, sonuçlar gerekirse daha sonra bir ağırlık çarpanı kullanarak birleştirilmelidir (Şanyılmaz 2006).

Varyasyon; kalite konularına ilişkin olarak varyasyon, hedef değerden sapma olarak tanımlanabilir. Üretim faktörleri deneyde belirtilen seviyelerde yapıldığı takdirde bu değişkenlerin ortalama değeri optimize olacaktır. Fakat ürünün kalitesi, grup ortalamasından daha çok, grup dağılımıyla temsil edilir. Örneğin, kaynak mukavemetinin ortalama değeri, minimum spesifikasyon sınırının üstünde olduğu halde, grubun önemli bir yüzdesi (%30 - 40 gibi) muayeneyi geçemeyip reddedilebilir (Şirvancı, 1997).

6.9.12.4. Faktörlerin ve seviyelerinin seçimi

Faktörlerin seçimi ve faktör seviyelerinin tespiti işlemi, o işle uğraşan kişiler ve o alanda uzmanlaşmış teknik personel tarafından yapılır. Bu aşamada en iyi yöntem beyin fırtınası tekniğidir. Ayrıca akış şeması ve sebep-sonuç diyagramlarının da incelemesi faktör ve faktör seviyelerinin belirlenmesinde büyük fayda sağlar.

Beyin fırtınası, işletme problemlerine çözüm aranırken ilgili personelin bir araya gelip, her birinin konu hakkındaki kanaat ve çözüm önerilerini dile getirdiği bir toplantıdan ibarettir. Bu etkin toplantıya her seviyeden iş gören

katılabilmektedir. Görüşler ifade edildikten sonra oylama usulü ile etkin çözüme doğru yol alınır. Oylamaya her görüş dahil edilir. Yöntem kullanılarak kalite değişkeni üzerinde etkili olan faktörler belirlenir. Mevcut yöntemler arasında en etkin olanı çoğunlukla bu yöntem olmaktadır (Şirvancı, 1997).

6.9.12.5. Kontrol ve gürültü faktörlerinin tespiti

Kontrol faktörleri, ürün ya da proses üzerinde etkili olduğu varsayılan kontrol edilebilir girdilerdir. Deneysel tasarımdan maksat bu faktörlerin farklı seviyelerini kullanarak, kalite karakteristiğini ne şekilde etkilediklerini tespit etmektir. Sistem üzerinde etkili olması muhtemel, sıcaklık, nem gibi kontrol edilmesi güç ya da kontrol edilmesi düşünülmeyen faktörler ise gürültü faktörleri olarak adlandırılır. Gürültü faktörleri kısa bir süreliğine kontrol altında tutulabilir ancak sürekli kontrolleri oldukça pahalıdır.

Taguchi yaklaşımının önde gelen getirilerinden biri de gürültü faktörlerinin ürün ya da proses üzerindeki etkisini minimize ederek her koşulda gürbüz bir tasarım elde etmektir. Kontrol ve gürültü faktörlerinin tespiti, oldukça önemli bir basamaktır. Beyin fırtınası, sebep-sonuç diyagramları ve akış şemaları kullanılarak yapılacak tespitte bir faktörün gözden kaçması ya da önemsenmemesi tamamen yanlış bir tasarım ile sonuçlanabilir. Kontrol ve gürültü faktörleri sıcaklık, basınç, zaman, hız, akım gibi sayısal büyüklükler şeklinde ifade edilebilen sürekli faktörler olabileceği gibi, malzemenin cinsi, bir durumun varlığı veya yokluğu gibi soyut faktörler de olabilirler.

6.9.12.6. Faktör seviyelerinin tespiti

Faktör; deneyde ilgilenilen olay üzerindeki etkileri incelenen kontrollü veya kontrolsüz değişkenlerden her biridir. Faktör; ısı derecesi, saniye birimindeki zaman gibi nicelik olabileceği gibi, farklı tezgâhlar, farklı operatörler, anahtarın kapalı/açık olması durumlarındaki gibi nitelik de olabilir.

Bir faktörün seviyeleri, deneyde incelenmekte olan faktörlerin alabileceği değerlerdir. Nicelik faktörlerinde seçilen her bir değer, bir seviye şekline gelir. Örneğin eğer deney dört farklı ısıda yapılacaksa, ısı faktörünün dört

seviyesi vardır. Nitelik faktörlerinde ise anahtarın açık veya kapalı olması anahtar faktörünün iki seviyesini göstermektedir.

Deneyde ilk önce performans karakteristiklerini etkileyeceği düşünülen tüm faktörler göz önünde bulundurulur. Tarama deneylerinde az seviyesi olan çok sayıda faktör kullanımı tercih edilmelidir, çünkü ilk deneyin amacı bazı önemsiz faktörleri elemine etmek ve mamulün problemi ile ilgili ya da kalite değerini arttırmaya katkıda bulunan önemli birkaç faktörü belirlemektir (Ross, 1996). Ancak faktörler arasında soyut faktörler yer alıyorsa bu faktörlerin tarama deneylerinde 3 seviyeli olarak denenmesi uygun olacaktır.

Performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin kaç değişik seviyede inceleneceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Faktörlerin kademeleri en az iki olmak üzere üç veya daha çok olabilir. Ancak seviyeleri iki veya üç olarak belirlemek büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

6.9.12.7. Etkileşimlerin belirlenmesi

Taguchi Tasarımları esas olarak faktörlerin ana etkileri üzerinde çalışmak için tasarlanmıştır. Fakat istenirse 2 yönlü etkileşimler üzerinde de çalışılabilir. İki faktörün etkileşimli olması, faktörlerden birinin etkisinin diğerine bağımlı olmasıdır. A faktörünün etkisinin B faktörünün etkisini değiştirmesi gibi. Bu durum $A \times B$ şeklinde gösterilir. Örneğin sıcaklıkla nem arasında insan rahatlığı açısından güçlü bir etkileşim vardır. Sıcaklıktaki bir artış küçük bir rahatsızlık verebilir fakat nem artıçça rahatsızlık daha fazla artar. Deneyler yapılmadan önce faktörler arasında etkileşim olup olmadığı sadece o zamana kadar elde edilmiş bilgi ve tecrübelerle tahmin edilebilir. Bu noktada çok dikkat edilmelidir. Aksi takdirde tüm sonucu etkileyecek yanlış kararlar alınabilir.

6.9.12.8. Ortogonal diziler

Ortogonal düzen ilk kez 1897'de Fransız matematikçi Jacques Hadamard (1865-1963) tarafından matematiksel bir buluş olarak ortaya konmuştur. Ortogonal diziler temel olarak hangi denemede hangi faktörün hangi seviyesinin kullanılacağını belirler. Genellikle yapılan deneysel çalışmalarda çok sayıda faktörler ve seviyeler bulunduğu için deneylerin

gerçekleştirilmesi çok fazla zaman ve maliyet kaybına neden olmaktadır. Taguchi yöntemi bir tür kesirli faktöriyel tasarımıdır. Deneylerin tüm kombinasyonlarının denenmesi yerine ortogonal dizileri kullanarak sadece bir kısmının yapılmasıyla, en iyi performans karakteristiği değerini veren faktör seviyelerinin bulunabileceğini ifade eder. Ortogonal diziler faktöriyel tasarımdan farklı olarak faktör seviyelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme yaparak deney sayısını azaltır. Ortogonalite kavramı istatistikte denge anlamında kullanılmaktadır. Yani ortogonal dizinin sütunlarına atanan faktörlerin her seviyesi eşit sayıda yer alır. Bu da her ikili faktör grubunun kendi aralarında bir faktöriyel tasarım oluşturmaya ve aralarındaki ilişkinin belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Ortogonal diziler kullanılarak, diğer yöntemlerle mümkün olmayacak kadar çok sayıda faktörün etkisi aynı anda incelenebilir. Ortogonal diziler kullanılarak yapılan bir deney tasarımı faktöriyel deney tasarım kullanılarak yapılan bir deney tasarımının %90'ı kadar etkili olduğu bilinmektedir. Öte yandan ortogonal diziler, etkisi araştırılan temel faktörler arasında oluşabilecek bazı etkileşim faktörlerinin performans karakteristiği üzerine olan etkisini yok saydığı için tam faktöriyel deney tasarımına göre az da olsa bir hata olasılığına sahiptir. Ancak bu hata olasılığı deney maliyetlerinde yapılan tasarrufa göre önemsiz bir kayıp olarak değerlendirilmektedir (Taguchi and Konishi, 1987)

Taguchi, deney tasarımlarını seviye sayılarına göre tek seviyeli tasarımlar ve karışık seviyeli tasarımlar olarak ikiye ayırmıştır. Tek seviyeli tasarımlar, tüm faktörlerin aynı seviye sayısına sahip olduğu tasarımlardır. Karışık seviyeli tasarımlar ise faktörlerin seviye sayılarının farklı olduğu tasarımlardır. Ortogonal diziler bir sayı matrisi olarak ifade edilir. Her satır seçilen faktörlerin seviyelerini, her sütun ise dikkate alınan faktörleri ifade eder. Ortogonal dizilerin temel özelliği deneye tüm faktörlerin eşit deneme sayıları ile katılmalarıdır. Ortogonal dizilerin herhangi iki sütunu, iki faktörlü faktöriyel tasarım oluşturur.

Örneğin yedi faktörün tespit edildiği bir deney için $2^7 = 128$ adet denemeyi gerçekleştirme gerekir. Halbuki Taguchi bunun için 8 denemeyi yeterli görmektedir. Bu şekilde açıklanabilir. Çizelge 6.7'de 2 deneme planı görülmektedir. Buna göre 1 ilk seviyeyi, 2 ise ikinci seviyeyi gösterir. İlk 6 faktör sabit iken 7. faktörde seviye değişikliği yapılmaktadır. Bu yolla bütün faktörler teker teker denenmektedir. Sonuçta 128 deneme gerçekleşmiş olmaktadır. Halbuki Taguchi tasarımına göre ilk denemeden ikinciye geçilince 7

faktörden 4'ü değiştirilmektedir. Daha sonraki denemeler için de 4'ü 2.seviyede, 3'ü 1. seviyede olmak üzere her seferinde değişiklik yapılmaktadır. Bunda da toplam 8 deneme gerekli bilgiyi verebilmektedir. Sonuçta Taguchi'nin teklifi çok önemli bir maliyet ve zaman tasarrufu getirmektedir (Peace, 1993).

Çizelge 6.7. 2^k ve Taguchi tasarımı deney planları

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
128	2	2	2	2	2	2	2

2^k Dizaynı

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taguchi Dizaynı

Bu dizilere her faktörde eşit miktarda farklı seviye bulundurduğu için ortogonal dizi denilmektedir. Ortogonal diziler 2 seviyeli, 3 seviyeli ve 2 ve 3 seviyeli olmak üzere üç türlü belirlenmişlerdir. Belirlenen bu diziler standart olup Taguchi deneysel tasarımın temel taşlarını oluştururlar. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılacak her deney bu standart dizilerden birini seçip kullanmak zorundadır. Şayet başlangıçta faktörlere uygun dizi bulunamadıysa faktörlerde bir takım yeni düzenlemeler yapıp dizilerden birine uydurmak gerekmektedir. (Kamber, 2008; Taguchi and Konishi, 1987)

Ortogonal diziler $L_a^{(bc)}$ şeklinde gösterilir. Burada ortogonal diziler Latin kare tasarımından türetildiği için L Latin kare tasarımını temsil eder. “a” deneylerin sayısını, “b” her kolondaki seviye sayısını, “c” ise faktör sayısını ifade etmektedir. İki seviyeden 5 seviyeye kadar değişen seviyelerde ortogonal diziler bulunmaktadır.

En çok kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{12} ve L_{32} iken 3 seviyeliler için L_9 , L_{18} , L_{27} dizileri olmaktadır. Her iki seviyenin karışık

kullanıldığı dizilerden bazıları L_{18} , L_{36} , L_{54} dizileridir. Şekil 6.12’de 2 seviyeli L_4 (2^3) ve 3 seviyeli L_9 (3^4) ortogonal dizileri gösterilmektedir.

		Faktörler		
Deneyler		A	B	C
	1	1	1	1
	2	1	2	2
	3	2	1	2
	4	2	2	1
$L_4(2^3)$				

		Faktörler			
Deneyler		A	B	C	D
	1	1	1	1	1
	2	1	2	2	2
	3	1	3	3	3
	4	2	1	2	3
	5	2	2	3	1
	6	2	3	1	2
	7	3	1	3	2
	8	3	2	1	3
	9	3	3	2	1
$L_9(3^4)$					

Şekil 6.12. L_4 (2^3) ve 3 seviyeli L_9 (3^4) ortogonal dizileri

6.9.12.9. Ortogonal dizilerin seçimi ve serbestlik derecesi

Tasarımda hangi ortogonal dizinin kullanılacağı; faktör ve incelenmek istenen etkileşim sayısına, faktörlerin seviye sayılarına ve deneysel kararlılık ve maliyet sınırlarına bağlıdır. Kesirli deneylerin kullanımı halinde faktörler dizilerin sütunlarına atanırken birbirlerinin yerlerini alabilirler (Şirvancı 1997; Taguchi and Konishi, 1987).

Ortogonal dizilerin seçiminde, öncelikle her bir faktörün serbestlik derecesi ve serbestlik derecelerinin toplamı olan toplam serbestlik derecesi hesaplanmaktadır. Toplam serbestlik derecesi, hangi ortogonal diziye uygunsa o tercih edilmektedir. Toplam serbestlik derecesi hesaplanırken, faktörler arasında etkileşimin olup olmadığını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bir faktörün serbestlik derecesi seviye sayısının 1 eksiğidir (Lakshminarayanan and Balasubramanian, 2008)

$$f_A = k_A - 1 \quad (6.7)$$

f_A : A faktörünün serbestlik derecesi

k_A : A faktörünün seviye sayısı

Eğer varsa karşılıklı etkileşimin incelenmesi durumunda (AxB) serbestlik derecesi, faktörlerin serbestlik dereceleri çarpımına eşittir.

$$f_{(A \times B)} = f_A \cdot f_B \quad (6.8)$$

$f_{(A \times B)}$: (AxB)' nin serbestlik derecesi

f_A : A faktörünün serbestlik derecesi

f_B : B faktörünün serbestlik derecesi

Böylece deneyin asgari serbestlik derecesi; faktörlerin ve varsa karşılıklı etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplamına eşittir. Deney planı toplam serbestlik derecesi ise, seçilen ortogonal dizideki deney sayısının 1 eksiği olmaktadır.

$$f_T = N - 1 \quad (6.9)$$

f_T : Deney planı toplam serbestlik derecesi

N : Deney sayısı

Örneğin; 2 seviyeli 7 faktörün etkileri incelenmek istendiğinde ve karşılıklı etkileşim mevcut olmadığında aşağıda belirtilen işlemler gerçekleştirilir.

$$f_A = 2-1 = 1$$

$$f_B = 2-1 = 1$$

$$f_C = 2-1 = 1$$

$$f_D = 2-1 = 1$$

$$f_E = 2-1 = 1 \text{ .}$$

$$f_F = 2-1 = 1$$

$$f_G = 2-1 = 1$$

$$f_T = N-1$$

ve $N = 8$ olduğundan ideal ortogonal dizi L_8 seçilmektedir.

Faktör sayılarına göre 2 ya da 3 seviyeli OD'nin kullanımına karar verilir. Eğer deneyde farklı seviyeler içeren faktörler yer alıyorsa baskın seviyeye göre OD'lerin yeniden düzenlenmesi gerekir. OD'nin seçimi 2 seviyeli faktörler için Çizelge 6.8'e, 3 seviyeli faktörler için ise Çizelge 6.9'a göre yapılır. Çizelgelerde “*” tekrarlı deneyleri, “X” tasarımın mümkün olmayacağı durumları göstermektedir.

Çizelge 6.8. İki seviyeli OD'lerin seçimi

OD	Faktör sayısı (iki seviyeli)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L4	4	4	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
L8	4*	4*	4	2	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X
L16	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
L32	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
L64	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2
L128	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2
L256	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2

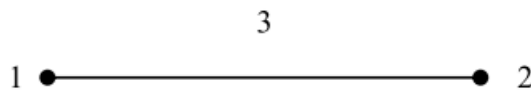
Çizelge 6.9. Üç seviyeli OD'lerin seçimi

OD	Faktör sayısı (üç seviyeli)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L9	4*	4*	1	1	X	X	X	X
L18	1	1	1	1	1	1	1	1
L27	4	4	4	2	1	1	1	1

6.9.12.10. Faktörlerin sütunlara yerleştirilmesi

Taguchi, faktörlerin ve varsa etkileşimlerin yerleştirilmesi için iki yöntem geliştirmiştir. Bunlar; lineer grafikler ve üçgen tablolar. Lineer grafikler veya üçgensel tablolar faktörlerin ve varsa etkileşimlerin ortogonal dizide hangi sütunlara yerleştirildiğini göstermektedir. Bu grafik ve tablolar, Taguchi tarafından standartlaştırılmış olup, uygun ortogonal diziye göre seçilmektedir.

Lineer grafiklere bir örnek Şekil 6.13' de verilmiştir. 1. sütuna A faktörü, 2. sütuna B faktörü, 3. sütuna ise AxB etkileşimi veya C faktörü yerleştirilmektedir.



Şekil 6.13. L4 Lineer grafiği

Üçgensel tablo, etkileşen faktörlerin hangi sütunlara yerleştirileceğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çizelge 6.10' da üçgensel tabloya bir örnek verilmiştir. Ortogonal diziye atanacak ilk faktör herhangi bir sütuna atanabilir, örneğin 2. sütuna. İkinci bir faktör de herhangi bir sütuna atanabilir, örneğin 3. sütuna. Eğer A faktörü 2. sütuna, B faktörü de 3. sütuna atanırsa, üçgensel tablo AxB etkileşiminin 1. sütunda olması gerektiğini belirlemektedir (Taguchi, 1990; Taguchi and Konishi, 1987).

Çizelge 6.10. L₄ üçgen tablo

Sütun		B	
		2	3
A	1	3	2
	2	1	AxB

6.9.12.11. Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi

Ortogonal dizi seçildikten ve kolonlarına faktör ve etkileşimlerin ataması yapıldıktan sonra deneylerin fiilen gerçekleştirilmesine başlanabilir. OD'nin öngördüğü şekilde, faktörlerin seviyeleri kullanılarak deneyler yapılır, ancak burada karar verilmesi gereken iki nokta deneylerin tekrarlı yapılıp yapılmayacağı ve hangi sıra ile yapılacağıdır. Deney sonucunda ölçülen kalite karakteristiği sürekli bir veri ise (sıcaklık, basınç, hız gibi) deneyleri tekrarlamak sadece güvenilirliğini artıracaktır. Ancak kalite karakteristiği açık-kapalı, var-yok, 1-0 gibi süreksiz bir veri ise deneyler muhakkak tekrarlı şekilde yapılmalıdır. Çünkü en ufak bir hata sonuçları büyük ölçüde etkileyecektir. Eğer mümkünse kalite karakteristiğinin sınıf sayısı da artırılmalıdır. (açık-yarı açık-kapalı gibi). Deneyler makinaların ve ölçüm cihazlarının hatalarını en aza indirmek, önceden saptanamayan hata kaynaklarının etkilerini azaltmak için OD'nin öngördüğü sıra ile değil de rasgele yapılmalıdır. Faktörleri değiştirmenin kolay olduğu durumlarda deney sırasının tamamen gelişigüzel belirlenmesi uygun olacaktır. Ancak faktörleri değiştirmenin zor olacağı durumlarda tekrarların ardı ardına yapılmasına müsaade edilebilir.

6.9.12.12. Deneylerin yapılış sırası

Deneylerin yapılış sırası belirlenirken çeşitli yöntemler kullanılır. Rassallaştırma en çok kullanılan yöntemlerdendir. Rassallaştırma denemelerin yapılış sırasının numara sırasına göre değil de belli bir rastgelelikte yapılmasıdır. Denemelerden oluşan testlerin uygulanış sırası rassallık içermelidir. Böylece deney sırasında oluşabilecek ve sonuçları olumsuz yönde etkileyebilecek.

fakat başlangıçta öngörülmemiş olan değişkenlik kaynaklarına karşı korunabilmek mümkündür. Rassallaştırma da en çok kullanılan yöntemler;

- Tamamen rassallaştırma
- Basit tekrar
- Bloklar içinde tamamen rassallaştırma

Tamamen rassallaştırma: Tamamen rassallaştırma yönteminde, ilk olarak istenilen deney yapılır. Sonrasındaki deneyler rasgele sayılar tablosu kullanılarak belirlenen deney sırasıyla yapılır. Tekrarlar söz konusu olduğunda bir test tamamlanana kadar tüm deneyler rassal olarak seçilir ve ikinci tekrar yapılırken deney sırası rassal olarak bir öncekinden farklı sırada seçilir. Deneyler tamamlanıncaya kadar bu yöntem uygulanır.

Basit tekrar: Basit tekrarda da tüm deneyler ilk test olarak seçilebilmek için eşit şansa sahiptir. Fakat diğerinden farkı, tekrarlar söz konusu olduğunda, seçilen deney için gerekli tüm tekrarlar arka arkaya test edilir. Bu yöntem, deneylerin hazırlanışının zor, zaman alıcı ve pahalı olduğu durumlarda geçerlidir.

6.9.12.13. Deneylerin tekrarlanma sırası

Deneylerin yapılabilmesi için her deneme için en azından bir deney yapılmalıdır. Fakat tek gözlem, sonuçlardaki olabilecek değişkenliği temsil etmez. Her bir deneme için birden fazla deney yapılması ile yığının ortalamasında meydana gelebilecek küçük değişkenlerin saptanabilmesi sağlanacaktır.

Bazı deneylerde deneme çalışmaları kolaylıkla ve ekonomik bir şekilde tekrarlanmaktadır. Bazıları ise yüksek maliyetli ve zaman alıcıdır. Ekonomik açıdan değerlendirilirse, eğer testler çok pahalı ise bir deneme için bir test yapılır, testler pahalı değilse bir deneme için birden fazla deney yapılır.

Deney sonuçlarının kaydedilmesinde en iyi yöntem, bilgisayar ortamında hazırlanan formların kullanılmasıdır. Örneğin Minitab Release 17 paket programı, deneyde kullanılması düşünülen tasarım, ilgili menüden girildiği takdirde, deney sonuçlarının kaydedilmesi için hazır bir form vermektedir.

6.9.12.14. Veri analizi ve kontrol edilebilen faktörlerin optimizasyonu

Faktörlerin incelenip, en uygun faktör seviyelerinin tespit edilmesi için beş yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Gözlem yöntemi
2. Sıralama yöntemi
3. Sütun farkları yöntemi
4. Varyans analizi yöntemi ve
5. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemidir.

Bu yöntemlerden ilk ikisi önemli ve de verimli sonuç veremedikleri için pek kullanılmamaktadır.

6.9.12.15. Varyans analizi

DeneySEL verilerin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi yani ANOVA (analysis of variance – varyans analizi) istatistik yöntemleri uygulanmaktadır. ANOVA denemeler arasındaki performans farklılığını ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir araçtır. Varyans analizi, toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve serbestlik derecesi, kareler toplamı, ortalama kareler (varyans) vb. gibi niceliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Ross, 1996).

Kareler toplamı (varyasyon); A ve B gibi iki faktörün ve bu faktörlerin arasında etkileşimin toplam varyasyonu aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{(A \times B)} + SS_e \quad (6.10)$$

SS_T : Toplam kareler toplamı

SS_A : A faktörünün kareler toplamı

SS_B : B faktörünün kareler toplamı

$SS_{(A \times B)}$: A ve B faktörü etkileşiminin kareler toplamı

SS_e : Ortogonal dizide boş bırakılmış olan kolonların kareler toplamı (hata kareler toplamı)

$$SS_T = \left[\sum_{j=1}^N y_j^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (6.11)$$

N : Deneme sayısı

T : Tüm gözlemlerin toplamı

y_j : j. Gözlem

$$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N} \quad (6.12)$$

A_1 : A faktörü 1. seviyesinde olduğunda gözlenen sonuçların toplamı

A_2 : A faktörü 2. seviyesinde olduğunda gözlenen sonuçların toplamı

Serbestlik Derecesi:

4.1, 4.2 ve 4.3’de serbestlik dereceleri formülleri verilmiştir. Hata serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkartılarak bulunmaktadır.

$$f_e = f_T - f_A - f_B \quad (6.13)$$

f_e : Hata serbestlik derecesi

Varyans:

Bir faktörün varyansı, faktöre ait kareler toplamının, o faktöre ait serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değere eşittir.

$$V_A = \frac{SS_A}{f_A} \quad (6.14)$$

V_A : A faktörünün varyansı

6.9.12.16. F (Fisher) Testi

Testler yapıp sonuçlar elde edildikten ve varyanslar bulunduktan sonra, hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermek için F testi uygulanmaktadır. Standart F testi uygulanırken, hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F testi varsayımları yerine getirilmediği takdirde önem derecesi hesapları doğru sonuçları yansıtmayabilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlardan sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabileceği belirtilmektedir (Phadke, 1989)

Taguchi, hangi faktörlerin performansı etkilediğini tanımlamaya çalışmaktadır ve F oranını referans değer olarak kullanmaktadır. F değeri, istatistiksel olarak faktöriyel etkinin büyüklüğünü değil varlığını göstermektedir.

Deneyde elde edilen F değerleri, F tablosundan bulunan F oranı ile karşılaştırılmış ve bu değerden küçük F değerine sahip faktör veya etkileşimler hata faktörüne ilave edilmiştir.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (6.15)$$

F_A : A faktörüne ait F değeri

Faktörlerin varyasyonu azaltmadaki gücünü ifade eden katkı yüzdesi bulunmadan önce karelerin net toplamaları hesaplanmaktadır.

$$SS'_A = SS_A - (V_e)(f_A) \quad (6.15)$$

SS'_A : A faktörünün karesinin net toplamı

$$P_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (6.15)$$

P_A : A faktörünün katkı yüzdesi

6.9.12.17. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi

Bu yöntem de faktör ve etkileşime ait farklı seviyelerdeki gözlemlerin ortalamaları bulunmaktadır. Bunların büyüğü ve küçüğü belirlenip, tüm ortalama değerlerini kapsayan düşey bir skala çizilmektedir. Tüm verilerin ortalamasını gösteren genel ortalamadan yatay bir çizgi çizilmektedir. Her bir faktörün yüksek seviyedeki ve düşük seviyedeki ortalamaları grafikte işaretlenmekte ve bu noktalar birleştirilmektedir. Bu noktalardan biri genel ortalama çizgisinin altında diğeri ise üzerinde olmalıdır. Bunlar genel ortalamadan eşit uzaklıktadır (Şekil 6.14).

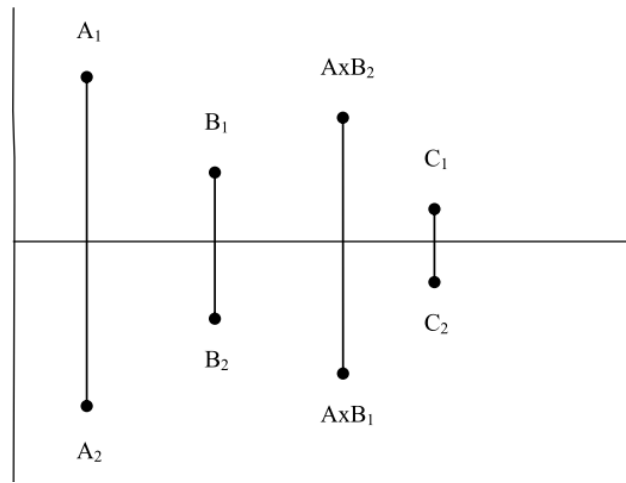
Lochner and Matar'a (1990) göre deneysel tasarımın kullanımının en önemli sebebi, sonuçlardaki değişkenliği minimize edecek faktör seviyeleri kombinasyonunu bulmaktır. Bu sebeple, varyans analizinin yerine faktör etkilerinin grafiksel gösterimini tavsiye etmektedirler.

6.9.12.18. Deneysel sonuçların yorumu

Deney yönlendirildikten ve ANOVA tamamlandıktan sonra önemli faktörler veya etkileşimler belirlenir. Testlerin yapılması maliyeti ile karşılaştırıldığında verilerin analizi çok daha küçük bir maliyetle yapılabileceği

için sonuçların yorumlanmasında dikkatli olunması gerekir. Bu bölümde incelenecek olan yorumlama yöntemleri şunlardır:

1. Ortalamanın kestirimi
2. Kestirilen ortalama etrafında güven aralığı (Ross, 1996)



Şekil 6.14. Faktör etkilerinin grafiksel olarak gösterimi

6.9.12.19. Ortalamanın tahmini

Deneyi yapan kişi, genellikle ürün veya prosesten dikkate değer tepkiler almayı bekler. Seçilen karakteristiğin en yüksek – en iyi, nominal – en iyi veya en düşük – en iyi oluşuna göre değişik proses şartları yeterli sonuçların alınabilmesi için seçilmelidir. Deney yürütülüp, optimum proses şartları belirlendiğinde aşağıdaki olasılıklar ortaya çıkar.

1. Belirlenen faktör seviyelerinin kombinasyonu, deneydeki deneme koşullarından biridir.
2. Belirlenen faktör seviyeleri kombinasyonu deneye dahil edilmemiştir.

Belirlenen proses şartları için ortalamanın tahmininde; prosedür faktöriyel etkilerin toplanabilirliğine bağlıdır. Eğer bir faktöriyel etki bir diğeri ile toplanabilirse toplanabilirlik iyidir ve sonuçlar doğru olarak tahmin edilebilir. Etkileşimin var olduğu durumlarda etkileşen faktörler arasındaki toplanabilirlik zayıftır. Etkileşimin, kendisini oluşturan faktörler dışındaki faktörlerle toplanabilirliği iyidir. (Durmaz, 2008)

6.9.12.20. Tahmin edilen ortalama etrafında güven aralığı

Ortalamanın tahmini deneylerden elde edilen sonuçların ortalamalarına dayandırılan bir nokta tahminidir. İstatiksel olarak bu durum, gerçek ortalamanın hesaplanan ortalamadan büyük olma ihtimali için %50 bir şans, küçük olma ihtimali için de %50 bir şans tanımaktadır. Deneyi yapan kişi, belirli bir güven düzeyi ile gerçek ortalamanın içine düşmesi beklenen bir dağılım aralığına sahip olmayı ister. Güven aralığı, belirlenen güven düzeyinde, gerçek ortalamanın arasına düşmesi beklenen maksimum ve minimum değerlerdir.

Güven düzeyi istatiksel anlamda, hata yapma şansı olduğunu gösterir. Örneğin, standart bir zarda, 1,2,3,4 veya 5 gelmesi (5/6) %83'tür. 6 gelmesi de mümkün olduğu için bir risk söz konusudur. Deneyi yapan kişi güven aralığı için güven düzeyi belirlerken kendi amaçlarına göre hareket etmektedir. Riski azaltmak için, yüksek güven düzeyi seçilir fakat, daha geniş bir güven aralığı, gerçek ortalamanın belirlenen limitlerin dışında olma şansını azaltacaktır. (Montgomery, 2008)

6.9.12.21. Doğrulama deneyini öngören güven aralığı (CI)

Doğrulama deneyi, deneyden seçilen faktör ve seviyelerinin ürün veya prosesin belli bir biçimde davranmasına sebep olduğunu doğrulamak için kullanılır. Seçilen sayıda test belirlenen sabit koşullarda yapılır ve gözlemlerin öngörülen değere yakın olması umulur.

Güven aralığı (CI– confidence interval) eşitlik (6.16) ile bulunur.

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha}(f_1, f_2) V_e}{n_e}} \quad (6.16)$$

$F_{\alpha}(f_1, f_2)$ (α) anlamlılık düzeyinde f_1 ve f_2 serbestlik derecesi (DOF) için varyans oranıdır. Güven düzeyi $(1 - \alpha)$ 'dır. f_1 ortalamanın serbestlik derecesidir. Her zaman 1'e eşittir. f_2 hata teriminin serbestlik derecesidir. V_e hata teriminin varyansı ve n_e ise eşdeğer tekraralama sayısıdır ve 6.17 eşitliği ile hesaplanır.

$$n_e = \frac{T}{M + S} \quad (6.17)$$

M ; ortalamaların serbestlik derecesi (her zaman 1'e eşittir), S ; tüm faktörlerin serbestlik dereceleri toplamı ve T ise toplam deney (gözlem) sayısıdır.

F oranı, ANOVA'da kullanılan F tablolarından elde edilir. Payda yer alan ve devamlı 1'e eşit olan serbestlik derecesi, kestirilmekte olan ortalama ile ilgilidir. Doğrulama deneyi, deneysel sonuçların doğrulanması için tavsiye edilir ve şu şekilde yorumlanır.

Eğer doğrulama deneyi sonuçlarının ortalaması, güven aralığı limitlerinin içindeyse deneyi yapan kişi, önemli faktörlerin olduğu kadar belirlenen seviyelerin de istenen sonuçları alabilmek için uygun seçildiğine inanır.

Eğer doğrulama deneyi sonuçlarının ortalaması güven aralığı limitlerinin dışındaysa, deneyi yapan kişi istenen değerde sonuçları sağlayacak faktör ve seviyelerinin yanlış seçildiğine ya da büyük ölçme hataları yaptığına inanır. Böylece başka deneylerin yapılması gerekliliği doğar. Diğer faktör ve seviyeleri yapılacak yeni deneylerde dikkate alınmalıdır. Doğrulama deneyi, ürün veya prosesin fonksiyonlarını uygun bir şekilde yerine getirmesini neyin sağlayacağını anlamada yapılacak araştırmanın son adımıdır (Ross, 1996).

Tahmini değerler güven aralıklarıyla beraber belirlendikten sonra işlemlerin sağlanması mahiyetinde optimal şartlarda bir deney gerçekleştirilir. Bu işlem parametre tasarımı sürecinin son ve önemli adımı olmaktadır. Deney

seçilen optimal şartlar altında birkaç tekrar halinde yapılır. Tekrarların adedi daha önceki deneylerdekinin aynısı olabilir.

Bu deneyden elde edilen verilerin ortalaması ve standart sapmaları bulunur. Hatta S/N oranları bulunur. Eğer gözlenen değerler daha önceki çalışmalardan elde edilen tahmini değerlere yakınsa daha doğrusu sağlama deneyi için öngörülen güven aralığının içinde ise deney realitelere oldukça yaklaşmış demektir. Böylece biz bulduğumuz optimum değerleri bu çalışmanın uygun ve optimum sonuçları olarak kabul eder ve çalışmayı sone erdiririz. Şayet gözlenen değerler daha önce öngörmüş olduğumuz değerlerden uzaksa o zaman modelde bir başarısızlık, bir hata var demektir. Başarısızlık söz konusu olunca geri besleme mekanizmasını devreye sokmak gerekmektedir. Geri beslemenin varlığı, yöntemin sürekli kendini yenileyebilirliğini ve sürekli gelişmeye imkan veriyor anlamını verir. geri besleme en başa değil de modelin kuruluşunun başı sayılan faktör seçimi ve seviye tespitinin yapıldığı 3. adıma gidiyor. Buraya gelince prosesi tekrar yeni baştan inceleyip daha isabetli bir model kurma çalışmasına yeniden başlanır.

Yapılacak çalışmalar öncelikle hatanın ne olabileceği ve kaynağının neresi olduğunu belirleme çalışması olacaktır. Başarısızlığın kaynakları şunlar olabilir; hedef fonksiyonunun yanlış seçimi, yanlış faktörlerin seçilmiş olması, karakteristiğin yapısına uygun olmayan S/N oranının seçilmiş olması, ortogonal dizinin seçiminde hata yapılmış olması gibi bütün bu sebeplerden biri veya birkaçı neticenin başarısızlığına etki etmiş olabilir. Hatanın farkına varılınca hemen düzeltme yoluna bakılıp çalışmalara tekrar başlanıp sonuca gidilir.

Sonuçlandırma safhasına gelince çalışmalarımız başarılı olmuş demektir. Bu durumda yapılacak çok önemli bir şey yoktur. Yapılacak şey sadece optimal olarak ortaya çıkmış faktör kombinasyonunu üretimimizin ayarlanması gereken durum olarak benimsenmesidir ve yapılacak üretim bundan sonra bu şartlara göre ayarlanmalıdır.

Sonuca varılınca şayet hedef değere isabet ettirilebilmişse bu taktirde mesele kalmamıştır. Sadece kaliteyi sürekli geliştirme felsefesi gereği yeni daha çok nitelikli ve daha bir üst hedef tayin edilip bu yeni belirlenen hedefe varma çalışmaları yapılır. ancak yapılan çalışmada hedefe varmak mümkün olamamış ise bu taktirde tolerans tasarımı çalışmaları yapılır ve mümkün olduğunca üretim aralığı (tolerans aralığı) dar tutulur. Bu durumda

da yine geliştirme çalışmalarına devam edilir. Zira bu işletmenin sürekli faaliyetleri arasına alınması gerekliliğine haiz değerdedir.

6.9.12.22. Doğrulama deneyinin yapılması.

Deney tasarımı neticesinde optimum kalite karakteristiği ve minimum değişkenliği oluşturan faktörlerin ve seviyelerinin kombinasyonu tespit edilir. Tespit edilen bu kombinasyonun en az bir kez denenmesi ve beklenen sonuçları vermesi gerekir. Elde edilen bu kombinasyonun deney planında denenmemiş olması kuvvetle muhtemeldir.

Bu son aşamada deney, seçilen en iyi şartlar altında bir kaç defa tekrarlanır. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin ortalaması ve standart sapması bulunur.

- Eğer doğrulama deneyi sonucunda elde edilen değerler, tahmini değerlere yakınsa, daha doğrusu deney istenilen sonuçları vermeye başlamışsa çalışma sona erdirilir. Bulunan sonuçlar en uygun değerler olarak kabul edilir.
- Eğer doğrulama deneyi sonucunda elde edilen değerler, tahmini değerlerden uzaksa o zaman modelde bir başarısızlık var demektir. Bu durumda proses yeni baştan tekrar incelenip hatalar tespit edilmeye çalışılır. Modelde geri besleme ile elde edilen bilgiler doğrultusunda uygun değişiklikler yapılarak model tekrar çalıştırılır. (Kamber, 2008)

6.9.13.Taguchi yöntemi ile diğer deney tasarımı türleri arasındaki farklar

Taguchi yöntemi bir kesirli faktöriyel deney tasarımı türüdür. Ancak Taguchi'nin bu deney tasarımı kattığı yeni fikirler ile son zamanlarda özellikle sanayi uygulamalarında hem kesirli faktöriyel deney tasarımı hem de diğer deney tasarım yöntemlerine göre belirgin olarak öne çıkmıştır.

Klasik deney tasarımı türleri, mühendislerin ve bilim adamlarının deneylerin etkinliklerini geliştirmek için başvurdukları istatistiksel yöntemler

bütünüdür. Klasik deney tasarımı yöntemlerinde vurgu istatistik yöntemlerinin uygulanması üzerinedir. Taguchi yönteminde ise kaliteyi müşteri gibi algılayarak geliştirme amacına yönelik kullanılan istatistiksel ve istatistiksel olmayan yöntemler bütünüdür. Taguchi yönteminin vurgu yaptığı en önemli nokta ise, gelişmeyi mümkün olduğunca etkin ve verimli olarak başarmaktır.

Taguchi yöntemi ve diğer deney tasarımı yöntemleri arasındaki diğer farklılıklar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Klasik yöntemlerde sadece performans karakteristiğinin ortalaması optimize edilirken, Taguchi yönteminde hem performans karakteristiği hem de değişkenlik optimizasyonu yapılmaktadır.

Klasik yöntemlerde performans karakteristiğinin sadece sürekli biçimi incelenebilirken, Taguchi yönteminde hem sürekli hem de kesikli biçimleri incelenebilmektedir.

Klasik yöntemlerde daha fazla deney yapmak gerekirken, Taguchi yönteminde çok daha az sayıda deney yaparak aynı sonuçlara ulaşmak mümkündür. Taguchi yönteminde bazı etkileşim faktörlerini etkisi göz ardı edildiğinden bir takım bilgilere ulaşılmamaktadır. Ancak deney maliyelerinde elde edilen tasarruf, sonuçlardan elde edilemeyen bilgiler ile karşılaştırıldığında Taguchi yönteminin verimliliğinin yüksek olduğu gözlenmektedir.

Kontrol edilebilen faktörler arasında performans karakteristiği üzerinde etkili olan etkileşim faktörlerinin deneye dahil edilmemesi, Taguchi yönteminin başarısını etkileyecektir. Ancak Taguchi yönteminin etkileşim faktörlerini tamamen göz ardı ettiği düşüncesi yanlıştır. Çünkü performans karakteristiği üzerindeki etkisi bilinen etkileşim faktörlerinin gerektiğinde bir temel faktör gibi deneylere katılabilmektedir. Bununla birlikte diğer bütün etkileşim faktörlerinin deneylere dahil edilmesi gerekli değildir.

Taguchi yöntemi ile bulunan sonuçlar her zaman tam doğru sonuçlar olmayabilir. Ancak zaman ve maliyet kazanımları nedeniyle, göz ardı edilen bilgi kaybının hatalı çıkarsamalara yol açmaması için doğrulama deneyleri yapılır. Bu tür olumsuz fikirlere rağmen Taguchi yöntemi, endüstride deneysel çalışmaların yapılabilirliğini arttırmış ve bu sayede çözilemeyen veya teşhis konulamayan bir çok problemin çözümüne de olanak sağlanmıştır. (Şanyılmaz, 2006)

6.9.14.Taguchi yöntemine eleştiriler

Taguchi'nin robust parametre tasarımı yaklaşımıyla ilgili beş önemli eleştiri bulunmaktadır.

Bunlar:

1. Sinyal gürültü oranının yetersizliği
2. Tasarım değişkenlerini modellemede esneklik eksikliği
3. Deney tasarım planının ekonomik olmayışı
4. Optimizasyonla ilgili zihni meşguliyet
5. Ardışık deneye formal izin olmaması.

Taguchi yaklaşımının analiz yöntemi basit ve çaprazlanmış dizi kavramıyla bağlantılıdır. Taguchi, nadiren kontrol faktörleri arasındaki etkileşimleri ele almaktadır. Taguchi tarafından ortaya konan tasarımların birçoğu bu etkileşimlerin tahmin edilmesine olanak vermemektedir. Taguchi'nin önerdiği tasarımların çoğu, doyurulmuş veya yaklaşık olarak doyurulmuş Plackett – Burman tasarımlarıdır ve kontrol faktörleri arasındaki etkileşimlerin tahmin edilmesine olanak vermemektedir. Standart varyans analizi teknikleri S/N oranını etkileyen kontrol faktörlerinin tanımlanması için kullanılır. Ayrıca, varyans analizi, olası düzeltme Ayrıca, varyans analizi, olası düzeltme faktörlerinin araştırılması için y üzerinde de uygulanır. S/N oranını etkileyen faktörler S/N oranını maksimize edilen seviyelere getirilirken y'yi etkileyen faktörler, ortalamayı hedefe yaklaştıran seviyelere getirilirler.

Çaprazlanmış dizi, biri gürültü diğeri kontrol faktörleri için olmak üzere, iki deney tasarımı ile kurulur. Bu iki tasarımın her ikisi de doyurulmuş ya da yaklaşık doyurulmuş olduğu için genellikle ekonomiktir. Bununla beraber iki tasarımın çarpımı, çoğu kez ekonomik bir tasarım üretmeyebilir.

Box, Easterling, Pignatiello ve Ramberg, Taguchi'nin katkılarını ve batıda geliştirilen istatistiksel yöntemler bağlamında eleştiriler sunmuşlardır. Box, standart veri transformasyonu yöntemlerinin, Taguchi'nin S/N oranlarından nasıl daha etkin olabileceğini göstermiştir. Box, Taguchi'nin Robust tasarım yaklaşımında ardışık araştırmaların yetersizliğine değinmiştir. Ayrıca Taguchi'nin tasarım seçimindeki kısıtlamaları bulunduğunu ifade etmiştir (Vijayan, 1992, Durmaz, 2008, Pignatiello and Ramberg, 1992, Miller et al., 1993).

7.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme, Ekipman ve Takımlar

7.1.1. Polimer malzeme – HDPE

Bu deneysel çalışmada, 150 mm × 275 mm boyutlarında ve 5 mm kalınlığında HDPE plakalar kaynak numunesi olarak kullanılmıştır. Baz malzemenin çekme mukavemeti (UTS) 17,25 MPa olarak testler sonucunda bulunmuştur. (Bölüm 7.8.3) Bu deneysel çalışmada ticari sınıf beyaz renkte 5 mm kalınlığında HDPE plakalar kullanılmıştır. HDPE polimer malzemenin önemli özellikleri Çizelge 7.1’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. HDPE malzemenin ana özellikleri

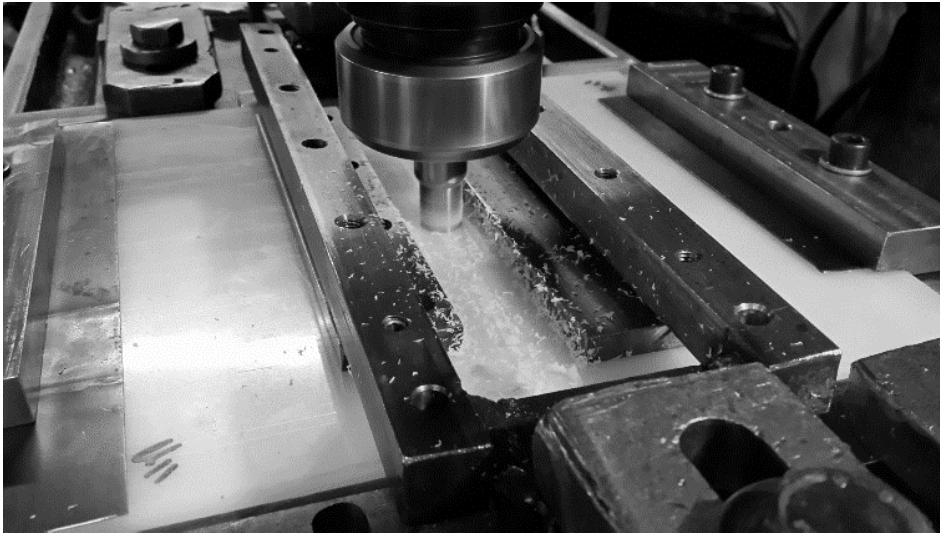
Yoğunluk g/cm ³	Çekme Mukavemeti MPa	Sertlik Shore D	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
0,966	17,25	70 - 72	-80	170

7.1.2. SKK prosesi için freze tezgahı ve bağlama aparatı

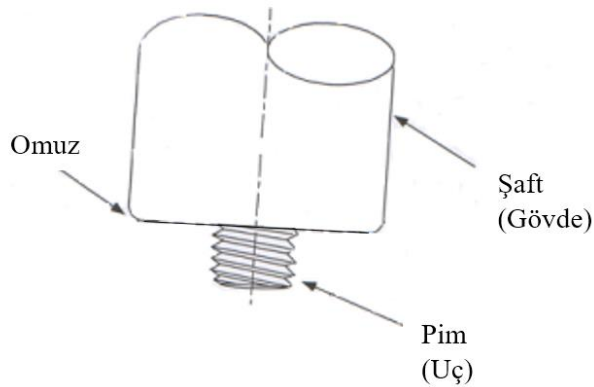
SKK deneyleri CNC dik freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. SKK prosesi, kaynaklanacak plakaların freze tezgahının üzerinde sabit kalacak şekilde özel olarak tasarlanmış bağlama aparatı içine yerleştirilmiş kaynak plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. 150 mm × 275 mm boyutlarında iki adet dikdörtgen HDPE plaka, bağlama aparatının alt platformu bağlama aparatının üzerine yerleştirildikten sonra plakalar bağlama aparatı üzerindeki sıkıştırma tırnakları arasına alınarak kaynak süresince plakaların ayrılmaması için sabitleme yapılmıştır. Takım çeliğinde imal edilen bu aparat, aynı zamanda kaynak sırasında kaynak hattı için kılavuz olarak oynamak için kullanılmıştır. Bağlama aparatının alt platformu kaynak hattı boyunca kaynak görünümünü ve kaynak yüzeyinde oluşacak hataları önlemek amacıyla ısı transferini en aza indirmek için PTFE (teflon) film tabakası ile kaplanmıştır. SKK takımı ve özel tasarlanmış kaynak plakaları bağlama aparatı Şekil 7.1’de gösterilmiştir.

7.1.3. SKK takımları

Tasarlanan SKK takımları sıcak iş çeliğinden düz omuz platformu ile üretilmiştir (Şekil 7.2). Takımın aktif olan parçası olan pim metrik sağ helis 5 mm (M5) çapında ve 5 mm boyunda standart hatveli olarak işlenmiştir. SKK prosesinde kaynaklı bağlantıların imalatında 16, 20, 24 mm'lik üç farklı omuz çapında SKK takımları kullanılmıştır. SKK takımlarına ait fotoğraf Şekil 7.3'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Bağlama aparatına yerleştirilmiş kaynak plakaları ve SKK işlemi



Şekil 7.2. Düz omuz platformlu takımının bölümleri



Şekil 7.3. 16, 20, 24 mm’lik omuz çapında üç farklı SKK takımı

7.2. Ön araştırma, ön tasarım ve değerlendirme deneyleri

Deney tasarımı prosedüründe ilk adım olarak değişkenlerin yaklaşık aralıklarını bulmak için proses tekrarlanabilirliğinin de belirlenebileceği bazı tarama (deneme) deneyleri yapılabilir. Faktör seviyelerinin bu aralıklarında yapılan deneyler kabul edilebilir kaynak kalitesi ile sonuçlanıyor ise hem daha önceki çalışmalara bakarak hem de üzerinde çalışılan deney tasarımı prosedürüne uyarak bu aralıklar deney tasarımı başlangıcında proses parametre seviyeleri olarak alınır.

Polimerin çekme mukavemeti üzerinde ciddi bir etkisi olan SKK takım dönüş hızı, ilerleme hızı ve takım geometrisine karşı çok hassas olması sebebiyle ve bu çalışmadaki ön araştırma /ön tasarım /değerlendirme deneyleri baz alınarak, kaynak tasarım sürecinin başlangıcında takım dönüş hızı, ilerleme hızı ve takım geometrisi, kaynak mukavemetlerine yapacakları etkiyi gözlemlemek için kaynak parametresi olarak seçilmişlerdir.

Bu deneylerde ve daha önce yapılan çalışmalar değerlendirilerek, takım eğim açısının değişken parametre olarak kullanılmasının gerekli olmadığı görülmüş sonuç olarak tek kaynak hatlı SKK prosesinde takım eğim açısı olarak 2°nin sabitlenerek kullanılmasına karar verilmiştir.

7.3.Taguchi yöntemi uygulaması için SKK parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesi

Taguchi yönteminde kullanılacak olan deney tasarım matrisini oluşturmak ve optimum seviyeleri belirlemek için ve proses faktör ve seviyeleri Çizelge 7.2’de listelenmiştir.

Çizelge 7.2. Kaynak parametreleri ve seviyeleri

Kaynak Parametreleri	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Takım Dönme Hızı	A	d/d	800	1250	1600
Takım İlerleme Hızı	B	mm/dk	12,5	20	40
Takım Omuz Çapı	C	mm	16	20	24

7.4. Taguchi Ortogonal Dizisinin Seçilmesi

Bu çalışmada 4 sütun ve 9 satır ile oluşturulan $L_9 (3^4)$ ortogonal dizisi (Çizelge 7.3) optimizasyonu yapılan parametreleri belirlemek için kullanılmıştır. L_9 ortogonal dizisinde dört sütun olması nedeni ile her kaynak parametresi bir sütuna atanmış ve son sütun deneysel çalışmalarda hatalar için boş bırakılmıştır. Ortogonallık dizinin bir kolonun boş kalması nedeniyle bozulmaz. Bu nedenle, yalnızca 9 deney, tüm kaynak prosesini araştırmak için yeterli olacaktır. Deney planı tamamen sistematik hataları önlemek ve saf hataların daha iyi tahmin edilmesi için rastgeleleştirilmiş ve aşağıda belirtilen avantajlara ulaşmak için toplam 18 çift HDPE plaka SKK ile birleştirilmiştir (Roy, 1990; Penteado et al., 2010).

- Deney tekrarlarından elde edilen veriler orijinal verileri doğrulamaktadır.
- Eğer gürültü faktörleri gün içinde değişiklik gösterirse tekrarlanan denemeler gürültü faktörlerinin etkisini ortaya çıkarabilir.
- Deney tekrarlarından elde edilen veriler hedef değer etrafındaki varyansın analizi için kullanılabilir.
- Yapılana tekrarlar varyans ve S/N oranlarının belirlenmesini sağlar.

7.5. Deney Tasarım Matrisi

Proses parametrelerinin etkisini belirlemek için, optimizasyon işleminde için S/N oranı ve ANOVA kullanılarak, deneyler, deneysel tasarım kurallarına göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin SKK prosesinde, Taguchi deneysel tasarım

yöntemini uygulamak için L_9 ortogonal dizisine (dört sütun ve dokuz satır) dayalı bir model oluşturulmuştur. L_9 ortogonal dizindeki kontrol faktörlerini (proses parametreleri) ve faktör seviyelerini içeren deney tasarımı matrisi Çizelge 7.4'de verilmiştir (Yang and Tarng, 1998, Juang and Tarng 2002).

Çizelge 7.3. Deney Tasarımı için $L_9 (3^4)$ ortogonal dizisi

Deney No:	Kaynak Parametreleri		
	A	B	C
#	Takım Dönme Hızı	Takım İlerleme Hızı	Takım Omuz Çapı
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

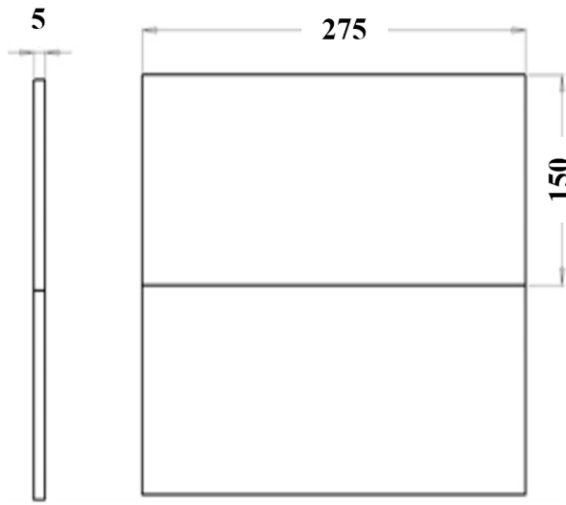
Çizelge 7.4. $L_9 (3^4)$ - Kaynak parametre ve seviyeleri ortogonal dizisi

Deney No:	Kaynak Parametreleri		
	A	B	C
#	Takım Dönme Hızı (d/d)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Takım Omuz Çapı (mm)
1	800	12,5	16
2	800	20	20
3	800	40	24
4	1250	12,5	20
5	1250	20	24
6	1250	40	16
7	1600	12,5	24
8	1600	20	16
9	1600	40	20

7.6. Proses Öncesi Hazırlıklar

7.6.1. Kaynak plakalarının kesilmesi

SKK prosesinde kullanılacak 5 mm kalınlığında HDPE hadde plakaları 1000 mm x 2000 mm boyutlarından testere freze çakısıyla işleme merkezinde 150 mm x 275 mm boyutlarında kesilmiştir. (Şekil 7.4)



Şekil 7.4. HDPE kaynak plakalarının boyutları

7.6.2. Bağlama aparatının sabitlenmesi

SKK prosesine başlamadan önce ilk aşama bağlama aparatının çerçevesinin freze tezgah tablasına yerleştirilip sabitlenmesidir.

7.6.3. Takım ayarı

Dalma fazında öncelikle SKK takımı dik freze tezgahının malafasına sıkıştırılır. Her bir omuz çapı için takım ilerleme ve takım dönme hızları ile planlanan deney setleri tamamladıktan sonra takım değiştirilir.

7.6.4. Bağlama aparatı üzerine plakaların sabitlemesi

SKK bağlantılarını imal etmek için daha önceden hazırlanmış olan plakalar kısa kenarları kaynak hattına dik olacak şekilde bağlama aparatı içinde yerleştirilir ve bağlama aparatı üzerindeki sıkıştırma tırnakları arasına alınarak kaynak süresince plakaların ayrılmaması için sabitleme yapılır (Strand, 2003).

7.6.5. Tezgah çalışma parametrelerinin ayarlanması

Takım dönme ve ilerleme hızı gibi tezgah çalışma parametreleri kaynak hattı boyunca kontrol edilir. Üç farklı takım omuz çapı (16, 20, 24 mm) takım dönme hızı (600, 800 ve 1000 d/d), takım ilerleme hızı (12.5, 20, 40 mm/ dak.) ve takım eğim açısı (2°) Çizelge 7.5’de listelenen deney sıralarına göre birinci tekrar ve ikinci tekrar için ayarlanır ve kaynak işlemleri gerçekleştirilir. Takım dönme hızı, ilerleme hızı dışındaki bütün tezgah çalışma parametreleri deneyler süresince sabit tutulur.

Çizelge 7.5. Deney tekrar sıraları

Deney No:	Kaynak Parametreleri				
	A	B	C		
	Takım Dönme Hızı	Takım İlerleme Hızı	Takım Omuz Çapı	Deney Sıraları	
#	(d/d)	(mm/dk)	(mm)	Tekrar #1	Tekrar #2
1	800	12,5	16	9	1
2	800	20	20	4	4
3	800	40	24	3	9
4	1250	12,5	20	5	5
5	1250	20	24	2	8
6	1250	40	16	8	2
7	1600	12,5	24	1	7
8	1600	20	16	7	3
9	1600	40	20	6	6

7.6.6. Takımın kaynak hattı boyunca ayarlanması

Çizelge 7.5'deki deney parametreleri ayarlandıktan sonra kaynak hattı boyunca takımın doğrusallığının ayarlanması için takım döndürülmeye başlanır. Takım ucundaki pim kaynaklanacak plakaların ara yüzeyinin orta noktasına temas edene kadar aşağıya doğru ilerletilir. Temas anında takımın aşağıya doğru ilerlemesi durdurulup geri çekilir ve takım kaynak hattının son noktası olacak olan bölgeye kadar ilerletilir ve tekrar bu bölgedeki ara yüzeyin orta noktasına temas edene kadar aşağıya doğru ilerletilir. Takım ucundaki pim plaka yüzeyi ile temas ettirilir ve yüzey üzerinde pim izi çıkartılıp işaretleme yapılır. 0,001mm hassasiyet ile gerçekleştirilen takım doğrusallığı ayarı tamamlanmış olur. Daha sonra takım kaynak hattının başlangıç noktasına geri çekilir.

7.7. Kaynaklı bağlantıların üretimi

SKK işlemi için ayarlamalar tamamlandıktan ve kaynaklı bağlantı üretimine geçilebilir.

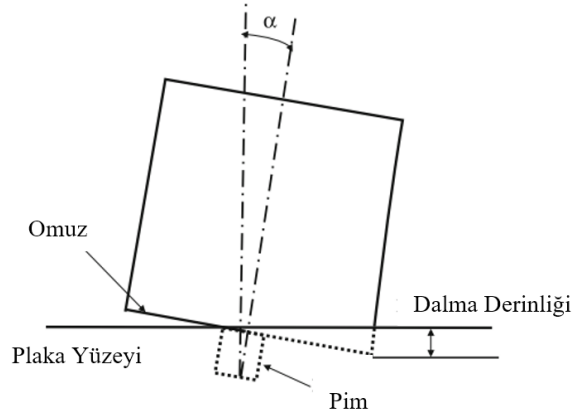
SKK prosesi;

1. Takımın dalması
2. Takım ilerlemesi ve karıştırma
3. Takımın geri çekilmesi

aşamalarından oluşmaktadır.

7.7.1. Takımın dalması (Dalma derinliği)

Proses tanımlanan hızda takımın dönmesi ile başlar ve dönen takım pimi kaynak hattının başlangıç noktasına girer. Takımın omuz yüzeyi, omuz çapına bağlı olarak plaka yüzeylerinden 0,28 ile 0,45 mm arasında derine daldırılır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Takım dalma derinliği (penetrasyon) (Davim, 2015)

7.7.2. Takım Ön Isıtma Süresi

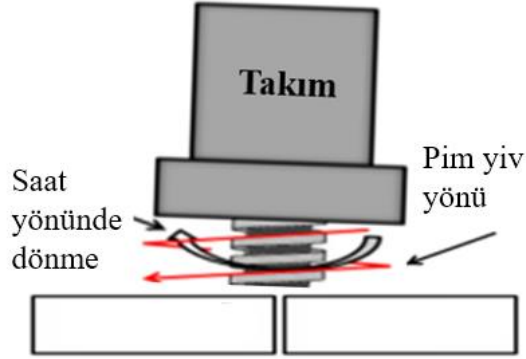
Takım bu derinliğe daldırıldıktan sonra dikey hareketi durdurulur ve dönme hareketi devam ettirilir. Bu periyot ön ısıtmada kalma süresidir. Yüksek kaynak kalitesine sahip olan bağlantılar incelendiğinde bu sürenin minimum 50 s olması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Bu ön ısıtma süresi bütün deney tekrarları için standartlaştırılmıştır. Plakalar ve takım arasındaki sürtünme sebebiyle yeterli ön ısıtma sağlandıktan sonra takım deney tasarım matrisindeki ilerleme hızında yol almaya başlar. Takım kaynak hattı boyunca ilerlemeye başlarken karıştırma aşaması da başlamış olur.

7.7.3. Kaynak hattı boyunca takımın ilerlemesi

Takım üzerindeki pimi çevreleyen polimer malzeme ısıtılır ve karıştırılır. Dönen pimin malzemeye sürtünmesi sayesinde oluşan ısı hamur kıvamına gelen polimeri karıştırır. Takım omuzu yumuşayan malzeme üzerinde sıkıştırma etkisi yapar ve basınç oluşturur. Bu olgu atomik ölçekte bağlantıyı sağlamaktadır (Arıcı and Sınmazçelik, 2005). Dönen takım ilerlerken omuz altındaki HDPE plakaların sıcaklığı artar ve HDPE polimerin mukavemeti düşer. Kaynak hattı tamamlandığında plakalar dönen takım sayesinde birbirlerine kaynaklanmış olur.

Bütün deneylerde sağ diş açılmış pim profilini üzerinde taşıyan SKK takım 2°'lik eğim açısında saat yönünde (CWD) döndürölerek kaynak prosesi tamamlanmıştır. Helis yönünün sağa doğru olması nedeniyle kaynak bölgesinde malzeme akışı aşağıya doğru olmuştur. Takım pim kesiti ve takımın eğimi karıştırma ve makaslama etkisi için gereklidir (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Takım dönüş yönü ve pim yiv yönü

7.7.4. Kaynak yönü ve kaynak hattı tipi

Kaynak yönü haddeleme yönüne dik olarak gerçekleştirilmiş ve plakalar üzerinde sadece üst yüzeyde olacak şekilde tek kaynak hattı yapılmıştır.

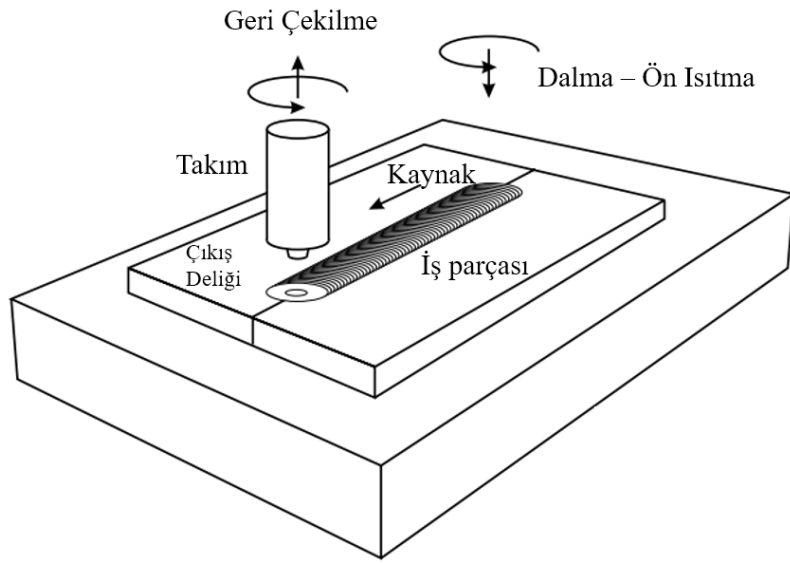
7.7.5. Takımın geri çekilmesi ve kaynağın tamamlanması

Kaynak hattının sonuna ulaşıldığında takım ilerlemesi durdurulur. Karıştırma aşaması tamamlandığı için takım geri çekilir ve takımın dönmesi durdurulur. Kaynak hattı sonunda takım üzerindeki pim nedeniyle plakaların ara yüzeyinde bir delik oluşur (Panneerselvam and Lenin, 2014). Şekil 7.7 SKK prosesindeki kaynak aşamalarını şematik olarak göstermektedir.

7.7.6. Takımın soğuması ve temizliği

Takımın hızla havada soğuyabilmesi ve proste talaş üretilmemesi sebebiyle takımın soğutulması ve temizlenmesine çok ihtiyaç olmaz.

Buna eğer takım omuzu ve pim üzerinde proses sırasında plaka kalınlığını inceltecek önemli miktarda çapak veya polimer ile kaplanmış bölge olursa bunların mekanik fırçalama veya basınçlı havayla temizlenmesi gerekir.



Şekil 7.7. SKK proses adımları

7.7.6.1. Deney tasarım matrisindeki deneylerin ve tekrarlarının tamamlanması

Birinci deney tekrarları tamamlandıktan sonra deneysel tasarım matrisindeki deney şartlarına ve tekrar sıralarına göre ikinci tekrarlar tamamlanmıştır. Kaynak deneyleri proses parametrelerinin etkisini gözlemlemek amacıyla takım dönme hızı ve ilerleme hızı değiştirilerek her koşul için tekrarlanmıştır ve 16 mm ve 20 mm'lik omuz çapları için de tekrarlanmıştır. Aynı prosedür bölüm 8.1.9'daki doğrulama deneyleri ve tekrarları için de uygulanmıştır.

7.8. Kaynaklı Bağlantıların Karakterizasyonu – Çekme Testleri ve Görsel Muayene

7.8.1. Kaynak numunelerini tanımlanması ve kodlama

Kaynaklı plakalar ve plakalardan çıkarılan çekme testi numuneleri üç basamaklı bir sayı tanımlanmıştır: İlk rakam, deney tasarım matrisindeki 1'den 9'a kadar olan deney şartlarını tanımlayan rakam, ikincisi ise tekrar sayısı (1 veya 2) ve üçüncü ise kaynak hattı boyunca kaynaklı plakalardan çıkarılan örneklerin pozisyonunu belirten çekme test numunelerin numarası (1 ve 7 arasında) olarak tahsis edilmiştir. Bu nedenle, örneğin tanımlama kodu 324 olan numunesi, üçüncü deney koşulu ile gerçekleştirilen kaynak prosesinde (800 d/d, 40 mm/dk ve 24 mm'lik takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve omuz çapına karşılık gelen deney koşulu) ikinci tekrarda ve kaynak hattının ortasından dördüncü pozisyondan çıkarılan çekme test numunesidir.

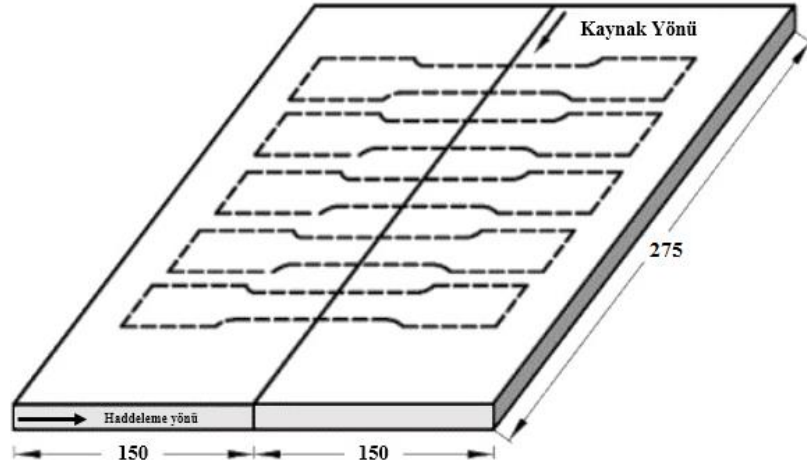
7.8.2. Çekme testi numunesi çıkarma

Kaynak işleminden sonra ve kaynak hatlarının morfolojik görsel incelemesi için fotoğraf kayıtları alındıktan sonra her kaynaklı plaka grubundan çekme testlerinin güvenilirliğini garanti altına almak ve gürültü faktörlerini azaltmak için yedi çekme testi numunesi çıkartılmıştır. Numuneler plakalardan DIN EN ISO 527 göre standart boyut ve geometride çekme testi numune çıkarma kalıbı (Şekil 7.8) ile kesilerek boşaltma yöntemiyle çıkarılmıştır.

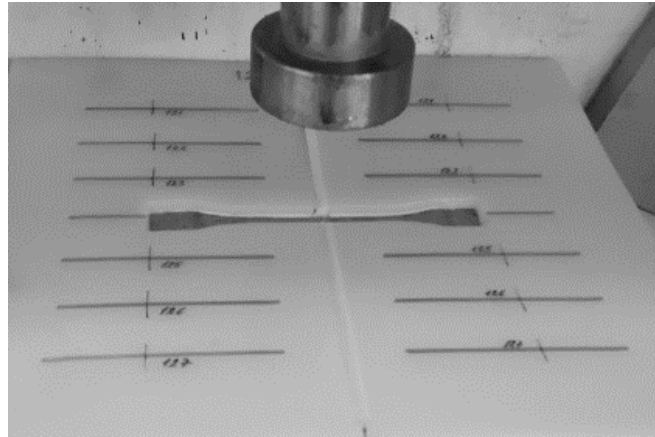
Çekme testi numuneleri Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 de gösterildiği gibi kaynaklı plakalarından kaynak yönüne dik olarak ve kaynak başlangıç ve bitiş etkilerini yok etmek için kaynak hattının orta bölgesinden alınmıştır.



Şekil 7.8. Çekme testi numunesi çıkarma kalıbı



Şekil 7.9. Çekme testi numunesinin kaynak hattına dik çıkarılması



Şekil 7.10. Çekme testi numunesi çıkarma kalıbı ile numunelerin hidrolik preste çıkarılması

7.8.3. Çekme testi için numene hazırlama – ölçüm noktalarının işaretlenmesi

Temassız video ekstansometre ile uzama ölçümlerini yapmak için test öncesinde numunelerin yüzeylerinde beyaza boyanmış mat bölgelere $L_0=50$ mm başlangıç uzunluğu, enine siyah çizgi desenlerin çizilmesi ile işlenmiştir. (Şekil 7.11)

7.8.4. Çekme testleri

Çekme testi cihazı olarak bilgisayar kontrollü servo hidrolik Shimadzu Autograph AG-IS 100 modeli kullanılmıştır. Universal test cihazı kaydırmaz kamalı tip çeneli ve çok hassas iki kameralı çok noktalı temassız ekstansometre ile uzama ölçümü yapmaktadır. Çekme testleri 100 kN yük hücresi ile 5 mm/dk'lık çekme hızıyla oda sıcaklığında ($23 \pm 1^{\circ}\text{C}$), DIN EN ISO 527 göre gerçekleştirilmiştir (Brown, 1999).

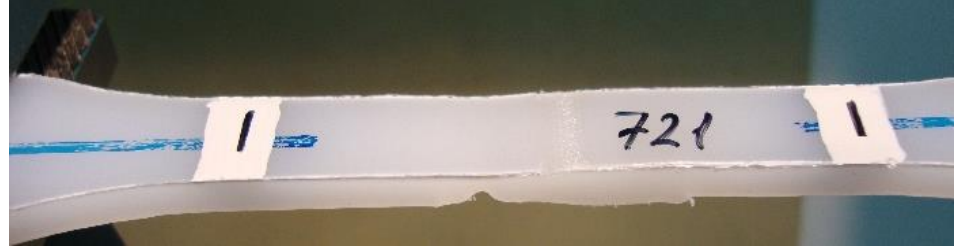
Testler sırasında kuvvet ve uzatma verileri Trapezium 2 malzeme test yazılımı tarafından işlenmiş ve mukavemet - birim şekil değiştirme grafikleri olarak kopma noktasına kadar $L_0=50$ mm başlangıç uzunluğu baz alınarak temassız video ekstansometrenin kullanarak eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Şekil 7.11'de gösterilen 721 no'lu çekme testi numunesi için kaynak mukavemeti (MPa) – birim şekil değiştirme (%) grafiği Şekil 7.11'de örnek olarak verilmiştir.

7.8.5. Numunelerin kaynak mukavemeti

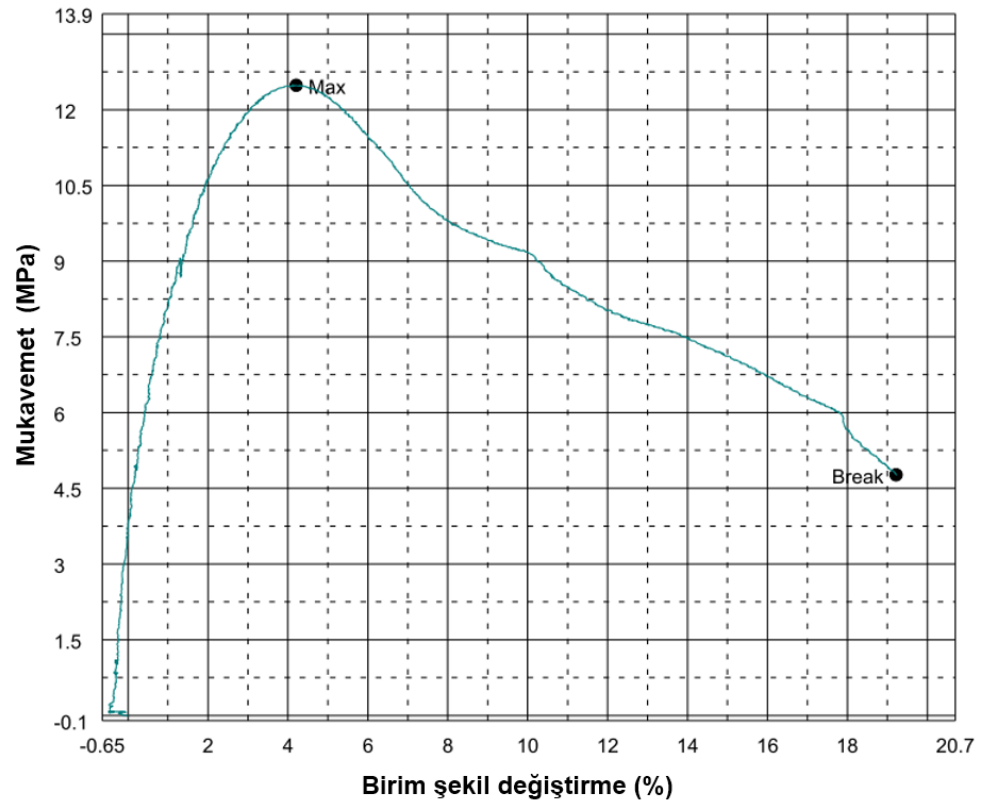
Numunelerinin kaynak mukavemeti ve kaynak verimliliğini değerlendirmek için SKK ile birleştirilmiş HDPE plakaların çekme testleri yapılmıştır (Şekil 7.13).

7.8.6. Baz malzemenin maksimum çekme mukavemeti

Baz malzemenin maksimum çekme mukavemetini bulmak için test numuneleri çekme testi numune çıkarma kalıbı (Şekil 7.8) ile HDPE plakalardan kesilmiş ve yedi test numunesinin ortalama mukavemet değerleri 17,25 MPa olarak bulunmuştur (Çizelge 7.1). Şekil 7.12'de örnek olarak baz malzemeye ait çekme mukavemeti (MPa) – birim şekil değiştirme (%) grafiği verilmiştir.



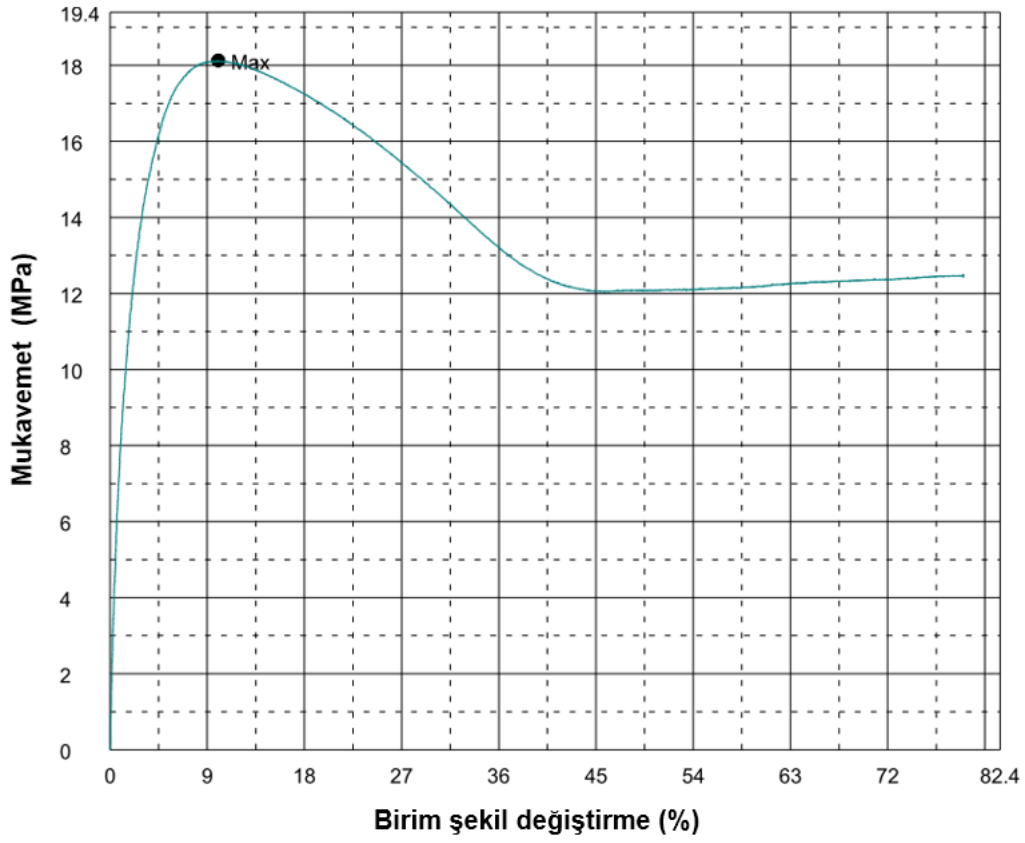
Şekil 7.13. Kaynak mukavemeti için çekme testi numunesi



Şekil 7.14. 721 no'lu çekme testi numunesi için kaynak mukavemeti (MPa) – birim şekil değiştirme (%) grafiği



Şekil 7.13. Kaynak bağlantısının çekme testi



Şekil 7.15. Baz malzeme için çekme mukavemeti (MPa) – birim şekil değiştirme (%) grafiği

8. SONUÇLAR

8.1. Kaynak Mukavemeti ve Kaynak Verimliliği için Taguchi Yöntemi Sonuçları

Çizelge 8.1’de Taguchi yöntemi ile tasarlanan deneyler sonucunda elde edilen kaynak mukavemeti, kaynak verimliliği verilmiştir. En düşük mukavemet değeri (baz malzemenin %9,4’ü) takım dönüş hızının orta seviyesinde, takım ilerleme hızının en yüksek değerinde ve takım omuz çapının orta seviyelerinde kaynak işlemi yapılan numunelerden (numune 6) elde edilirken, en yüksek kaynak verimliliği (%65,4) takım dönüş hızının maksimum seviyesinde, takım ilerleme hızının en düşük değerinde ve maksimum takım omuz çapı değeri ile kaynak işlemi yapılan numunelerden elde edilmiştir (Numune 7). Çizelge 8.1’ün son kolonunda tasarlanan deneyler için Minitab v.17 ile hesaplanan S/N oranları gösterilmektedir (Minitab, 2010).

Çizelge 8.1. Çekme deneyi sonuçları

Deney No:	Kaynak Parametreleri			Kaynak Mukavemeti (Ortalama)	Kaynak Verimliliği	Hesaplanan S/N Oranı
	A	B	C			
	Takım Dönme Hızı	Takım İlerleme Hızı	Takım Omuz Çapı			
#	(d/d)	(mm/dk)	(mm)	(MPa)	(%)	(dB)
1	800	12,5	16	3,6	20,9	10,61
2	800	20	20	7,6	44,3	17,59
3	800	40	24	3,2	18,6	7,49
4	1250	12,5	20	10,2	59,1	20,12
5	1250	20	24	9,4	54,7	18,75
6	1250	40	16	1,6	9,4	3,98
7	1600	12,5	24	11,3	65,4	21,03
8	1600	20	16	7,6	44,2	17,64
9	1600	40	20	6,9	39,7	16,72

8.1.1. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi

Taguchi deneysel tasarım yönteminde “sinyal” terimi istenen çıktı karakteristiğinin ortalama değeri için “gürültü ” terimi ise istenmeyen çıktı

karakteristiği için kullanılmıştır. S/N oranı istenen değer etrafındaki çıktı karakteristiğinin varyansına karşılık gelir. S/N oranı istatistiksel olarak ortalama değerlerin (M) sapmaların karesine (SD) oranı olarak tanımlanabilir (Eşitlik (8.1)).

Taguchi yöntemi performans karakteristiklerinin istenen değerden sapma oranını ölçmek için S/N oranını kullanır (Taguchi et al., 2005; Bendell et al., 1989).

$$S/N = -10 \log (MSD) \quad (8.1)$$

MSD prodesteki çıktı karakteristiği için ortalama sapmanın karesidir. SSK prosesinde kaynak mukavemetinin yüksek olması istendiğinden yüksek olan en iyidir performans karakteristiği (larger is better - quality characteristic) için MSD aşağıdaki gibi eşitlik (6.4)'den türetilen eşitlik (8.2) ile ifade edilir.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (8.2)$$

Çizelge 6, HDPE için kaynak mukavemeti değerlerini ve bu değerler için eşitlik (8.1) ve (8.2) ile hesaplanan S/N oranları göstermektedir. Bu değerler istatistiksel analiz programı olan Minitab v.17 kullanılarak hesaplanmıştır (Minitab, 2010).

8.1.2. Ortalamalar ve S/N oranları için sonuç tabloları ve ana etki (faktör etkileri) grafikleri

Çizelge 8.1'de kaynak parametrelerine ve seviyelerine bağlı dokuz farklı kaynak kombinasyonu kullanılmıştır. Herbir kaynak parametresinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi Çizelge 3'den açık bir şekilde anlaşılamaz.

Deneysel tasarım ortogonal olduğu için her kaynak parametresini üç seviyeye bölmek mümkündür. Örneğin 1. 2. ve 3. seviyedeki takım dönüş hızı için ortalama S/N oranı sırasıyla 1-3, 4-6 ve 7-9 no'lu deneylerin sonucunda elde edilen S/N oranlarının ortalaması ile elde edilebilir.

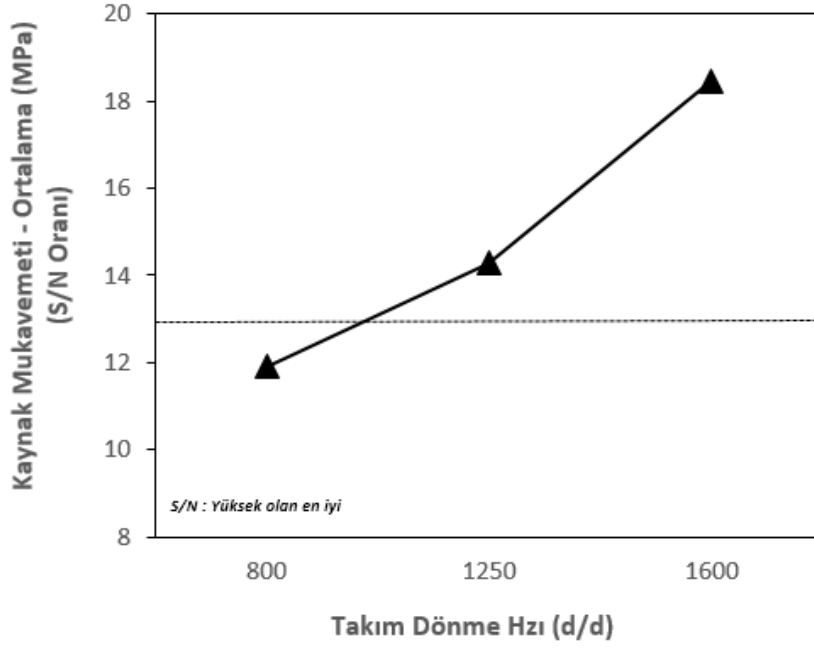
Minitab v.17 programında yapılan analizler sonucunda, HDPE için çekme deneyi sonuçlarına göre S/N oranları için sonuç tablosu (Çizelge 8.2) ve faktör etkileri grafikleri (Şekil 8.1, 8.2, 8.3) oluşturulmuştur. Aynı şekilde ortalamalar için sonuç tablosu (Çizelge 8.3) ve faktör etkileri grafiği (Şekil 8.4, 8.5, 8.6) kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini göstermek için oluşturulmuştur (Minitab, 2010, Ülker et al., 2015).

Çizelge 8.2. S/N oranı için sonuç tablosu (En yüksek- en iyi)

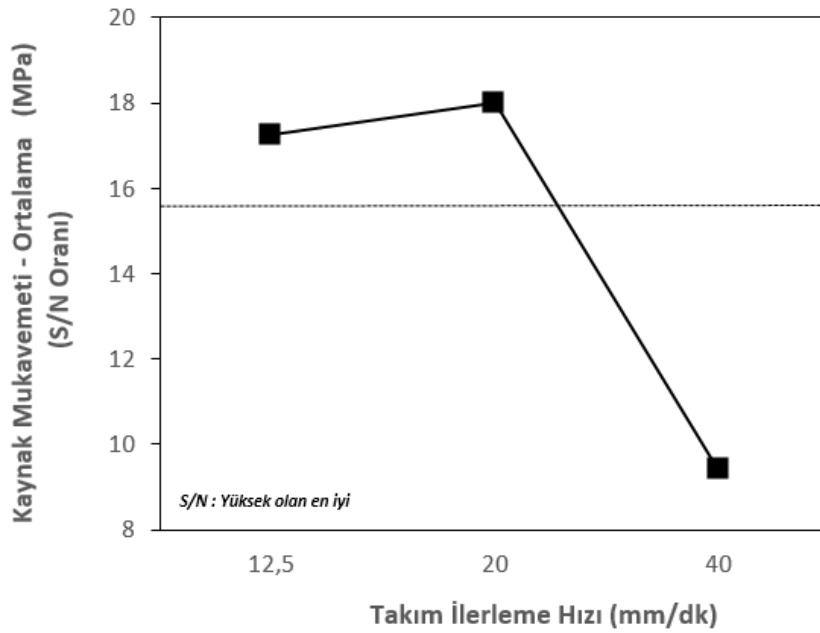
Sembol	Kaynak Parametreleri	S/N Ratio (dB)						
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Mak.	Min.	Fark	Sıra
A	Takım Dönme Hızı	11,90	14,28	18,46	18,46	11,90	6,57	3
B	Takım İlerleme Hızı	17,25	17,99	9,39	17,99	9,39	8,60	1
C	Takım Omuz Çapı	10,74	18,14	15,75	18,14	10,74	7,40	2

Çizelge 8.3. Ortalamalar için sonuç tablosu

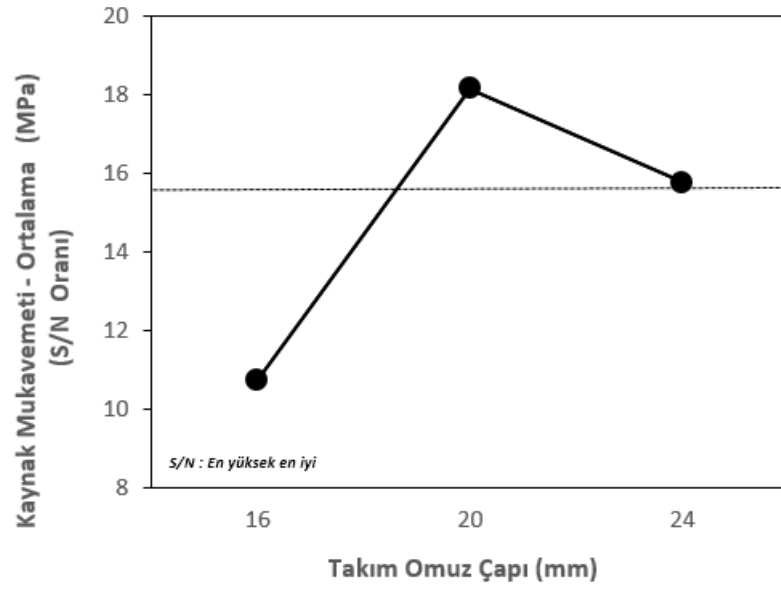
Sembol	Kaynak Parametreleri	Ortalamalar						
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Mak.	Min.	Fark	Sıra
A	Takım Dönme Hızı	4,82	7,08	8,58	8,58	4,82	3,76	3
B	Takım İlerleme Hızı	8,36	8,23	3,89	8,36	3,89	4,47	1
C	Takım Omuz Çapı	4,29	8,23	7,97	8,23	4,29	3,95	2



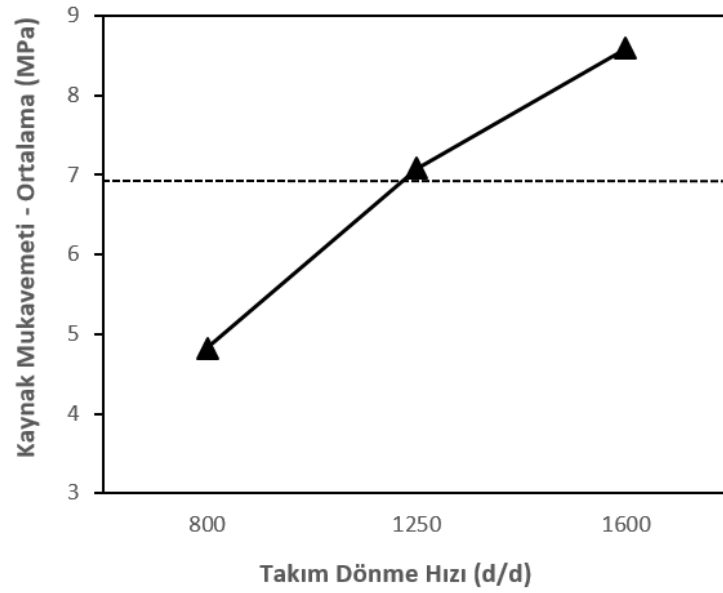
Şekil 8.1. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)



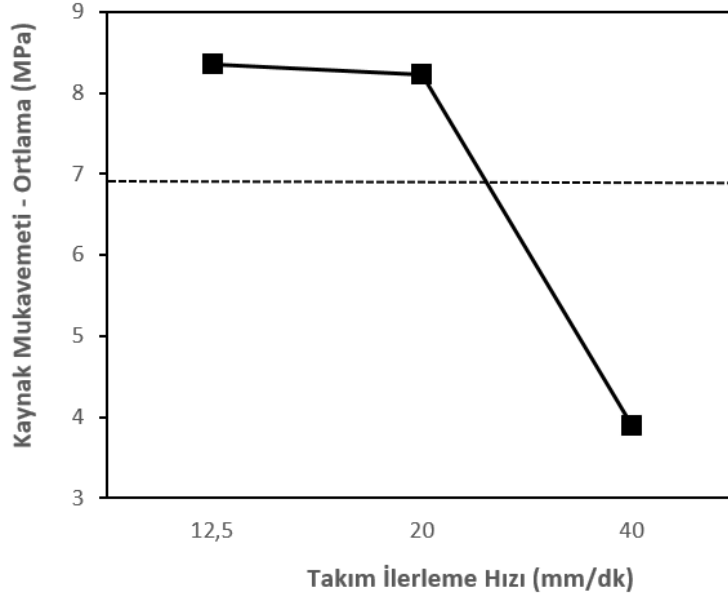
Şekil 8.2. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Takım ilerleme hızı – kaynak mukavemeti)



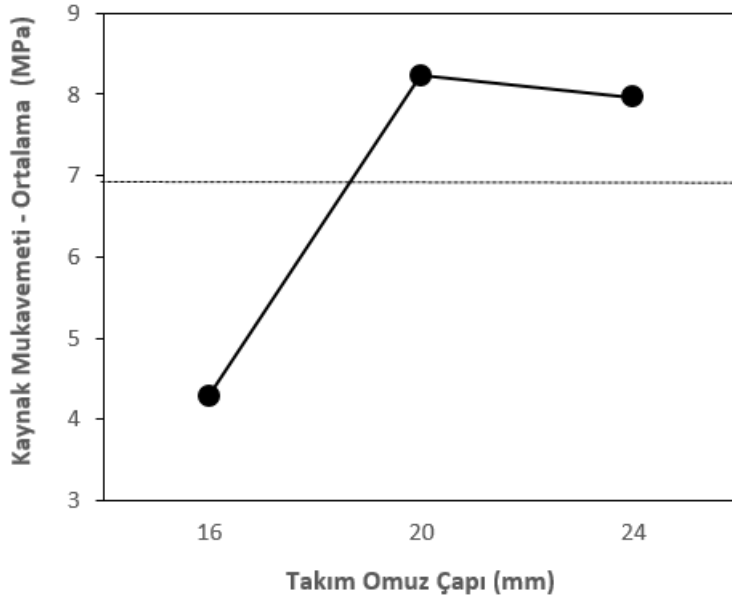
Şekil 8.3. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.4. Faktör etkileri grafiği (Takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.5. Faktör etkileri grafiği (Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)

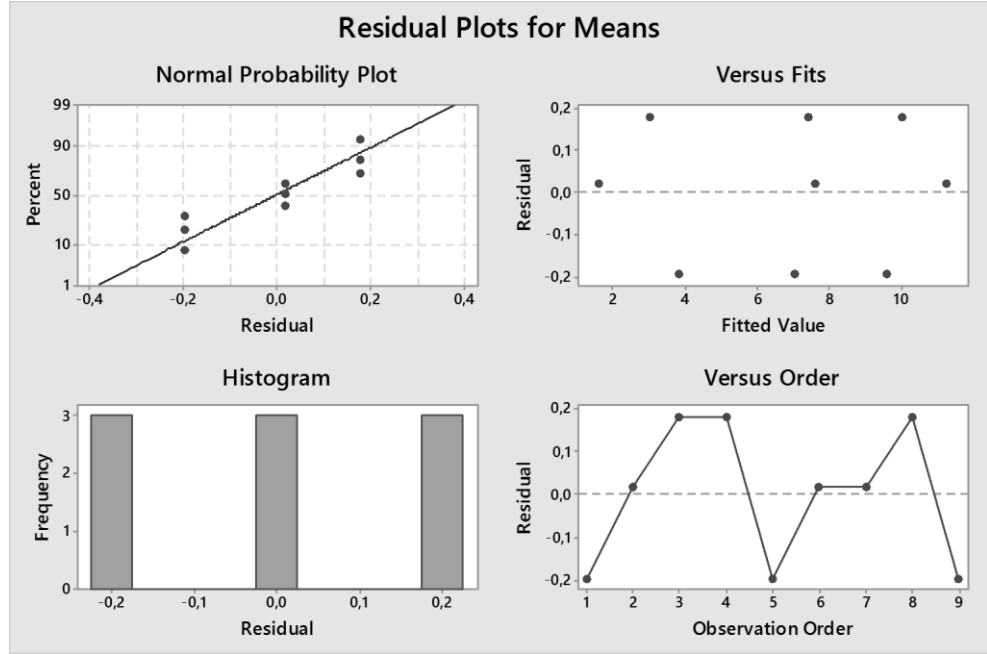


Şekil 8.6. Faktör etkileri grafiği (Takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)

8.1.3. Normal olasılık ve artık değerler grafikleri

Çizelge 8.1'deki kaynak mukavemeti ortalama değerleri ile oluşturulan Şekil 8.7'deki artık değerler grafikleri, görsel olarak incelendiğinde kaynak

mukavemetlerinin bağımsızlık ve normallik varsayımları açısından olağandışı bir eğilim göstermediği anlaşılmıştır.



Şekil 8.7. Kaynak mukavemetleri için normal olasılık ve artık değerler grafikleri

8.1.4. Varyans analizi (ANOVA)

Proses parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerinin göstermenin diğer yolu iki aşamalı olarak uygulanan deneysel verilerin istatistiksel analizini yapmaktır. İlk aşama varyans analizi (ANOVA), ikinci aşama ise SKK prosesi ile ilgili girdi parametrelerinin korelasyonu ile ilgilidir (F- test) (Fisher, 1966).

İlk aşamada ANOVA yöntemi girdi değişkenlerinin (SKK prosesi ve çalışma parametreleri) cevap değişkeni (kaynak mukavemeti) üzerindeki etkisini bu iki değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılır.

Varyans analizinin amacı, istatistiksel olarak hangi kaynak parametresinin kaynak mukavemetine önemli ölçüde etki ettiğinin varyansların bileşenlerine ayrılmasıyla etki oranlarının hesaplanması ve belirlenmesidir. Bu analizde takım dönüş hızı, takım ilerleme hızı, takım omuz çapı kaynak prosesi için girdi değişkenleri, kaynak mukavemeti de çıktı değişkeni olarak alınmıştır. Bu analizde takım dönüş hızı, takım ilerleme hızı ve takım omuz çapı

girdi değişkenleri, kaynak mukavemeti de çıktı değişkeni olarak alınmıştır. Çizelge 8.4’de kaynak mukavemeti için ANOVA sonuçlarını veren Minitab çıktısı verilmiştir.

Çizelge 8.4. Kaynak mukavemeti için ANOVA sonuçları

Kaynak Parametreleri	Sembol	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması (Varyans)	Varyans Oranı	Yüzde Katkı
Faktör		f	S	V	F	C (%)
Takım Dönme Hızı	A	2	21,548	10,774	100,432	24,01
Takım İlerleme Hızı	B	2	38,770	19,385	180,699	43,20
Takım Omuz Çapı	C	2	29,214	14,607	136,161	32,55
Hata	e	2	0,215	0,107	1,000	0,24
Toplam		8	89,747			100,00

8.1.5. Fisher testi (F test)

İstatistiksel analizin ikinci aşaması, parametrelerin önem derecesini değerlendirmek için Fisher testinin uygulanmasıdır. Büyük F değerleri kaynak parametrelerindeki değişme derecesi (varyasyon) büyük değişim yaratır. Bu çalışmada en yüksek kaynak mukavemeti değeri Minitab V.17. kullanılarak analiz edilmiştir.

Çizelge 8.5’deki varyans oranları (F), Çizelge 8.6’daki Fisher testi anlamlılık düzeyleri ile beraber değerlendirildiğinde, HDPE polimer malzemenin SKK prosesini etkileyen faktörlerin Fisher testi anlamlılık düzeyleri Çizelge 8.5’deki gibi özetlenebilir.

Takım dönüş hızı, takım ilerleme hızı ve takım omuz çapının istatistiksel olarak % 99 anlamlılık düzeyinde kaynak mukavemetine etki ettiği bulunur. SKK prosesindeki F değerleri (100,43 - 180,70 - 136,16), bu parametreler için hesaplanan teorik Fisher test değerinden ($F_{0.01}(2,2) = 99,00$) büyük olduğu için anlamlılık düzeyleri %99’dan büyüktür. Ayrıca takım ilerleme hızı kaynak mukavemetini arttıran en etkin değer olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.5. Fisher test değerleri

$F_{\alpha} (f_1, f_2)$	Anlamlılık Düzeyi (%)	Güven Düzeyi (%)	Fisher Test Değeri
$F_{0.005} (2,2)$	0,50	99,50	199,00
$F_{0.01} (2,2)$	1,00	99,00	99,00
$F_{0.05} (2,2)$	5,00	95,00	19,00

α : Anlamlılık düzeyi

f_1 : Değişken faktör için serbestlik derecesi

f_2 : Hata faktörü için serbestlik derecesi

Çizelge 8.6. Kaynak parametreleri için F-test değerleri

Sembol	Kaynak Parametreleri	Varyans Oranı	Güven Düzeyi (%)
A	Takım Dönme Hızı	100,43	99,00
B	Takım İlerleme Hızı	180,70	99,00
C	Takım Omuz Çapı	136,16	99,00

8.1.6. Faktörlerin kaynak mukavemetine katkı oranı

Katkı oranı (P_i) eşitlik (6.15)'deki gibi her bir faktöre atfedilen ve deneyde gözlenen toplam varyasyonun bir parçasıdır. Katkı oranı her bir faktör için kareler toplamının (SS') toplam kareler toplamına (SS_T) oranı olarak verilir. Bu farklılıkları azaltmak için her faktörün göreceli olarak gücünü gösterir (Eşitlik (8.3)).

$$P_i = \frac{SS'_i}{SS_T} \quad (8.3)$$

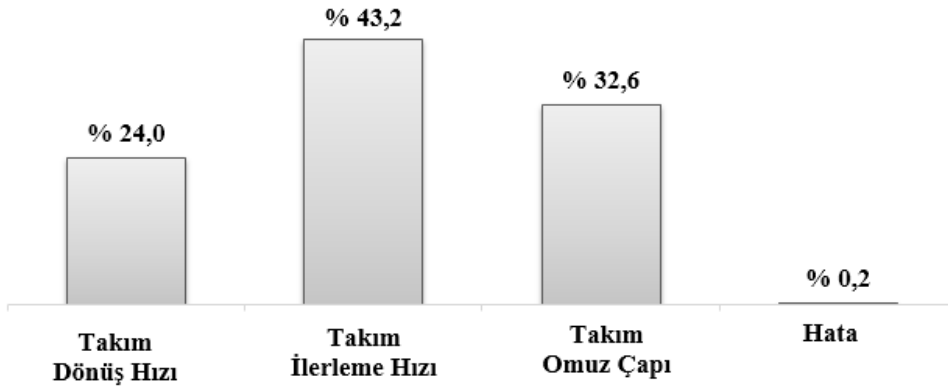
Kaynak parametre seviyeleri tam olarak kontrol edilirse, toplam varyasyon katkı yüzdesi ile belirtilen miktarda azaltılabilir.

Örneğin, takım dönme hızının katkı oranı (P_A) eşitlik (8.3) ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_B = \frac{SS'_A}{SS_T} = \frac{38,770}{89,747} = 0,432$$

$$P_B = \%43,2$$

Kaynak işlemi sırasında her bir kontrol faktörünün etkisi Şekil 8.8'de katkı yüzdeleri ile görülmektedir. SKK proses parametrelerinin toplam katkı oranı % 99,8 oranındadır. Toplam varyansın sadece %0,2'si deneysel hatalar ile oluşmuştur. Bu çalışmada hesaplanan değerlere göre HDPE plakalar için SKK prosesinde etkin olan kaynak parametreleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Çizelge 8.1'deki ANOVA tablosundan ve Şekil 9'dan da anlaşılacağı gibi HDPE malzemenin SKK prosesindeki kaynak mukavemeti ve verimliliğinde en etkin (baskın) parametre %43,2'lik katkı oranı ile takım ilerleme hızı olarak bulunmuştur.



Şekil 8.8. Kaynak parametrelerinin katkı oranları

8.1.7. Optimum kaynak mukavemeti ve verimliliğinin tahmini

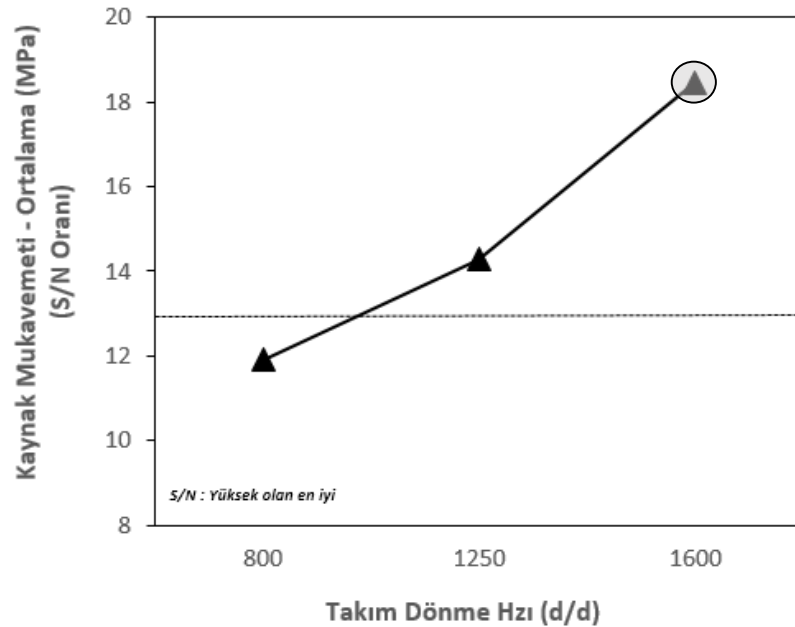
SKK ile kaynaklı bağlantı yapılmış HDPE plakalar için uygulanan çekme deneyi sonuçlarına göre S/N oranları için sonuç tablosu (Çizelge 8.2) ve faktör

etkileri grafiklerindeki (Şekil 8.1, 8.2, 8.3) en yüksek S/N oranına sahip olan seviyelerin alınması ile oluşturulan Şekil 8.9, 8.10 ve 8.11 grafiklerinden optimum kaynak parametreleri $A_3B_2C_2$ olarak bulunur.

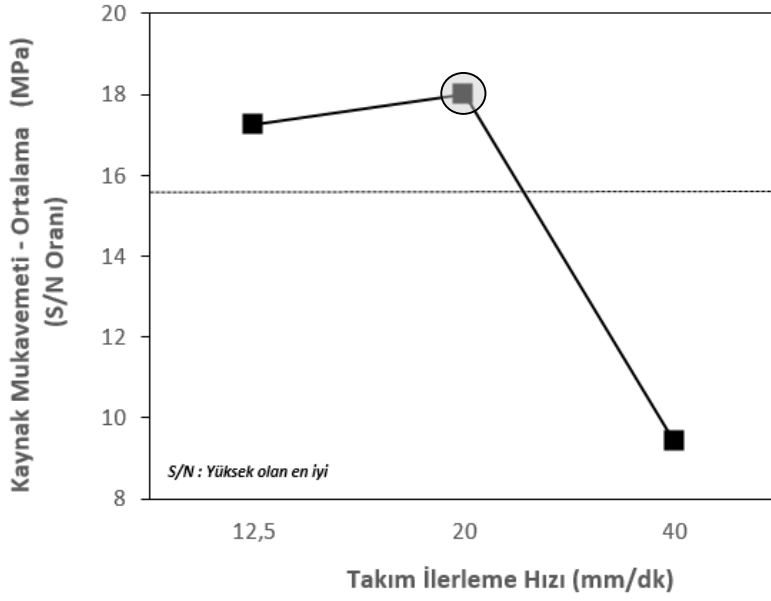
Çizelge 8.7’de optimum kaynak parametreleri ve seviyeleri verilmiştir. HDPE malzemede SKK verimliliği için takım dönüş hızının (A) seviye 3’e takım ilerleme hızı (B) ve takım omuz çapının (C) seviye 2’ye ayarlanması durumunda Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre optimum kaynak mukavemetine ulaşılabacaktır. (Çizelge 8.9)

Çizelge 8.7. Optimum kaynak parametreleri ve seviyeleri

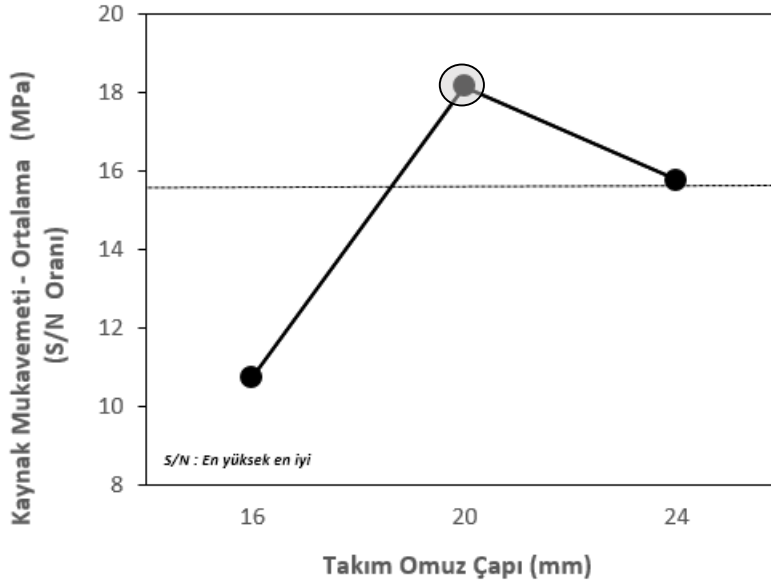
Sembol	Kaynak Parametreleri	Optimum Kaynak Parametreleri ve Seviyeleri		
		Seviye		
A	Takım Dönme Hızı	3	1600 d/d	$A_3B_2C_2$
B	Takım İlerleme Hızı	2	20 mm/dk	
C	Takım Omuz Çapı	2	20 mm	



Şekil 8.9. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Optimum takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.10. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Optimum takım ilerleme hızı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.11. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(Optimum takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)

Optimum kaynak mukavemeti için parametre ve seviyeler $A_3B_2C_2$ olduğu için tahmin edilen optimum kaynak mukavemeti (KM_{opt}) eşitlik (8.4) kullanılarak hesaplanır.

$$KM_{opt.} = A_3 + B_2 + C_2 + 2T_m. \quad (8.4)$$

Formüldeki T_m Tablo 4'deki kaynak mukavemetlerinin ortalamasıdır.

$$KM_{opt.} = 11,39 \text{ MPa}$$

11,39 MPa'lık kaynak mukavemetine karşılık gelen SKK kaynak verimliliği (η) (8.5) eşitliği ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{KM_{opt.}}{UTS} \quad (8.5)$$

Eşitlikteki UTS HDPE plakaların çekme mukavemetidir. (17,25 MPa)

$$\eta = \frac{11,39}{17,25} \approx \%66$$

KM_{opt} eşitlik (6.4)'teki y_i yerine konursa (8.6) eşitliği oluşturulur.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{KM_{opt.}^2} \right) \quad (8.6)$$

S/N oranı 21,13 dB olarak bulunur. Hesaplanan optimum kaynak mukavemeti ve S/N oranları Çizelge 8.9'da verilmiştir.

8.1.8. Optimum koşulda sonuçların güven aralığı

Güven aralığı (confidence interval - CI) gerçek ortalamanın belirtilen güven yüzdesi aralığındaki maksimum ve minimum değeridir. Bir aralık için güven seviyesi seçiminin belirlediği CI'ın ürettiği olasılık gerçek parametre değerini içerecektir. Güven aralığı (CI) aşağıdaki eşitlik (6.16) ile bulunur.

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha}(f_1, f_2) V_e}{n_e}}$$

$F_{\alpha}(f_1, f_2)$ (α) anlamlılık düzeyinde f_1 ve f_2 serbestlik derecesi (DOF) için varyans oranıdır. Güven düzeyi $(1 - \alpha)$ 'dır. f_1 ortalamanın serbestlik derecesidir. Her zaman 1'e eşittir. f_2 hata teriminin serbestlik derecesidir. V_e hata teriminin varyansı ve n_e ise eşdeğer tekraralama sayısıdır. (Eşitlik (6.17)).

Optimum kaynak mukavemeti için güven aralığını belirlemek için eşitlik (6.16) ve (6.17) eşitlikleri aşağıdaki gibi kullanılır.

$$n_e = \frac{T}{M + S}$$

$$n_e = \frac{9}{1 + 2 + 2 + 2} = 1,286$$

$F_{0,1}(1, 2) = 8,53$ ve $V_e = 0,107$ olduğu için optimum kaynak mukavemeti etrafındaki güven aralığı %90 olasılık ile;

$$CI_{\%90} = \pm 0,84 \text{ MPa'dır.}$$

Bu nedenle, optimum şartlardaki sonuç;

$$KM_{opt.} = 11,39 \pm 0,84 \text{ MPa}$$

olarak yazılabilir.

Bu nedenle optimum kaynak mukavemetinin gerçek değerinin %90 olasılık ile 10,55 ile 12,23 MPa arasında olduğu ifade edilebilir. CI diğer istatistikler için benzer şekilde hesaplanabilir (Çizelge 8.8).

Çizelge 8.8 Farklı istatistikler için güven aralıkları

Anlamlılık Düzeyi	Güven Düzeyi	Serbestlik Derecesi		Varyans	Güven Aralığı (MPa)	Optimum Kaynak Mukavemetinin Gerçek Değeri (MPa)	
		Ortlamalar	Hata Terimi			Alt Değer	Üst Değer
α	$(1 - \alpha)$	f_1	f_2	$F_\alpha(f_1, f_2)$	CI		
0,10	% 90	1	2	8,53	$\pm 0,84$	10,55	12,23
0,05	% 95	1	2	18,51	$\pm 1,24$	10,15	12,63
0,01	% 99	1	2	98,50	$\pm 2,86$	8,53	14,25

% 90 ve %99 arasındaki güven aralıkları endüstriyel deneyler için yaygın güven aralıklarıdır (Roy, 2001). Bundan sonraki hesaplamalar için %90 güven aralığı kullanılacaktır.

8.1.9. Deneylerin ve sonuçların doğrulanması

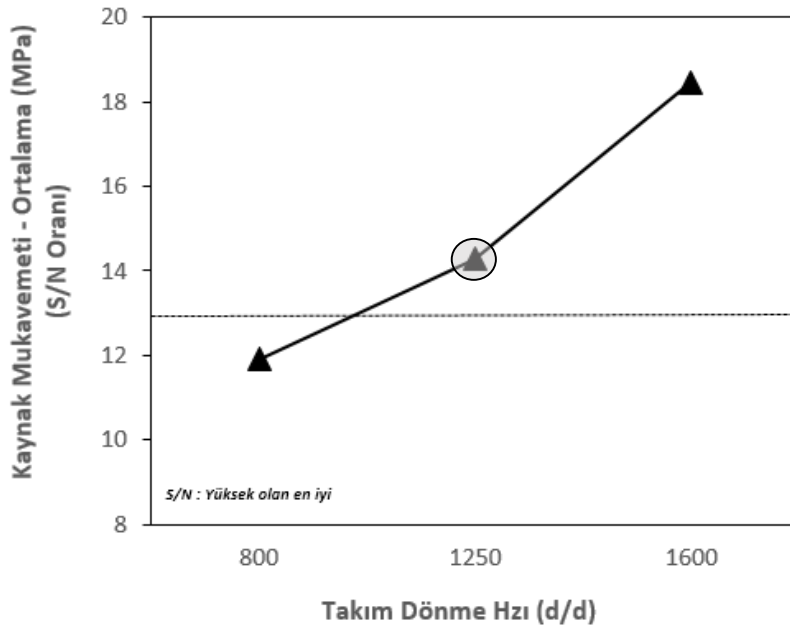
Optimum kaynak parametreleri belirlendikten sonraki son adım, kaynak mukavemetindeki iyileştirmenin optimum kaynak parametreleri kullanılarak doğrulanması adımıdır. Doğrulama deneylerin amacı analizi sırasında ulaşılan sonuçları sorgulamak ve onaylamaktır. Geliştirilen istatistiksel modelleri doğrulamak için bu deneyler yapılmalıdır. Bu çalışmada, doğrulama deneyleri optimum kaynak parametre seviyelerindeki değerler ile SKK işleminin yapılması ve kaynak mukavemetinin bulunması ile tamamlanmıştır.

8.1.10. İlk kaynak mukavemeti ve verimliliğinin hesaplanması

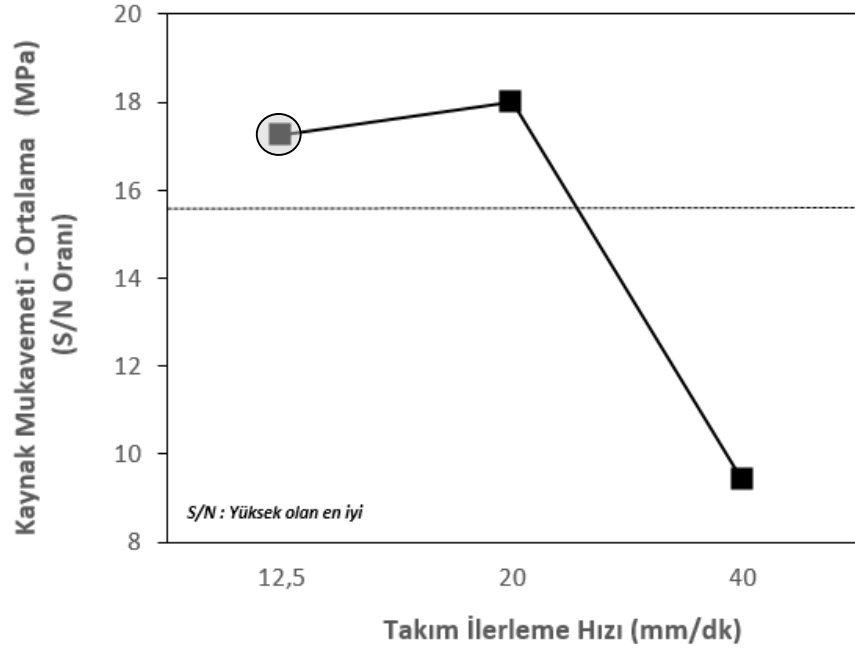
Optimum kaynak parametreleri bulunurken kullanılan Şekil 8.1, 8.2 ve 8.3'deki S/N oranları için verilen faktör etkileri grafikleri, ilk kaynak parametre seviyelerinin belirlenmesinde de kullanılır. İlk kaynak parametre seviyeleri, Şekil 8.12, 8.13 ve 8.14'deki kesikli çizgiler ile gösterilen ortalama seviyelere en yakın olan kaynak mukavemetlerine karşılık gelen $A_2B_1C_3$ seviyeleri olarak bulunmuştur (Çizelge 8.9).

Çizelge 8.9. İlk kaynak parametreleri ve seviyeleri

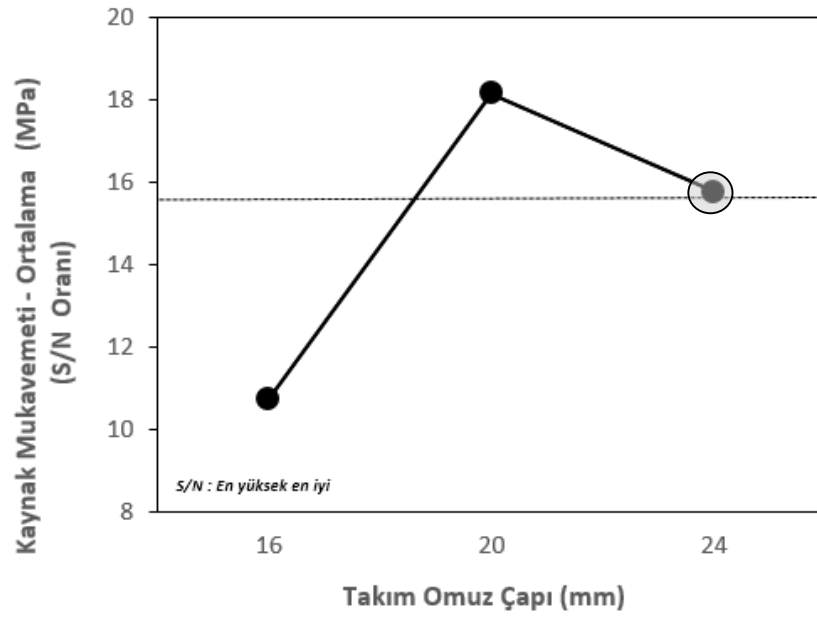
Sembol	Kaynak Parametreleri	İlk Kaynak Parametreleri ve Seviyeleri		
		Seviye		
A	Takım Dönme Hızı	2	1250 d/d	$A_2B_1C_3$
B	Takım İlerleme Hızı	1	12,5 mm/dk	
C	Takım Omuz Çapı	3	24 mm	



Şekil 8.12. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(İlk takım dönme hızı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.13. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(İlk takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)



Şekil 8.14. S/N oranları için faktör etkileri grafiği
(İlk takım omuz çapı – kaynak mukavemeti)

Optimum kaynak mukavemeti için parametre ve seviyeler $A_2B_1C_3$ olduğu için tahmin edilen ilk kaynak mukavemeti (KM_i), eşitlik (8.4)'e benzer eşitlik (8.7) kullanılarak hesaplanır (Roy, 2001; Ülker et al., 2015)

$$KM_i = A_2 + B_1 + C_3 + 2T_m \quad (8.7)$$

Formüldeki T_m Tablo 4'deki kaynak mukavemetlerinin ortalamasıdır.

$$KM_i = 9,75 \text{ MPa}$$

9,75 MPa'lık kaynak mukavemetine karşılık gelen SKK kaynak verimliliği (η) (8.6) eşitliği ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{KM_i}{UTS} \quad (8.6)$$

$$\eta = \frac{9,75}{17,25} \approx \%57$$

KM_i için S/N oranı, eşitlik (8.6)'ya benzeyen eşitlik (6.4) kullanılarak 19,78 dB olarak bulunur. Hesaplanan KM_i ve S/N oranları Çizelge 8.10'da verilmiştir.

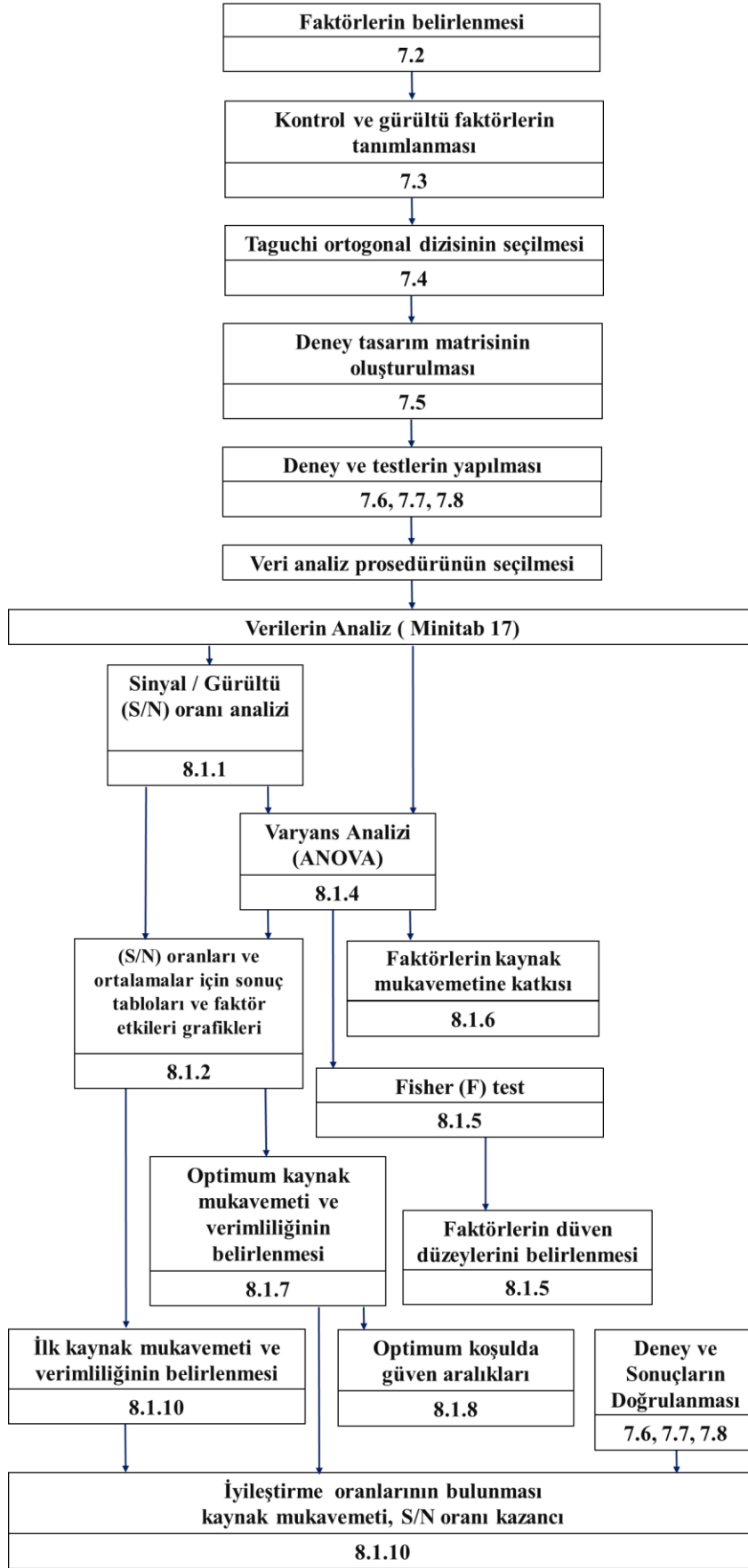
Optimum kaynak parametreleri ve seviyeleri ayarlandıktan sonra yapılan SKK prosesi, doğrulama deneylerinin güvenilirliğini sağlamak amacı ile iki set halinde tekrarlanmış ve çekme deneyi sonucunda bulunan kaynak mukavemetlerin ortalaması Çizelge 8.10'da verilmiştir.

Kaynak mukavemetini tahmin edilen değeri, deney değeri ile uyumludur. Doğrulama deneylerin sonuçlarına bakıldığında kaynak mukavemetinde %25'lik bir artış sağlanmıştır. S/N oranı incelendiğinde ise ilk kaynak parametrelerinden optimum kaynak parametrelerine geçişte 1,92 dB'lik bir kazanç ve 2,42 MPa'lık bir mukavemet artışı sağlandığı görülebilir (Çizelge 8.10).

Çizelge 8.10. Doğrulama deneylerinin sonuçları

		İlk Kaynak Karakteristikleri	Optimum Kaynak Karakteristikleri		İyileştirme
		Deneysel	Tahmin	Deneysel	
Parametre Seviyeleri		$A_2B_1C_3$	$A_3B_2C_2$	$A_3B_2C_2$	% 25
Kaynak Mukavemeti	[MPa]	9,8	11,4	12,2	2,4
Hesaplanan S/N Oranı	[dB]	19,8	21,1	21,7	1,9
SKK Verimliliği	%	57	66	71	

Şekil 8.15’de Taguchi deneysel tasarım yöntemi ve çalışmanın bölümlerinin ilişkilendirildiği akış şeması verilmiştir.



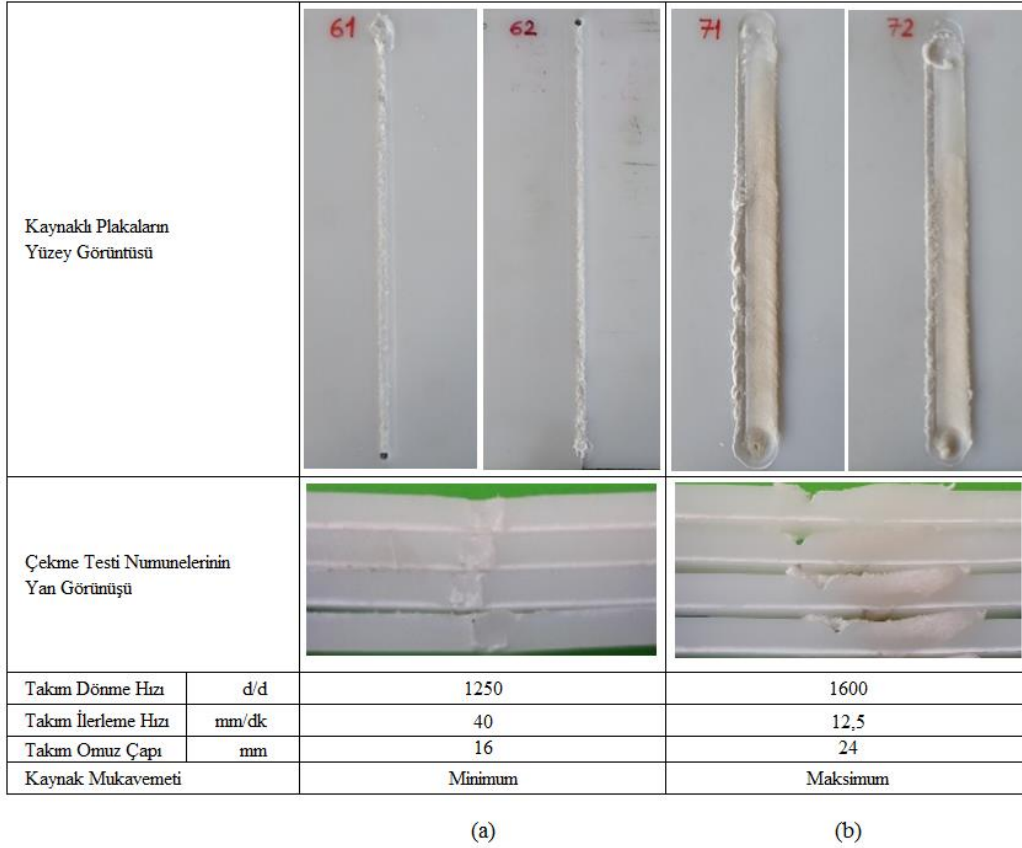
Şekil 8.15. Taguchi deneysel tasarım yöntemi akış şeması

8.2. Kaynak Plakalarının Görsel İncelemesi ve Morfolojik Analizi

Kaynak morfolojisi, kaynak mukavemetini belirlemede karar verici bir rol oynamaktadır. Kaynak bölgesinin makro yapısı ile kaynak bağlantısının mekanik özellikleri arasında güçlü bir ilişki olduğu açıktır. Polimerik bağlantıların çekme mukavemetini değerlendirirken kritik rolü olması nedeniyle kaynak bölgesinin farklı noktaları arasında kök bölgesi (root area) daha fazla dikkat altındadır.

Maksimum ve minimum çekme mukavemetine sahip olan kaynaklanmış plaka gruplarından kaynak hattı boyunca farklı pozisyonlardan alınan kesitleri ve yüzey görünümleri Şekil 8.16’de gösterilmiştir. Orta seviyede takım dönme hızı, en yüksek ilerleme hızı ve minimum omuz çapı (1250 d/d, 40 mm/dk, 16 mm) ile yapılan kaynak zayıf bir kaynak hattı, hat üzerinde birçok boşluk, yüzeyde sapma ve çok büyük kaynak kökü hataları (root defect) ile sonuçlanırken, en hızlı takım dönme hızı, en düşük ilerleme hızı ve maksimum omuz çapı (1600 d/d, 12,5 mm/dk, 24 mm), ile yapılan kaynak numunesi üzerinde daha iyi bir yüzey sürekliliği (kalite) ve en az kaynak kökü hatası gözlemlenmiştir. Bu çekme mukavemetinin kaynak kökü hatasından nasıl etkilendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Böylesine bir değişiklikte üretilen ısı miktarının sorumluluğu bulunmaktadır. SKK takımı tarafından üretilen ısı miktarı yeterli ise kaynak bağlantısı kaynak köküne kadar nüfuz edebilir ve kök hatası boyutunu en aza indirebilir. SKK prosesi ile elde edilen çekme mukavemetindeki artış mekanik mukavemetin değişiminin ana nedeni olan molekül zincirlerindeki yüksek kristal seviyesine ve iyi bir karışım oluşumuna bağlanabilir.

Bu iki şeklin karşılaştırılması kaynak makro yapısına proses parametrelerinin etkisini göstermektedir. Yüksek çekme mukavemetine sahip numune düşük kaynak mukavemetine sahip olan numuneye göre daha göreceli olarak daha homojen (uniform) bir yapıya sahiptir. Bu makro yapı fotoğrafları proses parametreleri ve parametre etkileri ile morfoloji dolayısıyla da çekme mukavemeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



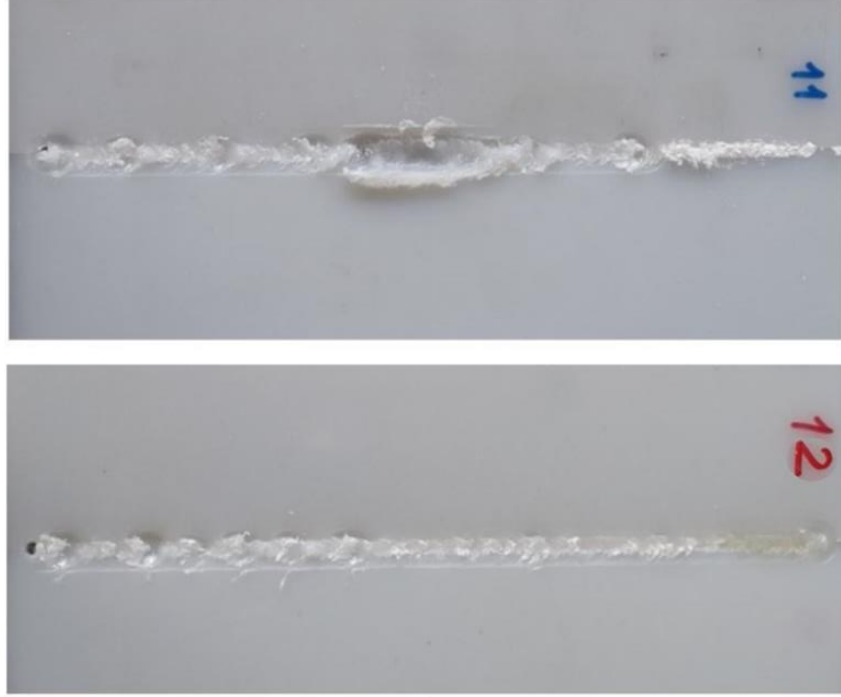
Şekil 8.16. Minimum (a), maksimum (b) çekme mukavemetine sahip SKK numunelerinin görsel incelemesi

8.3. Proses Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti ve Morfolojisi Üzerindeki Etkileri

8.3.1. Takım dönme hızının etkisi

Şekil 8.4 takım dönme hızı ve mukavemeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Takım dönme hızının arttırılması ile kaynak mukavemetinde belirgin artış olduğu görülebilir. aracı dönme hızını arttırmak görülebilir. Maksimum kaynak mukavemeti 1600 d/d'lık bir takım dönme hızında elde edilmiştir. Lakshminarayanan and Balasubramanian (2008) tarafından raporlandığı gibi sürtünme kaynaklı yetersiz ısı üretimi ve polimer malzememin yetersiz miktarda akışı sebebiyle, düşük dönme hızları kaynak bölgesinde solucan deliği (worm hole) oluşumuna neden olur ve kaynak bölgesi ile baz malzeme arasında erime ve kaynamanın az olması bağlantıdaki kaynak mukavemetini düşürebilir (Sorenson et al., 2001)

Deneyisel çalışmada, 800 d/d'dan daha küçük dönme hızları, düşük sürtünme ısıyı yaratır ve yetersiz malzeme karışımına neden olur. Bu da kaynak üzerinde düşük mekanik mukavemet ile sonuçlanır. Bunlar kaynaklı bağlantılar kolayca el ile kırılabilir (Şekil 8.17)



Şekil 8.17. HDPE plakalar için yetersiz malzeme karışımı

Takım dönme hızı arttıkça, pimin karıştırma kabiliyetinin de artacağı sonuçta da takımın hızlı hareketinden dolayı proses ısının artacağı bilinmektedir (Chao et al., 2013). Kaynak hattına yeterli miktarda ısı verilirse, takım kaynak alanında yeterli bir türbülans yaratır ve sonuç olarak mekanik mukavemet anlamında da iyi kaynaklı bağlantılar üretilir (Arıcı and Sınmazçelik, 2005). Yüksek dönme hızları kaynak malzemesini daha iyi karıştırıp yüksek çekme mukavemetlerine yol açmasına rağmen, aşırı dönme hızlarında kaynak plakalarının yanması ve bozulması ve kaynağın kontrol edilemez bir duruma gelmesi mümkündür. Ayrıca kaynak takımında yüksek titreşimi kaçınılmaz olacaktır.

Bu çalışmada olduğu gibi, dönme hızındaki artış nedeniyle (1600 d/d' dan daha yüksek) sürtünme ısısındaki artışla proses sıcaklığında bir artış gözlemlenmiştir ki, bu nedenle polimerik malzemenin yanmaya başladığı an fotoğraflanmış ve yanma kokusu hissedilmiştir. Zayıf kaynak kalitesi ve görünümüne ek olarak

Şekil 8.18'de görülebileceği gibi, yanma, malzeme üzerinde soyulma ve HDPE malzemenin bozunması dönme hızının arttırıldığı durumda oluşmuştur.



Şekil 8.18. HDPE malzemenin yanması, soyulması ve bozunması

8.3.2. Takım ilerleme hızının etkisi

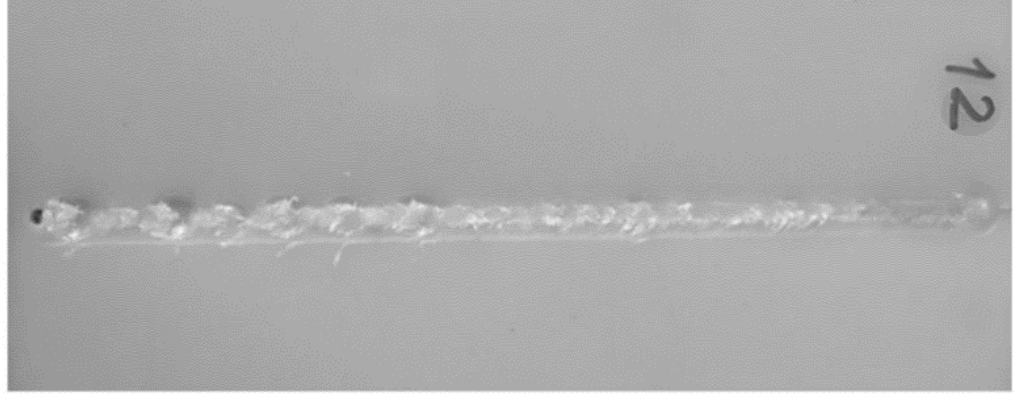
Şekil 8.5 takım ilerleme hızın düşük, orta düzeyde (12,5 ve 20 mm/dk) olduğu durumda kaynak mukavemetinin önemli ölçüde değişmediğini göstermektedir. Ancak 20 mm/dk'dan 40 mm/dk'lık ilerleme hızına geçildiğinde, 12,5 mm ile 20 mm/dk arasındaki geçiş ile karşılaştırıldığında kaynak mukavemeti keskin düşüş eğilimi göstermektedir. SKK prosesinde birleştirilen HDPE plakaların mekanik özelliklerinde takım ilerleme hızının rolüne bakıldığında farklı faktörlerin etkili olabileceğini belirtmek gerekir.

Düşük takım ilerleme hızlarında karıştırma bölgesinde karıştırma için gerekli zaman kaynak bölgesinde bir türbülansa neden olacak kadar fazladır. Buna ek olarak, düşük ilerleme hızının bir sonucu olan kaynak bölgesindeki düşük soğutma hızı daha iyi bir mekanik mukavemete neden olur (Mostafapour and Azarsa, 2012).

Düşük ilerleme hızında, pim ve malzeme arasındaki daha az sürtünme nedeniyle, sürtünme kaynaklı ısı üretim hızının düşük olması elde edilen sonuçlar için bir açıklama olabilir. Bu nedenle, kaynaklı parçaları tamamen kaynatmak mümkün olmayabilir; dolayısıyla çekme mukavemeti de azalacaktır. Düşük ilerleme hızlarında malzemenin birim hacmine aşırı ısı girişi olacağından bu durum malzemenin prosesi sırasında “tünel etkisi”ne neden olur (Şekil 8.19) (Payganeh et al., 2011).

Diğer taraftan, kaynak süresindeki artış ve proses verimliliğindeki düşüş deney ve proses tasarımcılarının düşük oranlardaki ilerleme hızlarını kullanmama

yönünde etkilemiştir. Takım ilerleme hızı için kabul edilebilir minimum hız bu çalışmada 12,5 mm/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.19. Orta seviyede takım dönme hızı ve yüksek ilerleme hızında zayıf ve kabul edilemeyecek kaynak hattı görünümü (800 d/d, 12,5 mm/dk, 16 mm)

Öte yandan, ilerleme hızının arttırılmasıyla polimer malzeme üzerinde termo-mekanik gerilme miktarının artmasıyla karıştırma bölgesi sıkıştırılır ve kaynak havuzu içinde mevcut olan malzemenin türbülanslı durumunun iyileşmesi sağlanır.

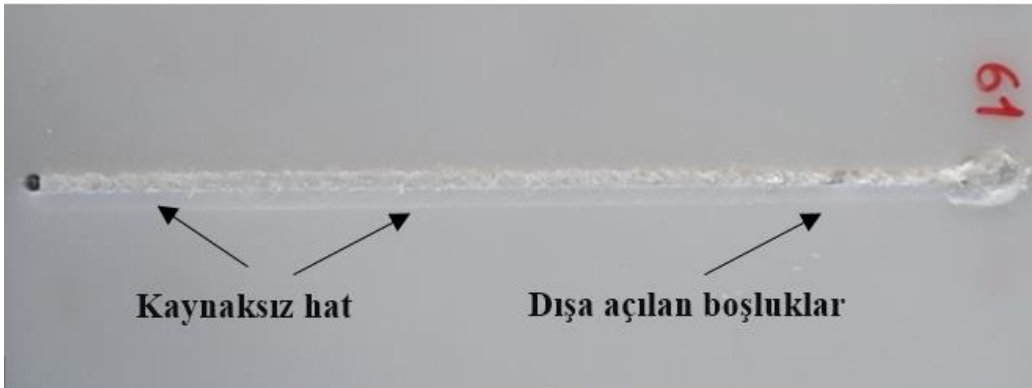
Takımın ilerleme hızı ile ilgili olarak ayrıca ilerleme hızının artması durumunda, malzeme üzerine etki eden yüksek teğetsel kuvvet sebebiyle kaynak alanı dışına eriyik malzeme taşacağından ve daha yüksek ilerleme hızlarının pimin daha uzun sürelerde kaynak alanını ısıtmasının engelleneceğinden söz etmek gerekir.

Takımın hızlı hareketi nedeniyle üretilen sürtünme karıştırma ısısı azalır, bu nedenle kaybolan ısıyı telafi etmek için, daha yüksek bir dönme hızı gereklidir. Yüksek sıcaklık değerine erişilemezse erimiş malzemenin yeniden karıştırılması için yeterli zaman olmayacaktır. Bu nedenle, erimiş malzemenin zayıf karışımı çekme mukavemeti düşürür ve kalitesiz kaynak oluşur.

Çizelge 8.1'den elde edilecek diğer önemli sonuç ise takım dönme hızının 1600 d/d, takım ilerleme hızının ise 12,5 mm/dk olduğu deney şartlarında kaynaklanan plakalardan çıkarılan numunelerde kaynak verimliliğinin %65,4 olduğudur. Ayrıca, minimum mukavemet (baz malzemenin yaklaşık %9,4'ü)

takım dönme hızının 1250 d/d, takım ilerleme hızının ise 40 mm/dk olduğu deney şartında ile kaynaklanmış bir numune içinde meydana gelmiştir.

Benzer şekilde ilerleme hızı aralığı ile ilgili sonuçlar yüksek ilerleme hızlarında (40 mm/dk'dan büyük) düşük kaynak kalitesi elde edildiğini ve kaynak hattında deformasyonlar ve dışarıya açılan boşluklar ile karşılaştığını göstermektedir. Bu olgunun 40 mm/dk'lık ilerleme hızlarında bile gözlemlendiği söylenebilir. Bu durum karışmış malzemenin yetersiz akışına ve yüksek soğutma oranına bağlanabilir. Takım ilerleme hızının, doğrudan malzemenin soğutma hızını belirlediği belirtilmelidir. Yüksek ilerleme hızlarda omuz da hızlı hareket ettiği için, polimer moleküllerinin katılaşması için yeterli zaman sağlanamamaktadır. Örnek olarak Şekil.8.20'de takım dönme hızının 1250 d/d, takım ilerleme hızının ise 40 mm/dk olduğu deney şartlarında üretilen kaynaklanmış plakalara ait fotoğrafta zayıf bir kaynak bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 8.20. Orta seviyede takım dönme hızı ve yüksek ilerleme hızında zayıf ve kabul edilemeyecek kaynak hattı görünümü (1250 d/d, 40 mm/dk, 16 mm)

8.3.3. Takım omuz çapının etkisi

Takım geometrisi çekme mukavemeti üzerinde ciddi bir etkiye sahip en etkili parametrelerden biridir. Farklı omuz çapları için elde edilen çekme mukavemetleri Şekil 8.6'da gösterilmiştir. Şekil 8.6'daki grafikte omuz çapının en yüksek ve orta düzeyindeki (20, 40 mm) değerleri için, kaynak mukavemetinin önemli ölçüde değişmediği gösterilmiştir. (Çizelge 8.2 ve 8.3)

Ancak deneylerde 20 mm'den 40 mm'lik takım omuz çapına düşüldüğünde, 20 mm ile 40 mm omuz çapı arasındaki geçiş ile karşılaştırıldığında kaynak mukavemeti keskin düşüş eğilimi göstermektedir. Bu maksimum çekme mukavemetine ulaşmak için omuz çapının optimum bir değerde olduğu anlamına gelir.

Şekil 8.6'ya göre, kaynak prosesinde, yüksek çekme mukavemetlerine büyük temas alanına sahip olan büyük omuz çapları ile ulaşılabilecektir. Bu nedenle pim ve kaynak plakaları arasında daha büyük bir temas alanı daha yüksek bir sürtünme ısının oluşmasına katkı sağlayacaktır ve kaynak malzemesinin daha iyi karışımı, daha iyi sıcaklık dağılımı ve bunun sonucu olarak da daha yüksek bir çekme mukavemeti elde edilecektir. Çizelge 8.3'deki deneysel sonuçların ortalaması (4,29 - 8,23 -7,97 MPa) karşılaştırıldığında yukarıda ifade doğrulanmış olur.

20 mm'lik omuz çapına ait temas yüzeyi 16 mm'lik omuz çapına göre sadece %62 daha büyük olmasına rağmen, 20 mm'lik omuz çapı ile yapılan deneylerden elde edilen kaynak mukavemeti 16 mm'lik çaptan elde edilenlerden yaklaşık iki kat daha büyüktür. Takım omuz çapı ile ilgili olarak, sonuçlar büyük çaplarda erimiş malzemenin çok yüksek miktarda omuz arkasında kalmasından dolayı malzemenin kaynak hattı üzerinden dışarı atıldığını göstermiştir.

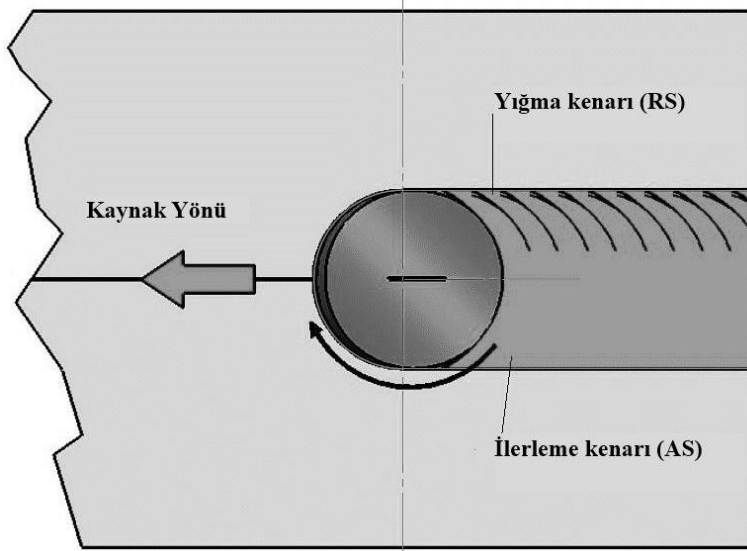
Ancak, Şekil 8.21'den görüldüğü gibi küçük omuz çaplarının kullanımı kaynak havuzunda erimiş malzeme eksikliği nedeniyle zayıf kaynak bağlantıları ile sonuçlanır.

8.4. Kaynağın ilerleme (AS) ve yığma (RS) tarafların karşılaştırması

Literatürde ilerleme tarafı (advancing side - AS) ve yığma (retreating side - RS) tarafı arasında görünüş simetrisi üzerine açıklamalar bulunmaktadır (Şekil 8.22). Çekme test sonuçları bütün kaynak numunelerinin kaynağın yığma tarafından (RS) hasara uğradığını göstermiştir. Bu durum kaynağın yığma tarafında (RS) aynı yönde olan ilerleme tarafında (AS) ise zıt yönlerde olan dönme ve hız alanlarının oluşturduğu, yığma ve ilerleme tarafındaki malzeme akışı arasındaki fark nedeniyle yığma tarafında meydana gelen malzeme eksikliğinin bu bölgede numunelerin zayıflamasına yol açması olgusu ile açıklanabilir (Zhang et al., 2005).

Kaynaklı Plakaların Yüzey Görüntüsü				
		(a)	(b)	(c)
Takım Dönme Hızı	d/d	800	1250	1600
Takım Omuz Çapı	mm	16	24	24
Takım İlerleme Hızı	mm/dk	12,5		

Şekil 8.21. Takım omuz çapının etkisi

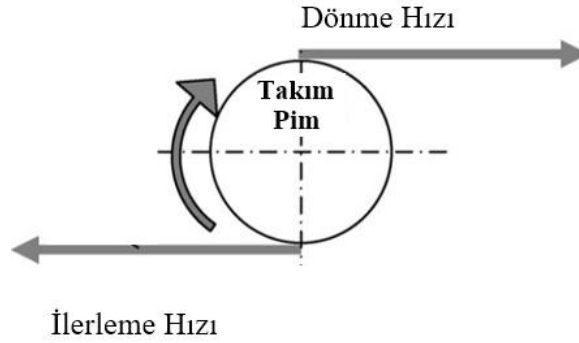


Şekil 8.22. SKK prosesinde ilerleme ve yığılma kenarı oluşumu

Şekil 8.23 pimin çevresel ve ilerleme hızı arasındaki farkı vurgulayan takım hareketini göstermektedir. Malzeme akışını, ve/veya deformasyonu gösteren ve kaynak hattı etrafında simetrik olmayan gerilme zorlanması (gerginlik) takımın

dönme ve ilerleme hızlarının kombinasyonuyla çok etkilemektedir (Buffa et al., 2006).

Bu nedenle, kaynağın ilerleme tarafında malzeme daha uzun bir zaman geçirir ve yığma taraftaki vorteks hızı alanı tarafından etkilenir.



Şekil 8.23. Pim yüzeyinde çevresel ve ilerleme hızı karşılaştırmasının şematik gösterimi

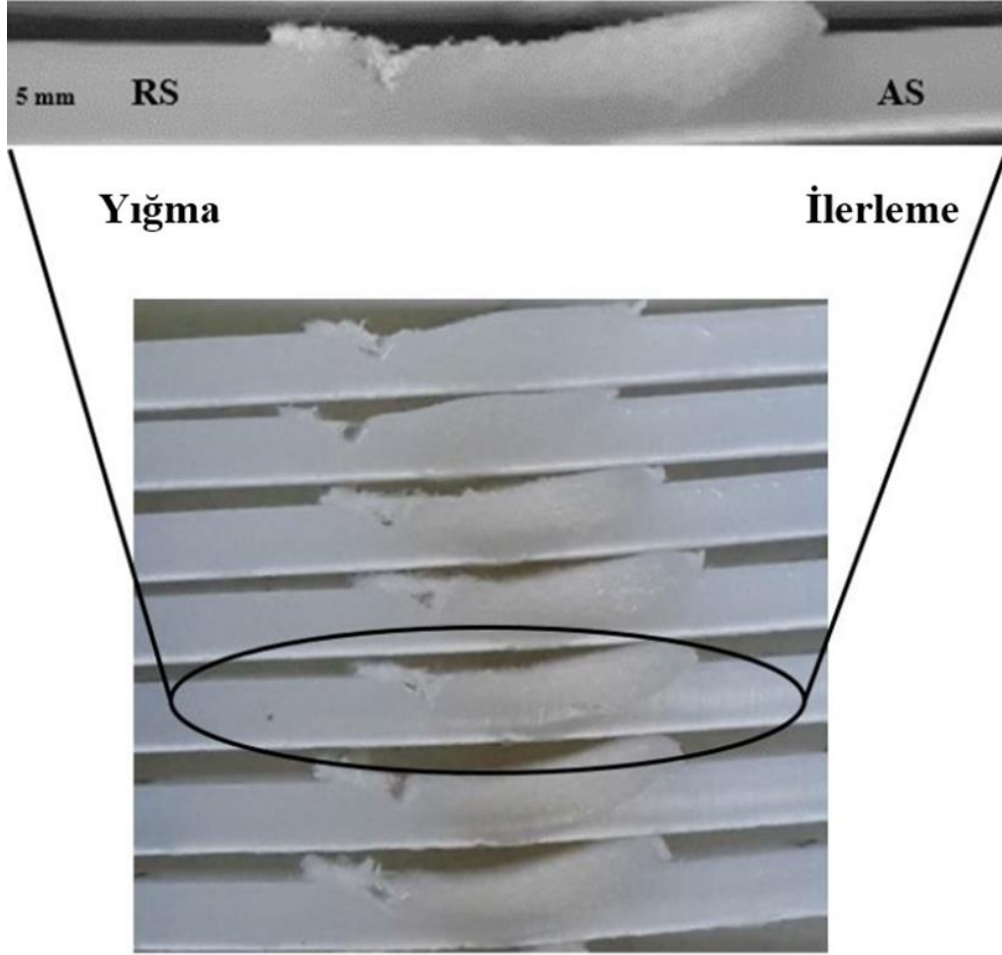
Sonuç olarak, kaynağın ilerleme bölgesindeki gerilme daha fazladır, tane yapısı daha rafinedir ve elde edilen sertleşme yığma taraftakinden daha fazladır (Heutier et al., 2006). Deneysel ve sayısal analiz sonuçları ilerleme taraftaki sıcaklığın yığma taraftakinden daha yüksek olduğunu göstermektedir (Nandan et al., 2006).

Şekil 8.24’de enine kesit alınmış kaynak numuneleri gösterilmiştir. Kaynağın ilerleme ve yığma tarafları arasında fark edilebilir önemli morfolojik farklar bulunmaktadır. Yığma taraftaki malzeme tamamen kaynaklanmış ve birleştirilmiş durumda değildir ve malzeme arasındaki boşluklar kolaylıkla görülebilir.

8.5. Çekme Testi Sonuçları ile ilgili Gözlemler (Hasar Analizi)

Literatür araştırmasından sonra polimerler üzerinde uygulanan SKK prosesinde yüksek kalitede bağlantıların elde edilmesinin çok kolay olmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada tüm numunelerin kaynak işlemi başarıyla

gerçekleştirilmesine rağmen, deneylerde farklı kaynak kaliteleri gözlemlenmiştir. Kaynak görünümüne ve kalitesine göre üç farklı kırılma modu ortaya çıkmıştır. Şekil 8.24 numunelerin üç kırılma modundaki hasar durumlarını göstermektedir.



Şekil 8.24. Kaynağın yığma (RS) ve ilerleme (AS) kenarlarındaki morfolojisi

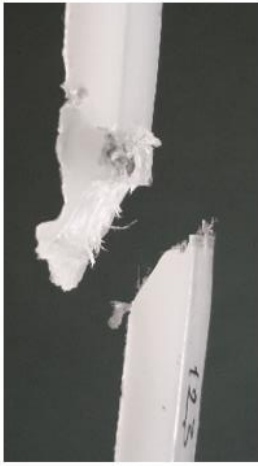
Şekil 8.24a birinci kırılma modundaki kaynak bağlantısı göstermektedir. Bu kırılma modu için numunelerin çekme testinde eksenel yüklere dayanımı düşüktür. Kaynaklı plakalar birbirinde kolaylıkla ayrılmaktadır. Şekil 8.25 (a)'dan da görülebileceği gibi plakaların kırılma yüzeyleri birbirleri ile güçlü bir temas halinde değildir. Diğer bir deyişle kaynak hatalı bir şekilde oluşmuş, iki parça tam olarak erimeden kaynamıştır veya kaynak dikiş alanının kabul edilebilir bir kaynak bağlantısından daha küçük olduğu söylenebilir. Bu mod 1,6 – 3,6 MPa arasındaki çekme mukavemetlerine ve %9,4 – 20,9 arasındaki kaynak

verimliliğine sahip olan numuneler için “zayıf kaynak kalitesi” olarak adlandırılabilir.

İkinci tipteki kırılma modunda uygulanan kuvvet kaynağın Şekil 8.25(b)’deki gibi kopmasına neden olur. Numunelerin kaynak bölgesi alanı birinci moddaki kaynak bölgelerine kıyasla daha geniştir. Bu mod 6,9 – 7,6 MPa arasındaki çekme mukavemetlerine ve %39,7 – 44,3 arasındaki kaynak verimliliğine sahip olan numuneler için “orta seviyeli kaynak kalitesi” olarak adlandırılabilir.

Çekme testlerinde görünen üçüncü tipteki kırılmaya benzer hasarlar Şekil 8.25(c)’de görülmektedir. Bu tipteki numuneler daha güçlü bağlantı yapısındadırlar ve birinci ve ikinci moddaki numunelere göre daha büyük kaynak alanına sahiptirler. Bunun nedeni kaynak yapılan malzemenin bu bölgede iyi karışması nedeniyle tam olarak oluşmuş kaynak bağlantısıdır.

Sonuç olarak kaynak kalitesi iyileştirilmiştir ve numuneler diğer modlardakilere göre daha fazla yük taşıyabilirler. Bu mod 9,4 – 11,3 MPa arasındaki çekme mukavemetlerinde ve %54,7 – 65,4 arasındaki kaynak verimliliğinde olan numuneler için “yüksek kaynak kalitesi” olarak adlandırılabilir. Aslında kaynakların bu şekilde sınıflandırılması, proses parametreleri ve kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri arasındaki ilişkiyi gösterir.

	1. Kırılma Modu	2. Kırılma Modu	3. Kırılma Modu		
Numunenin Kopma Görüntüsü					
Numunelerin Çekme Testi Öncesi Yan Görünüşü					
	Takım Dönme Hızı	d/d	800	1600	1600
	Takım İlerleme Hızı	mm/dk	12,5	40	12,5
	Takım Omuz Çapı	mm	16	20	24
Kaynak Kalitesi	Düşük	Orta	Yüksek		
	(a)	(b)	(c)		

Şekil 8.25. Üç farklı kırılma modu için kaynak kalitesi

9. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu araştırmada HDPE malzemenin SKK kaynağında kullanılan kaynak parametrelerinin optimum seviyelerini ve parametre etkilerini bulmak için Taguchi yöntemi ile optimizasyon ve parametre tasarımı uygulaması gösterilmiştir.

Tasarlanan deneyler SKK plakaların kaynak mukavemetini değerlendirmek ve kaynak yapısını ve kaynak kalitesini görsel olarak karşılaştırmak için yapılmıştır.

Farklı omuz çaplarındaki (16, 20, 24 mm) SKK takımları ile deneyler yapılarak, yüksek kalitede kaynaklı bağlantılar üretmek için uygun bir takım tasarımı yapmak için takım geometrinin kaynak görünümü ve çekme mukavemetine etkisi deneysel olarak incelenmiştir

(800, 1250 ve 1600 d/d'lık üç takım dönme hızı ile ve 12,5, 20 ve 40 mm/dk'lık üç takım ilerleme hızı ile parametre etkileri deneysel olarak çalışılmıştır.

Çalışmada gösterildiği gibi Taguchi Yöntemi HDPE plakalarının kaynak optimizasyonu için sistematik ve verimli bir metodoloji sunmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasıyla, kaynak parametrelerinin etkinliğini araştırmak için gerekli olan deneylerin sayısı ve süresi azalır ve deneysel verim elde edilir. L_9 ortogonal dizisi, S/N oranı ve ANOVA kullanımı birleştirilmiştir.

Deneysel verilerin istatistiksel analizi ile istatistiksel anlamlılık ve her kaynak parametresinin kaynak mukavemetine katkısı değerlendirilmiştir.

Maksimum ve minimum çekme dayanımına sahip olan numunelerin makro yapıların gözlemi sonucunda, kaynaklı parçada yapısal bütünlüğün ve kaynak mukavemetinin süreç parametrelerine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Daha önceki çalışmalardakine benzer olarak HDPE plakalar üzerinde gerçekleştirilen SKK'nın mekanik mukavemeti ağırlıklı olarak takım dönme hızı ve takım ilerleme hızından etkilenmektedir. Takım geometrisinin de kaynak görünümü ve kaynak mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olduğu da ayrıca gözlemlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yüksek takım dönme hızı ve düşük takım ilerleme hızı ile kaynak hatalarının boyutunun azaltılarak, kaynak kalitesi ve kaynak çekme mukavemetinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Takım dönme hızını arttırmanın kaynak çekme mukavemetini artırıcı bir etkisi vardır. 1600 d/d'lık bir takım dönme hızı ile 11,28 MPa'lık sağlam bir kaynak üretilmiştir. Takım ilerleme hızını 20'den 40 mm/dk'ya çıkarmanın kaynak mukavemetini düşürücü etkisi olmuştur. En iyi kaynak mukavemetini veren kombinasyonun kaynak verimliliği baz malzemeye göre %65,4 olarak hesaplanmıştır.

20 mm'lik omuz çapına ait temas yüzeyi, 16 mm'lik omuz çapına göre sadece %62 daha büyük olmasına rağmen, 20 mm'lik omuz çapı ile yapılan deneylerden elde edilen kaynak mukavemetinin 16 mm'lik çaptan elde edilenlerden yaklaşık iki kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Kaynak görünüm ve kalitesine bağlı olarak, üç farklı kırılma modu gözlemlenmiştir.

Kaynak örneklerindeki ilerleme (AS) ve yığma (RS) tarafındaki farklı malzeme akışı sebebiyle kaynağın yığma (RS) tarafındaki malzeme eksikliğinin meydana geldiği ve bu durumun bu alanda bir gevrek kırılmaya yol açtığı gözlemlenmiştir.

Taguchi yönteminin deneysel sonuçları temel alınarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- ANOVA sonuçlarına dayanarak, takım ilerleme hızı, kaynak mukavemetine olan %43,2'lik katkısıyla etkin (baskın) parametre olmuştur. Bunu sırasıyla %32,6 ve %24 katkı yüzdeleri ile takım omuz çapı ve takım dönme hızı izlemektedir.
- Toplam varyansın sadece %0,2'si deneysel hatalar oluşturmaktadır. Bu deneysel tasarımın başarılı olduğunu kanıtlamaktadır.
- Maksimum kaynak mukavemetine ulaşmak için kullanılması gereken optimum kaynak parametreleri takım dönme hızı, 1600 d/d, takım ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım omuz çapı 20 mm olarak belirlenmiştir.

- Bu parametre seviyeleri kullanılarak, en sağlam kaynak bağlantısı 12,2 MPa olduğundan, baz malzemenin çekme mukavemetinin (17,25 MPa) %71'i seviyesine kadar ulaşılmıştır.
- Kaynak parametrelerinin optimum kombinasyonu için kaynak mukavemeti 11,4 MPa olarak hesaplanarak tahmin edilmiştir.
- Doğrulama deneyleri S/N oranı 1,92 dB olarak iyileştirildiğini ve ilk kaynak parametrelerinden optimum kaynak parametrelerine geçerken kaynak mukavemetinin 12,2 MPa'a çıkarıldığını göstermiştir. Bu kaynak mukavemetinde %25'lik bir kazanca karşılık gelmektedir.
- Optimizasyon ile kaynak verimliliği %57'den %71'e çıkarılarak iyileştirilmiştir.
- Elde edilen sonuçlar ile SKK prosesinin optimizasyonunda Taguchi sağlam (robust) tasarım metodolojisinin etkinliğini doğrulanmıştır.

10.ÖNERİLER

Kaynak performansı ve kaynak parametreleri arasındaki ilişki kurmak için, yapay sinir ağları (ANN), genetik algoritma (GA), yanıt yüzeyi yöntemi (RSM), tam faktöriyel deney tasarımı ve nöral hesaplama yöntemleri kullanılabilir ve TRIZ yöntemi ile kaynak bağlantı tasarımları geliştirilebilir.

İleriki çalışmalarda HDPE için elde edilen deneysel sonuçlar teyit etmek ve karşılaştırma yapmak için SKK sürecinin sayısal modellemesi ve simülasyonları yapılabilir.

Birbirinden farklı polimerler ve polimer tabanlı kompozit malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesi araştırma konusu olarak alınabilir.

SKK yönteminin polimerik malzemelerin kristalleşme mekanizması üzerinde etkisi araştırmak polimerik malzemelerin kaynak mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir faktör olduğundan yola çıkılarak bu konuda araştırma yapılabilir.

Tamamlayıcı bir çalışma olarak, kaynak kalitesinin görsel olarak değerlendirmek amacıyla, SKK yöntemi ile elde edilen bağlantıların mikro yapıları incelenerek daha derin morfolojik karakterizasyon araştırmaları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abel, F.**, 1998, Schweissen in der Kunststofffügetechnik, Hochfrequenz, Ultraschall, Heizelement, Früchtling GmbH, Hamburg, 326p.
- Abele, G.F.**, 1997, Kunststoff - Fügeverfahren: Teil 1: Allgemeine Einführung, Teil 2: Hochfrequenzschweissen, Carl Hanser Verlag, München, 565p.
- Ahmadi, H., Mostafa Arab, N.B. and Ghasemi, F. A.**, 2012, Process parameters optimization for friction stir lap welding of polypropylene composite using Taguchi method, 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering - ISME2012, School of Mechanical Eng., Shiraz University, Shiraz, Iran, 1-4pp.
- Ahmadi, H., Mostafa Arab, N.B., Ghasemi, F. A. and Farsani, R.E.**, 2011, Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Stir Lap Welding of PP Composite, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering ICME2011, Tehran, Iran, 1-6pp.
- Ahmadi, H., Mostafa Arab, N.B., Ashenai Ghasemi, F. and Eslami Farsani, R.**, 2012, Influence of pin profile on quality of friction stir lap welds in carbon fiber reinforced polypropylene composite, International Journal of Mechanics and Applications, 2(3): 24-28pp.
- Akkurt, S.**, 1991, Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 225s
- Akkurt, S.**, 2007, Plastik Malzeme Bilimi Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 552s
- Amancio, S.T., and dos Santos J.F.**, 2009, Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: recent developments and trends. Polymer Engineering and Science, 49:1461–1476pp.
- Anderson, M.J.**, 2005, Trimming the FAT out of Experimental Methods, SPIE's oemagazine, 32: 1-2pp.
- Anık, S.; Oğur, A. ve Karakaya, Ç.**, 2003, Plastik malzeme kaynağının memleketimizdeki uygulamaları ve önemi, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kocaeli, 215-223s.
- Anık, S., Dikicioğlu A., ve Vural, A.**, 1994, Termoplastik Malzemelerin Kaynağı, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul,
- Antony, J.**, 2003, Design of Experiments for Engineers and Scientists, Elsevier Science & Technology Books, Burlington, Canada, 220p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Arbegast, W.J.**, 2008, A flow partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, *Scripta Materialia*, 58: 372-376pp.
- Arıcı, A., ve Şelale S.**, 2007, Polietilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi, *PAGEV Plastik Dergisi*, 130-138s.
- Arıcı, A. and Sınmazçelik, T.**, 2005, Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *Journal of Material Science*, 40: 3313-3316pp.
- Arıcı, A. and Şelale, S.**, 2007, Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. *Science and Technology of Welded Joints*, 12: 536–539pp.
- Arıcı, A., ve Sınmazçelik, T.**, 2004, Plastiklerin kaynaklı birleştirme yöntemleri, *PAGEV Plastik Dergisi*, 124-133s.
- Arıcı, A.A ve Ertürk, A.T.**, 2007, Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen PE levhalarda kaynak bölgesi özelliklerinin belirlenmesi, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul, 490-497s.
- ASM**, 1993, *ASM Handbook Volume 6.: Welding, Brazing, Soldering*, ASM International, Ohio, 1299p.
- Aydın, M.**, 2010, Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW polyethylene, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49: 595- 601pp.
- Azarsa, E. and Mostafapour, A.**, 2014, Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, 16:149–155
- Azarsa, E., Mostafapour, A. and Tavakolkhah, V.**, 2012, Effect of process parameters and tool coating on mechanical properties and microstructure heat assisted friction stir welded sheets, *Advanced Materials Research*, 445: 765-770pp.
- Babu, G.R.**, 2011, Influence Of Tool Geometry And Process Parameters On Friction Stir Welded Al. Alloy - An Experimental Investigation, Ph.D. Dissertation, Jawaharlal Nehru Technological University, 334p (unpublished)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bagheri, A., Azdast, T., and Doniavi, A.,** 2013, An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets, *Materials and Design*, 43: 402–409pp.
- Balkan, O.,** 1999, Sıcak Gaz Kaynağı İle Plastiklerin Birleştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 201s (yayınlanmamış).
- Balkan, O. ve Ezdeşir, A.,** Rheological weldability of polymers, 2008, 12th International Materials Symposium, Pamukkale University, Denizli, 1046-1051pp.
- Barlas, Z.,** 2009, Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cu ile CuZn37 Levhaların Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Fakültesi, 310s (yayınlanmamış).
- Bartczak, Z.,** 2005, Effect of chain entanglements on plastic deformation behavior of linear polyethylene, *Macromolecules*, 38: 7702-7713pp.
- Baynal, K.,** 2003, Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile Eniyilemesi ve Bir Uygulama, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Fakültesi, 268s (yayınlanmamış).
- Bayrakdar, O.M.,** 2009, Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA) ve Taguchi Metodu'nun Bonfiglioli A.Ş.' de Ortak Uygulaması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 115s (yayınlanmamış)
- Bendell, A., Disney, J. and Pridmore, W.A.,** 1989, Taguchi Methods: Applications in World Industry. Springer -Verlag, New York,
- Beşergil, B.,** 2008, Polimer Kimyası, Gazi Kitabevi, Ankara, 492s.
- Bilici, M.K.,** 2011, Polietilenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Özellikleri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 146s (yayınlanmamış)
- Box, G. E. P., Hunter, J. S. and Hunter, W. G.,** 2010, Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, 2nd. ed., John Wiley and Sons, New York, 653p.
- Box, G.E.P.,** 1988, Signal-to-noise ratios, performance criteria, and transformations, *Technometrics*, 30: 1-40pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bozkurt, Y.**, 2008, Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ile Birleştirilen AA2124/SIC P /25 Kompozit Levhaların Mekanik Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 239s (yayınlanmamış)
- Bozkurt, Y.**, 2012, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets, *Materials and Design*, 35: 440–445pp
- Brémand, F., Rezgui, M.A., Ayadi, M., Cherouat, A., Hamrouni, K., Zghal, A.**, 2010, Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene, *EPJ web of conferences. EDP Sciences*, 1-8pp.
- Brinkmann T.**, 2011, *Productenentwicklung mit Kuntstoffen*, Hanser Verlag, München, 860p.
- Brown, R.**, 1999, *Handbook of Polymer Testing – Physical Methods*, Marcel Dekker, Newyork, 860p.
- Buffa, G., Fratini, L., Hua, J., and Shivpuri, J.**, 2006, Friction stir welding of tailored blanks: Investigation on process feasibility. *CIRP Annual - Manufacturing Technology*, 55(1): 279-282pp.
- Byrne, D.M., Taguchi, S.**, 1987, The Taguchi approach to parameter design. *Quality Progress*, 1987, 20:19–26pp.
- Capone, C., Landro, L.D., Inzoli, F., Penco and M., Sartore, L.**, Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing, *Polymer Engineering and Science*, 47:1813-1819pp.
- Costa, H.M., Ramos, V.D., Rocha and M.C.G.**, 2005, Rheological properties polypropylene during multiple extrusion, *Polymer Testing*, 24: 86-93pp.
- Crawford, R.I.**, 1985, *Plastics and Rubber – Engineering Design and Applications*, Mechanical Engineering Publication Limited, London, 316p.
- Czitrom, M.**, 1999, One factor at a time versus designed experiments, *The American Statistician*, 53(2): 126-131pp.
- Çam, G.**, 2011, Friction stir welded structural materials: Beyond Al-alloys. *International Materials Reviews*, 56 (1): 1-48pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çam, G.**, 2005, Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK): Al-alışımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi, TMMOB Mühendis ve Makina Dergisi, 46 (541): 30-39pp.
- Çelebi, M.S.Ö.**, 2008, Polietilenin Silan Yöntemi ile Karşıt Bağlanma Kinetiğinin İncelenmesi Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 170s (yayınlanmamış)
- Çömlekçi, N.**, 2003, Deney Tasarımı İlke ve Teknikleri, Alfa Yayınları, İstanbul, 468s.
- DIN, 2012**, DIN EN ISO 527-1, Plastics – Determination of tensile properties – part 1: general principles, Beuth, Berlin, 1-23pp.
- DIN, 2013**, DIN EN ISO 472 Plastics - Vocabulary (ISO 472:2013); Trilingual version EN ISO 472:2013, Beuth, Berlin, 1-406pp.
- Durmaz, S.**, 2008, Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 164s (yayınlanmamış)
- Ehrenstein, G.W.**, 2004. Handbuch Kunststoff Verbindungstechnik. Hanser Verlag, München, 710p.
- Erkul, M.**, 2001, Plastiklerin Ultrasonik Kaynağı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 104s (yayınlanmamış).
- Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkiran D., Yağcı, M., Cöbek, M. ve Bilgiç, T.**, 1999, Polimerler I (Cilt I), PAGEV Yayınları, İstanbul, 192s.
- Fisher, R.A.**, 1966, The Design of Experiments, 8th ed., Hafner Publishing Company, New York, 248p.
- Fisher, R.A.**, 1935, The Design of Experiments. Oliver and Boyd, Edinburgh, 252p.
- Fowlkes, W.Y. and Creveling, C.M.**, 1995, Engineering Methods for Robust Design Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley, Reading, MA., 432p.
- Frey, D.D., Engelhard, F., and Greitzer, E.M.**, 2003, A role for “one-factor-at-a-time” experimentation in parameter design, Research in Engineering Design, 14 : 65-74pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gan, Y.X., Solomon, D., and Reinbolt, M.**, 2010, Friction Stir Processing of Particle Reinforced Composite Materials, *Materials*, 3, 329-350pp.
- Gibson, B.T., Lammlein, D.H., Prater, T.J., Longhurst, W.R., Cox, C.D., Ballun, M.C., Dharmaraj, K.J., Cook, G.E. and Strauss, A.M.**, 2014, Friction stir welding: Process, automation, and control, *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1): 56-73.
- Grewell D. and Benatar A.**, 2007. Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International Polymer Processing*, 22: 43–60pp.
- Grewell, D., Benatar, A., Park, J.B.**, 2003, *Plastics and Composites Welding Handbook*. Hanser Verlag, München, 407p.
- Grimm, R.A.**, 1995, Welding processes for plastics, *Advanced Materials and Processes*, 3: 27–30pp.
- Güngör, B.**, 2013, AW 5083-H111 VE AW 6082-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma (FSW) ve Robotik CMT - MIG Kaynak Yöntemleri ile Kaynağında Mekanik ve Metalürjik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 266s (yayınlanmamış)
- Hazer, B.**, 1993, *Polimer Teknolojisi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon 155s.
- Heutrier, P., Jones, M.J., Desrayaud, C., Driver., J.H., Montheillet, F., and Allehaux, D.**, 2006, Mechanical and thermal modeling of friction stir welding, *Journal of Material Processing Technology*, 171: 348–357pp.
- Hicks, C.R. and Turner K.V.**, 1999, *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, 5th ed., Oxford Un. Press, Oxford, 565p.
- Hira, H., Aoki, H. and Shibayanagi, T.**, 2013, Application of friction stir welding of several thermoplastics, *Proc. of the 1st Int. Joint Symp. on Joining and Welding*, Osaka, 147-149pp.
- Holmes-Walker, W. A.**, 1975, *Polymer Conversion*, A Halsted Press Book, John Wiley and Sons, Inc., New York, 286p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hoseinlaghab, S., Mirjavadi, S.S., Sadeghian, N., Jalili, I., Azarbarmas, M., and Givi B.M.K.,** 2015, Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates. *Material Design*, 67: 369–378pp.
- Husain, I.M., Salim, R.K., Azdast, T., Hasanifard, S., Shishavan, S.M. and Lee, R.E.,** 2015, Mechanical properties of friction stir welded polyamide sheets, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(18): 1-8pp.
- Inaniwa, S., Kurabe., Miyashita, Y. and Hori, H.,** 2013, Application of friction stir welding of several thermoplastics, *Proc. of the 1st Int. Joint Symp. on Joining and Welding*, 2013, 137-142pp.
- İpekoğlu, G.,** 2011, Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Aa6061 Ve Aa7075 Alüminyum Alaşımı Levhalarda İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 202s (yayınlanmamış)
- Jaiganesh, V., Maruthu, B. and Gopinath, E.,** 2014, Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate , *Procedia Engineering* 97 (12th Global Congress On Manufacturing And Management, GCMM 2014), 1957 – 1965pp.
- Johns, C.J.,** 1999, *Friction Stir Welding of Polymeric Materials*, Brigham Young University Press, Provo, Utah, 88p.
- Juang, S.C., and Tarng, Y.S.,** 2002, Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel, *Journal of Material Process Technology*, 122: 33- 37pp.
- Kaluç, E. ve Taban, E.,** 2007, Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, (Sürtünme Karıştırma Kaynağı), TMMOB MMO Yayını, 460, Ankara, 228p.
- Kamber, Ö.Ş.,** 2008, Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Basınç ve Sıcaklık Parametrelerinin Ürün Kalitesine Etkileri ve Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 176s (yayınlanmamış)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Keskingöz, S.**, 2010, Polietilen Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Dolgu Maddelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 81s (yayınlanmamış)
- Khaled, T.**, 2005, An outsider looks at friction stir welding, Federal Aviation Administration Paramount Boulevard. Lakewood, ANM-112N-05-06, 1-71pp.
- Kırcı, O.**, 2012, AW-5005 Alüminyum Alaşımının Bindirme Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bağlantı Özelliklerine Takım Profilinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 155s (yayınlanmamış)
- Kiss Z. and Czigány T.**, 2007, Applicability of friction stir welding polymeric materials, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 51(1): 15-18pp.
- Kiss Z. and Czigány T.**, 2012, Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, eXPRESS Polymer Letters, 6 (1): 54–62pp.
- Kiss Z. and Czigány T.**, 2012, Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly(ethylene-terephthalate-glycol), Journal of Applied Polymer Science, 124: 2231-2238pp.
- Kumar, K. And Kailas, S.V.**, 2008, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, Journal of Materials Science and Engineering A, 485: 367-374pp.
- Lakshminarayanan, A.K. and Balasubramanian, V.**, 2008, Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18:548-553pp.
- Lim, S.T., Kim, C.A., Chung, H., Choi, H.J. and Sung, J.H.**, 2004, Mechanical degradation kinetics of polythelene oxide in a turbulent flow, Korea-Australia Rheology Journal, 2: 7-62pp.
- Liu, F.C., Liao, J., Nakata, N.**, 2014, Joining of metal to plastic using friction lap welding, Materials and Design, 54: 236–244pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lochner, R.H. and Matar, J.E.**, 1990, Designing for Quality - An Introduction to the Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design, Chapman and Hall, New York, 256p.
- Logothetis, N. and Wynn, H.P.**, 1994, Quality through Design : Experimental Design, Off-Line Quality Control, And Taguchi's Contributions, Clarendon Press, Oxford, England, 480p.
- Lohwasser, D. and Chen, Z.**, 2010, Friction Stir Welding - From Basic to Applications, Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2010.
- Lye, L. M.**, 2002, Design of Experiments (DOE) in Civil Engineering: Are we still in the 1920's ?, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada, 1-10pp.
- Malyer, E.**, 2010, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 5000 Serisi, Alüminyum Alaşımlarında Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 126s (yayınlanmamış)
- Mendelhall, W. and Sincich, T.**, 2011, A Second Course In Statistics Regression Analysis 7th ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, 816p.
- Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P. and Pires, J.N.**, 2014, Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding, Material and Design, 64: 81-90pp.
- Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P. and Pires, J.N.**, 2014, Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds, Materials and Design, 58: 457–464pp.
- Mendes, N., Neto, P., Simão, M.A., Loureiro, A. and Pires, J.N.**, 2014, A novel friction stir welding robotic platform: welding polymeric materials. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Published online: 1-10pp.
- Mert, Ş.**, 2010, Polipropilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 287s (yayınlanmamış)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Miller, A., Sitter, R.R., Wu, C.F.J. and Long, D.,** 1993/1994 Are large Taguchi-style experiments necessary? A reanalysis of gear and pinion data. *Quality Progress*, 6: 21–37pp.
- Minitab, 2010,** Meet Minitab 16 - User Manual, Release 16.1.0, Minitab Inc., Coventry, UK, 122p.
- Mishra R.S. and Ma Z.Y.,** 2005, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol.50, Issue 1-2, 1-78pp.
- Mishra, R. and Mahoney, M.,** 2007, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, Ohio, 338p.
- Mistry, K.,** 1997, *Plastics welding technology for industry*, *Assembly Automation*, 17:196-200pp.
- Mitra, A.,** 2011, *The Taguchi method.*, John Wiley and Sons, Inc. *WIREs Comp Stat* 2011, 3: 472–480pp.
- Montgomery, D.C.,** 2008, *Design and Analysis of Experiments*, seventh edition. John Wiley and Sons, New York, 680p.
- Mostafapour, A., and Azarsa, E.,** 2012, A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure, tensile and flexural properties, *International Journal of the Physical Sciences*, 7(4), 647-654pp.
- Mukherjee, I. and Ray, R.K.,** 2006, A review of optimization techniques in metal cutting processes, *Computers & Industrial Engineering*, 50: 15–34pp.
- Murr, L. E., Flores, R. D., Flores, O.V., McClure, J. C., Liu, G. and Brown, D.,** 1998, Friction stir welding: Microstructural characterization, *Materials Research Innovations*, 1: 211-223pp.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., Vining, G.H., and Robinson, T.J.,** 2012, *Generalized Linear Models with Applications in Engineering and the Sciences*, 2nd. ed. John Wiley and Sons, 496p.
- Nair, V.N.,** 1992, Taguchi's parameter design: a panel discussion, *Technometrics*, 34: 121-161pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nandan, R., Roy, G., and Debroy, T.**, 2006, Numerical simulation of three dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding, Metallurgical and Materials Transactions (A), 37(4): 1247-1259pp.
- Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H.**, 2008, Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science, 53, 980–1023pp.
- Nelson, T.W.**, 2000, Joining of Thermoplastics With Friction Stir Welding. Brigham Young University Press, Provo, Utah, 105p.
- Nonhof, J.**, 1994, Laser welding of polymers, Polymer Engineering and Science, 34(20):1547–1549pp.
- Oliveira, P.H.F., Amancio-Filho, S.T., Dos Santos. J.F., and Hage, Jr., E.**, 2010, Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA. Materials Letters, 64: 2098–2101pp.
- Panneerselvam, K. and Lenin, K.**, 2013, Effects and defects of the PP plate for different parameters in friction stir welding process, International Journal of Engineering Research & Technology, 2(3): 143-152pp.
- Panneerselvam, K. and Lenin, K.**, 2013, Optimizing the welding parameters of fsw by using resultant force and defects for PA6 material, International Journal of Mechanical Engineering, 2(2): 87-94pp.
- Panneerselvam, K., and Lenin, K.**, 2012, Investigation on effect of tool forces and joint defects during friction stir welding of PP plate, Procedia Engineering, 38: 3927-3940pp.
- Panneerselvam, K., and Lenin, K.**, 2012, Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. Material and Design, 53: 302–307pp.
- Patel, K. R., Dave, K.G. and Radadiya, V.A.**, 2015, Experimental investigation of friction stir welding on ultra high molecular weight polyethylene, International Journal of Advance Engineering and Research Development, 2(5): 830-834pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Payganeh, G. H., Mostafa Arab, N. B., Asl, Y.D., Ghasemi, F. A., and Boroujenii B.M.**, 2011, effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds, International Journal of the Physical Sciences, 6 (19): 4595-4601pp.
- Peace, G.S.**, 1993, Taguchi Methods: A Hand-on Aproach. Addison-Wesley, Reading MA., 224p.
- Peacock, A.**, Handbook of Polyethylene - Structures- Properties, and Applications, CRC Press, New York, 544p.
- Penteado, R.B., Hagui, T.G., Faria, J.C., Silva, M.B. and Ribeiro, M.V.**, 2010, Application of Taguchi method in process improvement of turning of a superalloy nimonic 80A, 21st Annual Conference on Production and Operations Management Society- POM, 1: 1–8pp.
- Phadke, M.S.**, 1989, Quality Engineering using Robust Design. Prentice-Hall, New York, 333p.
- Pignatiello, J.J. and Ramberg, J.S.**, 1992, Top ten triumphs and tragedies of Genichi Taguchi, Quality Engineering,4: 211–225pp.
- Pirizadeh, M., Azdast, T., Ahmadi, S.R., Sajjad, S.M. and Bagheri, A.**, Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool, Materials and Design, 54: 342–347pp.
- Preuss, M., Withers, P. and Baxter, G.J.**, 2006, A Comparison of inertia friction welded in three nickel base superalloys, Materials Science Engineering, A437: 38-45pp.
- Progelhof, R.C. and Throne J.L.**, 1993, Polymer Engineering Principles: Properties, Processes, and Tests for Design, Hanser Publisher, München, 918p.
- Rawdolph, A. F.**, 1960, Plastics Engineering Handbook of the Society of The Plastics Industry, 3rd ed., Reinhold Pub., 565p.
- Rezgui, M.A., Trabelsi, A.C., Ayadi, M.A. and Hamrouni, K.**, 2011, Optimization of friction stir welding process of high density polyethylene, International Journal of Production and Quality Engineering, 2(1): 55-61pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rezgui, M.A., Ayadi, M., Cherouat, A., Hamrouni, K., Zghal, A., and Bejaoui, S.**, 2010, Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of Polyethylene, EPJ Web of Conferences 6, Article No 07003, ICEM14 - 14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitier, France, 1-8pp.
- Roff, W. and Scott, J.**, 1971, Fibres, Films, Plastics and Rubbers, Butterworth - Heinemann, London, 704p.
- Ross, P.J.**, 1996, Taguchi Techniques for Quality Engineering. McGraw-Hill, Singapore, 329p.
- Roy, R.K.**, 1960, A Primer on the Taguchi Method, Van Nostrand Reinhold, New York, 300p.
- Roy, R.K.**, 2001, Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement, John Wiley and Sons, New York, 560p.
- Saçak, M.**, 2012, Polimer Teknolojisi, Gazi Kitabevi, Ankara, 462s.
- Saeedy, S. and Givi, M.K.B.**, 2010, Feasibility of friction stir welding on mediumdensity polyethylene blanks, ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 4: 238-249pp.
- Saeedy, S. and Givi, M.K.B.**, 2011, Effects of Critical Process Parameters of Friction Stir Welding of Polyethylene, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225: 1305-1310pp.
- Saeedy, S. and Givi, M.K.B.**, 2011, Investigation of the effects of critical process parameters of friction stir welding of polyethylene, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture August 2011 vol. 225 no. 8, July 18, 2011, 1305-1310pp.
- Saeedy, S. and Givi, M.K.B.**, Experimental study on the effects of rotational speed and attack angle on high density polyethylene friction stir welded butt joints, Advanced Materials Research,189-193: 3583-3587pp
- Sanders, P.**, 1987, Electromagnetic welding: an advance in thermoplastics assembly, Materials and Design, 8(1) 41–45pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sarsılmaz, F.**, 2008, Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 147s (yayınlanmamış)
- Savaşçı, Ö., T., Uyanık, N. ve Akovalı, G.**, 2002, Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi, 2. Baskı, PAGEV Yayınları, İstanbul, 511p.
- Sayer S., Yeni Ç. ve Ülker A.**, 2012, Termoplastiklerin kaynakla birleştirilme esasları ve teknolojik yenilikler (1), PAGEV Plastik, 122: 190-198s.
- Sayer, S.**, 2007, AA 6063 (AlMgSi0.5) Tipi Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin, Bağlantının Dayanımı ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 111s (yayınlanmamış)
- Scialpi, A., Troughton, M., Andrews, S., and De Filippis, L.A.C.**, 2009, VibladeTM: friction stir welding for plastics. Welding International, 23(11):846-855pp.
- Sharma, R. And Singh, O. P.**, 2013, Effect of friciton stir welding process parameters on mechanical properties of polypropylene: an experimental study, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2(12): 7792-7798pp.
- Shepherd, J.E., McDowell, D.L. and Jacob, K.I.**, 2006, Modeling morpohology evolution and mechanical behavior during thermo-mechanical processing of semi-crystalline polymers, Journal of Mechanics and Physics Solids, 54: 467-489, (2006).
- Simoës, F. and Rodrigues, D.M.**, 2014 Material flow and thermo-mechanical conditions during friction stir welding of polymers: Literature review, experimental result and empirical analysis, Materials and Design, 59: 344-351pp.
- Singh, G.**, 2012, Some investigations in friction stir welding of aluminium alloy 6082, Ph.D. Dissertation, Sant Longowal Institute of Engineering and Technology Longowal (Deemed University), 207p (unpublished)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Singla, K., Bhardwaj, D. and Burman, V.**, 2014, Friction stir welding - Literature review, International Journal Of Research in Aeronautical And Mechanical Engineering (Online): 2321-3051, 2(9): 1-11pp.
- Smith, A.P., Spontek, R.J. and Ade, H.**, 2001, On the similarity of macromolecular responses to high energy processes: mechanical milling v.s. irradiation , Polymer Degradation and Stability, 72: 519-524pp.
- Song, Y., Liu, Y., Zu, X., Yu, S. and Zang,Y.**, 2008, Strength distribution interface of rotary friction welded aluminum to nodular cast iron, Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 18: 14-28pp.
- Sorensen, C.D., Nelson, T.W., Strand, S., Johns, C., and Christensen, J.**, 2001, Joining of thermoplastics with friction stir welding. ANTEC 2001 - Conference proceedings, Society of Plastics Engineers, Dallas, 1031-1036pp.
- Sorensen, C.D., Nelson, T.W., Strand, S., Johns, C., and Christensen, J.**, 2001, Joining of Thermoplastics with Friction Stir Welding, Brigham Young University Press, Provo, Utah, 122p.
- Squeo, E.A., Bruno, G., Guglielmotti, A., and Quadrini, F.**, 2009, Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets, The Annals of Dunarea de Jos University of Galati, Technol. Machine Building, 5, 241-246pp.
- Stamm, B., Natterer, J. and Navi, P.**, 2005, Joining Wood by Friction Welding, Holz als Roh-und Werkstoff, 63: 313-320pp.
- Strand, S. R.**, 2004, Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure, M.Sc. Thesis, Brigham Young University, 163p, (unpublished)
- Strand, S.**, 2003, Joining plastics - can friction stir welding compete? Paper presented at the electrical insulation conference and electrical manufacturing & coil winding technology conference, 321-326pp.
- Strand, S.R., Sorensen, C.D., and Nelson, T.W.**, 2003 Effects of friction stir welding on polymer microstructure. ANTEC 2003, Conference proceedings, Society of Plastics Engineers, Nashville, May 2003. 1078-1082pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şanyılmaz, M.**, 2006, Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 109s (yayınlanmamış)
- Şelale, S.**, 2006, Polietilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma ile Birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s (yayınlanmamış).
- Şirvancı, M.**, Kalite İçin Deney Tasarımı Yaklaşımı, Taguchi Yaklaşımı, Literatür Yayınları, İstanbul, 112s.
- Taguchi, G., Elsayed, E. and Hsiang, T.**, 1989, Quality Engineering in Production Systems, McGraw-Hill, New York, 192p.
- Taguchi, G.**, 1990, Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo, 191p.
- Taguchi, G. and Konishi, S.**, 1987, Taguchi Methods Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering, Amer Supplier Institute Press, Michigan, 72p.
- Taguchi, G. and Wu, Y.I.**, 1985, Introduction to Off-Line Quality Control, Central Japan Quality Control Association, Nagoya, 112p.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wui, Y.**, 2005, Taguchi's Quality Engineering Handbook. John Wiley & Sons, New Jersey, 1696p.
- Thomas, W.M. and Dolby, R.E.**, 2003, Friction stir welding developments, 6th International Trends in Welding Research Conference, Pine Mountain, USA, 203-211p.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, ., M. G., Templesmith, P. and Dawes, C.J.**, 1991, International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London.
- Thomas, W. M., and Nicholas, E. D.**, 1997, Friction stir welding for the transportation industries. Materials and Design, 18 (4/6): 269-273pp.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P. And Dawes, C. J.**, 1995, Friction stir butt welding. US Patent No. 5460317.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R. and Withers, P.J.**, Friction stir welding of aluminium alloys. *International Material Reviews*, 52(2): 49-93pp.
- Tozkoparan, D.**, 2010, Plasma Sprey Kaplama Kalitesine Etki Eden Faktörlerin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s (yayınlanmamış)
- Troughton, M.**, 2008. *Handbook of Plastics Joining – A Practical Guide* (Plastics Design Library), 2nd ed., William Andrew Inc., New York, 600p
- TWI**, TWI Global, Friction Stir Welding, <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-processes/friction-stir-welding> (Erişim tarihi: 01.11.2015)
- Ülker A., Yeni Ç. ve Sayer S.**, 2013, Termoplastiklerin kaynakla birleştirilme esasları ve teknolojik yenilikler - lazer ve yüksek frekans kaynağı, *PAGEV Plastik*, 124:98-107s.
- Ülker, A., Kocatüfek, U.E., Sayer, S. and Yeni, Ç.**, Application of the Taguchi method for the optimization of the strength of polyamide 6 composite hot plate welds, *Material Testing* 57(6): 531-542pp.
- Vijayan N.**, 1992, The role of interactions, SN ratios, and selection of quality characteristics, *Technometrics*, 34(2): 137- 141pp.
- Wise, R.**, 1997, Welding plastics, *Design Engineering*, 27–30.
- Xu, S.**, 2003, Microstructure Analysis and Solid Mechanics Modeling of Friction Stir Welding, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering College of Engineering & Information Technology, University of South Carolina, 278.p (unpublished).
- Yang, W.H. and Tarng, Y.S.**, 1998, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122-129pp.
- Yaşar, H.**, 1992, *Plastikler Dünyası*, TMMOB MMO Yayınları, Ankara, 167s
- Yeni Ç., Sayer S., Ülker A.**, 2013, Termoplastiklerin kaynakla birleştirilme esasları ve teknolojik yenilikler (2) - Ultrasonik ve vibrasyon kaynağı, *PAGEV Plastik*, 123: 118-124s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yılbaş, B.S., Şahin, A.Z., Kahraman, N. and Al-Garni, A.Z.,** Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials, Journal of Materials Processing Metalurgy, 49: 431-443pp.
- Yıldırım, H.,** 2007, Plastiklere Uygulanan Kalite Kontrol Yöntemleri ve Plastiklere Katılan Katkı Maddeleri Seminer Notları, MMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 73s (yayımlanmamış)
- Yıldız, A. R.,** 2013, A new hybrid articial bee colony algorithm for robust optimal design and manufacturing, Applied Soft Computing, 13(5): 2906–2912pp.
- Yousefpour, A., Hojjati, M., and Immarigeon, J.P.,** 2004, Fusion bonding - Welding of thermoplastic composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials:17, 303–341pp.
- Zhang, H.W., Zhang, Z. and Chen, J.T.,** The finite element simulation of the friction stir welding process. Materials Science and Engineering A, 403: 340: 348pp.

ÖZGEÇMİŞ

1970 Aydın doğumlu olan Aydın ÜLKER, ilk ve orta öğrenimini Aydın’da tamamlamıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nden 1993’de mezun olmuştur. 1995 yılında aynı üniversitede Mühendislik Mekaniği, Tasarım ve İmalat alanlarında “Characterization of Directivity Patterns of Ultrasonic Non-destructive Testing Probes” konulu tez ile yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. ARÇELİK A.Ş. Elektrikli Süpürge İşletmesi’nde ürün tasarım, ürün geliştirme mühendisi ve proje lideri olarak çalışmış, TEBA ISK A.Ş.’de Japonya’da Daikin Industries Ltd. ve Belçika’da Daikin Europe N.V. ile ortak uluslararası projeler yöneticiliği, üretim ve operasyon yöneticiliği yapmıştır. Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu’nda 2011 yılından bu yana yarı-zamanlı olarak “Endüstriyel Kalıpçılık” ve “Polimer Teknolojisi” programlarında makina ve polimer teknolojileri alanlarına dersler vermektedir. Çalışma alanları termoplastik malzemelerin birleştirilmesi, polimer malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı, ürün tasarımı, ürün geliştirme, ürün yaşam döngüsü, kalite mühendisliği ve deneysel tasarım yöntemleridir.

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI Journals) :

- [1] **Ülker, A.**, Sayer, S., Ceyhun, V., 2016, Investigation of effects of welding parameters and joint strength optimization in friction stir welding of high density polyethylene with Taguchi experimental design method, Material Testing (Materialprüfung) (under review)
- [2] Taşkiran, E., Sayer, S., Özes, Ç., Yeni, Ç., **Ülker, A.**, 2015, Effect of process parameters and talc ratio on hot plate welding of polypropylene, Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik), 46, 8, pp. 860-872, DOI: 10.1002/mawe.201500438
- [3] **Ülker, A.**, Kocatüfek, U.E., Sayer, S., Yeni Ç., 2015, Application of the Taguchi method for the optimization of the strength of polyamide 6 composite hot plate welds, Material Testing (Materialprüfung) 57, 6, pp. 531-542, DOI: 10.3139/120.110741

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler :

- [1] Kocatüfek, U., Yeni, Ç., **Ülker, A.**, Sayer, S., Özdemir U., 2014, Optimization of hot plate welding parameters of glass fibered reinforced Polyamide 6 (PA6 GF15) composite material by Taguchi Method, Usak University Journal of Material Sciences, 1, pp. 69-85

Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan makaleler :

- [1] Sayer, S., **Ülker, A.**, 2014. “Ürün yaşam döngüsü yönetimi - PLM” Mühendis ve Makina, 657: 57-64.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- [1] Eigner, M., Sayer, S., **Ülker, A.**, Kurtuldu, A., History and Development of Turkish Industry (From Product Development to Industry 4.0), 7. PLM Future Tagung 2015, Industrial Internet - Rethink Products, Processes and IT-Tools Symposium, Kaiserslautern, Germany, 07.10.2015

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- [2] Kocatüfek, U., Yeni, Ç., **Ülker, A.**, Sayer, S., Özdemir, U., Optimization of hot plate welding parameters of glass fibered reinforced polyamide 6 composite material by Taguchi Method, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası, Aydın pp. 467-468, 07-09.11.2013
- [3] Uçar, M., **Ülker, A.**, Özes, Ç., Determination of welding parameters of styrene based polymers by Taguchi Method, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası, Aydın, pp. 200-212, 07-09.11.2013

Ulusal dergilerde yayınlanan makaleler :

- [1] **Ülker, A.**, Yeni, Ç., Sayer, S., 2013, “Termoplastiklerin kaynakla birleştirilme esasları ve teknolojik yenilikler (3) - Lazer ve yüksek frekans kaynağı”, PAGEV Plastik, 124:98-107
- [2] Yeni, Ç., Sayer, S., **Ülker, A.**, 2013, “Termoplastiklerin kaynakla birleştirilme esasları ve teknolojik yenilikler (2)- Ultrasonik ve vibrasyon kaynağı”, PAGEV Plastik, 123:118-124
- [3] Sayer, S., Yeni, Ç., **Ülker, A.**, 2012, “Termoplastiklerin Kaynakla Birleştirilme Esasları ve Teknolojik Yenilikler (1)”, PAGEV Plastik, 122: 190-198
- [4] Yeni, Ç., Sayer, S., **Ülker, A.**, 2010, Poliamid parçaların üretim sonrasında nem alarak şartlandırılması, PAGEV Plastik, 111: 296-302

Diğer:

- [1] **Ülker, A.**, 1995, Characterization of directivity patterns of ultrasonic non-destructive testing probes, Unpublished master of science thesis, Middle East Technical University, Department of Mechanical Engineering, Ankara