

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK TESİRLİ BİNDİRME
BAĞLANTILARINDA BAĞLANTI GEOMETRİSİ
DEĞİŞİKLİĞİNİN KOPMA YÜKÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hüseyin TOK

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2023
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK TESİRLİ BİNDİRME BAĞLANTILARINDA BAĞLANTI GEOMETRİSİ DEĞİŞİKLİĞİNİN KOPMA YÜKÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hüseyin TOK

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Günümüzde birçok alanda, yapıştırıcılar kullanılarak bindirmeli bağlantı uygulamaları yapılmaktadır. Önceki yıllarda bindirmeli bağlantı işlemleri daha çok cıvata ve perçinler ile yapılmaktaydı. Kullanılan bu elemanların kendilerine özgü dezavantajları bulunmaktadır. Sonraki yıllarda büyük bir hızla gelişen yapıştırıcı sektörü bindirmeli bağlantılarda yapıştırıcıların da kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bindirmeli bağlantıların en belirgin dezavantajı, bindirme bölgesinde oluşan momenttir. Tek tesirli bindirme bağlantılarında, birleştirilen elemanların uç noktalarından çekme kuvvetine maruz bırakılması ile bindirme bölgesinde moment oluşmaktadır. Uygulanan kuvvetin, bağlantının ağırlık merkezinden farklı noktalara etki etmesi moment oluşumunun temel nedenidir. Bu durum bindirmeli bağlantılarda yapıştırıcının kopma yükünü olumsuz yönde etkilemektedir. Oluşan momentin değerini ve etkilerini azaltıp, yapıştırıcının performansını arttırabilmek için bağlantı geometrisinde bazı değişiklikler yapılması öngörülmüştür.

Geometride yapılan değişikliklerin amacı çekme kuvveti doğrultusunun, bağlantının ağırlık merkezine yaklaştırılmasıdır. Bunun sonucunda oluşan momentin değeri azaltılarak, kopma yükünün arttırılması çalışmanın temel amacını içermektedir. En uygun geometrinin belirlenebilmesi için Taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Alüminyum ve çelik plakaların, DP460 yapıştırıcı kullanılarak klasik bindirme yöntemi ile birleştirildikten sonra, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kopma yükü değerleri belirlenmiştir. Daha sonra plakalar üzerinde geometrik değişiklikler yapıp sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kopma yükleri belirlenmiştir. Son olarak elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılıp, gerekli değerlendirmeler yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

2023, 64 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Bağlantı, Bindirme, Çelik, DP460, Kopma Yükü, Moment, Sonlu Elemanlar, Taguchi, Yapıştırıcı

ABSTRACT

MSc Thesis

SEARCHING THE EFFECT OF GEOMETRY ALTERATION AT THE SINGLE LAP JOINTS CONNECTED WITH ADHESIVE ON THE BREAKING LOAD WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Hüseyin TOK

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Lap joints application are made by using adhesives in many areas. Previous years lap joints are made by using with bolts and rivets. These materials have advantages and disadvantages. The adhesive industry which has developed rapidly in the following years, has enabled the use of adhesives in lap joints. The most important disadvantages of lap joints is that the moment which are generated at a connection area (joint face). In single-action lap joints, when the joined elements are subjected to tensile force from their end points, moment occurs in the lap area. The main reason for the moment formation is that the applied force acts on different points from the center of gravity of the joint. This situation negatively affects the breaking load of the adhesive in lap joints. Some changes have been envisaged in the connection geometry in order to reduce the value and effects of the resulting moment and increase the performance of the adhesive.

The purpose of the changes in geometry is to bring the direction of pulling force closer to the center of gravity of the connection. hereat increasing the breaking load by decreasing the value of the resulting moment is the main aim of the study. The taguchi method was used to determine the most suitable geometry. After joining the aluminum and steel plates with the classical overlay method using DP460 adhesive, the breaking load values were determined using the finite element method. Then, geometric changes were made on the plates and the breaking loads were determined using the finite element method. Finally, the study was completed by comparing all the obtained results and making the necessary evaluations.

2023, 64 Pages

Keywords: Aluminum, Connection, Mounting, Steel, DP460, Breaking Load, Moment, Finite Elements, Taguchi, Adhesive

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda, konunun belirlenmesi, çalışmanın ilerleyişi ve değerlendirilmesi aşamalarında beni yönlendiren, desteğini aynı zamanda yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Adnan ÖZEL başta olmak üzere, Dr. Öğretim Üyesi Salim ÇAM hocama ve yüksek lisans dönemimde bilgilerinden istifade ettiğim tüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Özellikle, eğitim öğretim hayatımın başladığı günden bugüne, desteklerini her zaman arkamda hissettiğim ve maddi manevi bütün imkanlarıyla yanımda olan aileme, bu süreçte beni yalnız bırakmayan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin TOK

Eylül, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Yapışma.....	9
2.2. Yapıştırma Bağlantıları	9
2.2.1 Yapıştırma bağlantılarında yükleme tipleri	10
2.2.2 Yapıştırmayı etkileyen faktörler	11
2.3 Yapışma Teorileri.....	12
2.3.1. Mekanik tutunma teorisi	12
2.3.2. Difüzyon teorisi	12
2.3.3 Adsorpsiyon teorisi.....	13
2.3.4. Elektrostatik teorisi.....	13
2.4. Yapıştırmada Yüzey Islatma	14
2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Türleri.....	15
2.6. Yapıştırma İşleminde Yüzeylerin Hazırlanması	16
2.6.1. Yapıştırmada yüzey hazırlama yöntemleri	16
2.7. Yapıştırıcı Çeşitleri.....	17
2.7.1. Yapıştırıcıların sınıflandırılması.....	18
2.7.1.1. Kimyasal durumlarına göre yapıştırıcılar.....	18
2.7.1.2. Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar	20
2.7.1.3. Formlarına göre yapıştırıcılar.....	21
2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi (ANSYS)	22
2.8.1. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan eleman tipleri	23

2.8.2. Sonlu elemanlar yönteminin faydaları.....	25
2.8.3. Sonlu elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları	25
2.8.4. Cohesive bölge modeli (CZM)	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1. Yapıştırılan Malzemeler	28
3.1.1. 50CrV4 (Yay Çeliği)	28
3.1.2. Alüminyum alaşımı (AA2024-T3)	30
3.2. Kullanılan Yapıştırıcı	31
3.2.1. Yapıştırıcı DP460	31
3.3. Sonlu Elemanlar Modeli.....	33
3.4. Modellerin Oluşturulması.....	35
3.4.1. Klasik bindirme bağlantısı modelinin oluşturulması.....	36
3.4.2. Birinci geometri değişikliği ile oluşturulan bindirme bağlantısı modeli	38
3.4.3. İkinci geometri değişikliği ile oluşturulan bindirme bağlantısı modeli.....	40
3.5. Taguchi Metodu	42
3.5.1. Taguchi metodunun temel çalışma prensibi	43
3.5.2. Araştırmada taguchi metodunun kullanımı	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	45
4.1. Klasik Bindirme Bağlantısı Analizi	45
4.2. Birinci Geometri Değişikliği İle Oluşturulan Bindirme Bağlantılarının Analizi	47
4.3. İkinci Geometri Değişikliği İle Oluşturulan Bindirme Bağlantılarının Analizi	51
5. SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Uygulanan kuvvetin yapışma merkezinden uzak eksenlere etkisi	2
Şekil 1.2	(a) Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı (b) Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı (c) Boyun Bindirme Bağlantısı (d) Açılı Bindirme Bağlantısı (e) Teraslama Bağlantısı (f) Tek Takviyeli Bindirme Bağlantısı (g) Çift Takviyeli Bindirme Bağlantısı (h) Alın Bağlantısı (i) Silindirik Bindirme Bağlantısı (j) Soyulma (Adams vd., 1994a, 1997b; Aydın, 2007).	3
Şekil 1.3	Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Kuvvetin Etki Ettiği Doğrultu Ve Sonucunda Oluşan Görünüm (Adams vd., 1994a, 1997b; Aydın, 2007).	4
Şekil 2.1	(a) Kesme (b) Çekme (c) Soyulma (d) Çekme-Makaslama	11
Şekil 2.2	Yüzey ıslatma olayı	14
Şekil 2.3	Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri [ts en iso 10365]	15
Şekil 3.1	50CrV4 gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	29
Şekil 3.2	AA2024-T3 gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	31
Şekil 3.3	DP460 gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	32
Şekil 3.4	Çalışmada kullanılan başlangıç geometrisinin mesh'lenmiş hali.....	34
Şekil 3.5	CZM'de yapıştırıcı ile üst plaka arasında oluşturulan kontak.....	34
Şekil 3.6	CZM'de yapıştırıcı ile alt plaka arasında oluşturulan kontak.....	35
Şekil 3.7	Plakaların boyu 75 mm, plakaların genişliği 25 mm, plakaların kalınlığı 5 mm, bağlantı bölgesi uzunluğu ve genişliği 25 mm, yapıştırıcı kalınlığı 0,16 mm.....	35
Şekil 3.8	Kuvvet doğrultusu ile yapışma bölgesi doğrultusu arasındaki mesafe.....	36
Şekil 3.9	Sırasıyla; alt plaka – yapıştırıcı – üst plaka	36
Şekil 3.10	Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları.....	37
Şekil 3.11	Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları.....	37
Şekil 3.12	Birinci geometri değişikliği ile, oluşan doğrultular arası mesafe	38
Şekil 3.13	1. Geometri değişikliği değişkenleri; x: izdüşüm, y: uzaklık, z: yükseklik....	39
Şekil 3.14	Birinci geometri değişikliği sırasıyla; alt plaka – yapıştırıcı – üst plaka.....	40
Şekil 3.15	Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları.....	40
Şekil 3.16	İkinci geometri değişikliği ile, oluşan doğrultular arası mesafe.....	40
Şekil 3.17	2. geometri değişikliği değişkenleri; x: izdüşüm, y: uzaklık, z: yükseklik....	41
Şekil 3.18	İkinci geometri Değişikliği Sırasıyla; Alt Plaka – Yapıştırıcı – Üst Plaka....	42
Şekil 3.19	Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları.....	42
Şekil 3.20	Farklı geometriler için taguchi metodu ile belirlenen değişken değerleri	44

Şekil 4.1	Klasik bindirme bağlantısında kopmanın gerçekleşmesi	45
Şekil 4.2	50CrV4 (Yay Çeliği) bağlantının kopma yükü	46
Şekil 4.3	AA2024-T3 bağlantının kopma yükü.....	46
Şekil 4.4	Birinci geometri değişikliği bağlantısında kopmanın gerçekleşmesi	47
Şekil 4.5	Birinci geometri değişikliği için taguchi metodu ile oluşturulan model kombinasyonları ve yapılan deneylerin sonuçları	48
Şekil 4.6	Birinci geometri değişikli için en etkili değişken sıralaması.....	49
Şekil 4.7	Birinci geometri değişikliği İçin 50CrV4 bağlantının kopma yükü	50
Şekil 4.8	Birinci geometri değişikli için AA2024-T3 bağlantının kopma yükü.....	50
Şekil 4.9	İkinci geometri değişikliği bağlantısında kopmanın gerçekleşmesi.....	51
Şekil 4.10	İkinci geometri değişikliği için taguchi metodu ile oluşturulan model kombinasyonları ve yapılan deneylerin sonuçları	52
Şekil 4.11	İkinci geometri değişikli için en etkili değişken sıralaması	53
Şekil 4.12	İkinci geometri değişikliği için 50crv4 bağlantının kopma yükü.....	54
Şekil 4.13	İkinci geometri değişikli için aa2024-t3 bağlantının kopma yükü	54
Şekil 5.1	Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin von-misses gerilmeleri	55
Şekil 5.2	Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin x yönündeki normal gerilmeleri	56
Şekil 5.3	Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin y yönündeki normal gerilmeleri	56
Şekil 5.4	Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin z yönündeki normal gerilmeleri	57
Şekil 5.5	Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin xy’ deki kesme gerilmeleri.....	57
Şekil 5.6	Al için birinci ve ikinci geometrilerin von-misses gerilmeleri.....	58
Şekil 5.7	Al için birinci ve ikinci geometrilerin x yönündeki normal gerilmeleri.....	58
Şekil 5.8	Al için birinci ve ikinci geometrilerin y yönündeki normal gerilmeleri.....	59
Şekil 5.9	Al için birinci ve ikinci geometrilerin z yönündeki normal gerilmeleri.....	59
Şekil 5.10	Al için birinci ve ikinci geometrilerin xy’ deki kesme gerilmeleri	60

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Farklı metaller için tavsiye edilen aşındırıcı boyutları	17
Tablo 3.1 50CrV4 (Yay Çeliği)'un kimyasal kompozisyonu	28
Tablo 3.2 50CrV4 Mekanik özellikleri	29
Tablo 3.3 AA2024-T3 mekanik özellikleri	30
Tablo 3.4 AA2024-T3 kimyasal kompozisyonu	31
Tablo 3.5 DP460 mekanik özellikleri	32
Tablo 3.6 DP460 Cohesive Zone Model (CZM) Parametreleri	33
Tablo 3.7 Değişkenler için kullanılacak boyutlar.....	39
Tablo 3.8 Değişkenler için kullanılacak boyutlar.....	41
Tablo 3.9 Taguchi ve tam faktöriyel tasarım için deney sayıları	43
Tablo 4.1 Birinci geometri değişikliği için en etkili değişken sıralaması.....	49
Tablo 4.2 İkinci geometri değişikliği için en etkili değişken sıralaması.....	53

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

σ	Normal Gerilme
%	Yüzde
ε	Şekil Değiştirme
$K1$	Alt Eleman Kalınlığı
$K2$	Üst Eleman Kalınlığı
E	Elastisite Modülü
α	İslatma Açısı
τ	Kayma Gerilmesi
l	Bindirme Uzunluğu

Kısaltmalar

CF	Cohesive Hasar
CZM	Cohesive Zone Model
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi

1. GİRİŞ

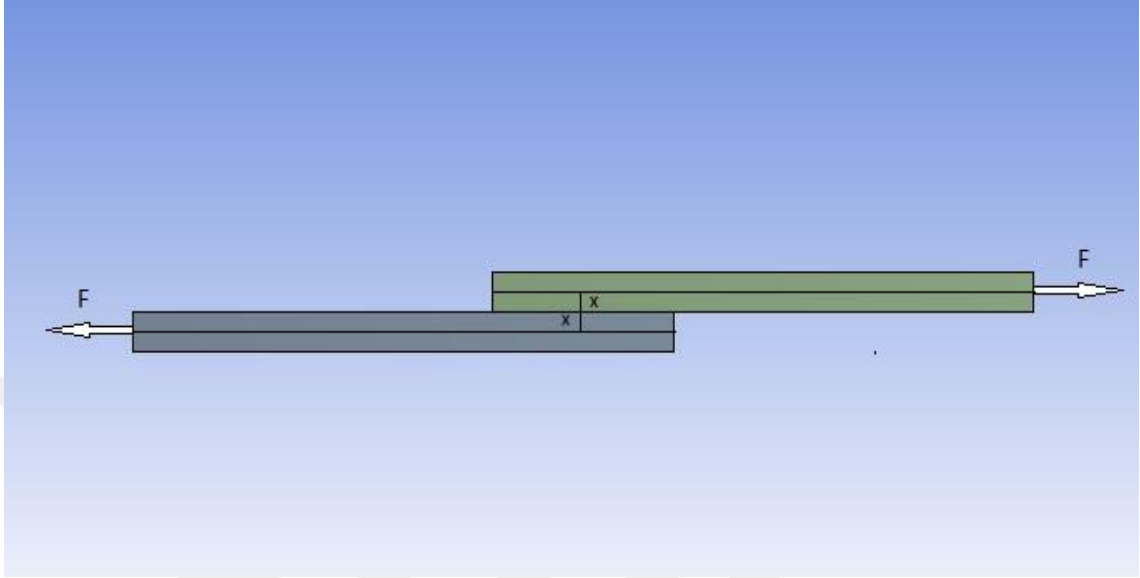
Yapıştırıcılar günümüzden binlerce yıl önce kullanılmaya başlayan birleştirme elemanlarıdır. O yıllarda, ağaçlardan elde edilen reçineler, bitkilerden elde edilen özler, avlanan hayvanların kanları ve yumurta akı dönemin şartlarında kullanılan yapıştırıcılardır. Eski çağlarda insanlar kullandıkları ve tahrip olmuş günlük eşyalarını, bahsedilen bu materyaller ile yapıştırarak tekrar tekrar kullanabilmekteydiler. İnsanlar binlerce yıl önce kullandıkları bu yapıştırıcılar ile bir şeyler üretmek yerine genel anlamda tamir veya sabitleme işlemleri yapmaktaydılar. Günümüze yaklaştıkça bu durum değişerek, özellikle reçine ve yumurta akı ile yeni ürünler yapılmaya başlanmıştır. Günümüzden birkaç yüzyıl önce yapılan binalarda yumurta akının kullanılması buna örnek olarak verilebilir.

Teknolojinin ilerlemesi her alanda olduğu gibi yapıştırıcı sektöründe de gelişmelerin önünü açmıştır. Günümüzde yapıştırıcılar çeşitli kimyasal ve sentetik malzemelerin kullanılmasıyla üretilmektedir. Böylece yapıştırıcı performansı çok yüksek seviyelere çıkmıştır. Bu durum yapıştırılacak elemanların boyut ve ağırlıklarının artmasına aynı zamanda daha uzun kullanım sürelerine ulaşmasına neden olmuştur. Böylece yapıştırıcılar, daha önceden geçici olarak kullanıldıkları işlemler yerine, uygulamalarda kalıcı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum sonucunda birleştirme işlemlerinde yeni bir tür olarak kendine yer edinmiştir.

Yapıştırma işlemi, yapıştırıcılar kullanılarak iki veya daha fazla malzemenin yüzey teması ile birbirine tutturulması olarak tanımlanabilir. Yapıştırıcılar günümüzde farklı alanlarda kendine yer bulmuş, aynı zamanda kaynak, perçin, cıvata vb. birleştirme elemanlarına yardımcı olarak veya bu elemanların alternatifi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirme işlemleri, son yıllarda birçok alanda ilerleme kaydetmiştir. Havacılık sanayisi başta olmak üzere otomotiv, ahşap, kompozit ve günlük yaşantımıza etki eden birçok alanda yapıştırıcıların kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Bunun yanı sıra bahsi geçen sektörlerde kullanımı artmaktadır.

Yapıştırıcılar genel olarak bindirme bağlantılarında kullanılmaktadır. Bindirme bağlantıları iki veya daha fazla malzemenin, yüzeyinin belirli bir kısmının biribiri üzerine bindirilmesiyle oluşan bağlantı çeşididir. Tüm bağlantı çeşitlerinin kendine özgü dezavantajları bulunmaktadır. Tek tesirli bindirme bağlantılarında en önemli

dezavantajlardan birisi, bağlantısı yapılacak olan malzemelerin birbiri üzerine bindirilmesinden dolayı, uygulanan kuvvetin birleştirilen malzemelerin ağırlık merkezi ekseninden uzaklaşmasıyla oluşan momenttir.

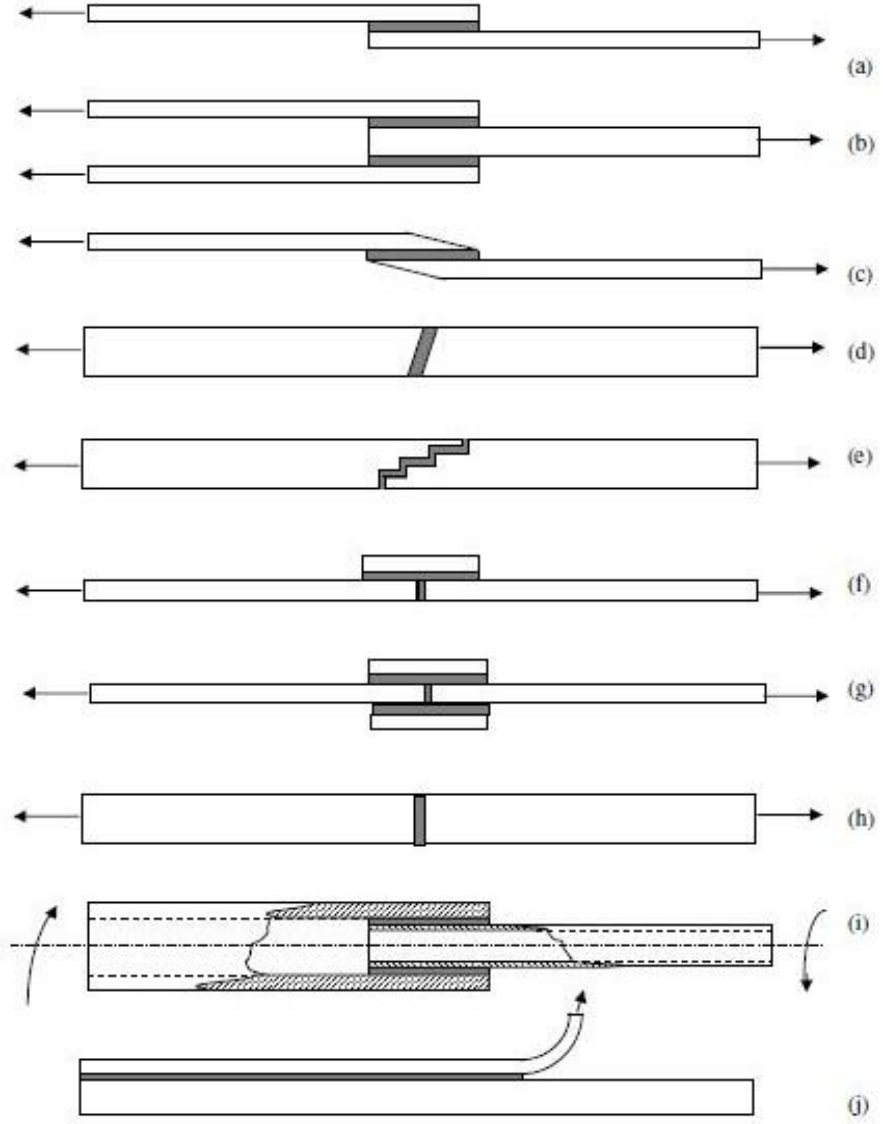


Şekil 1.1 Uygulanan kuvvetin yapışma merkezinden uzak eksenlere etkisi

Yukarıdaki resimde de görüldüğü üzere kuvvet birleşme bölgesinden uzak eksenlere etki etmektedir. Bu durum bağlantı bölgesinde moment oluşmasına neden olmaktadır. Böylece bindirmeli bağlantılarda bağlantı bölgesine istenmeyen yönde kuvvetler etki ederek hasar başlangıç eşiğini aşağı düşürmektedir.

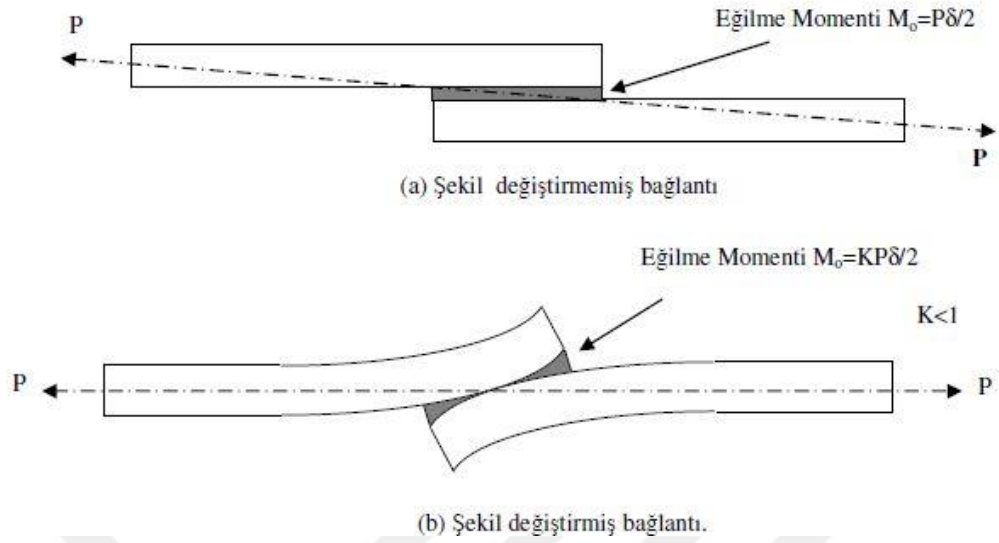
Mühendislik uygulamalarının amacı insan hayatını olumlu yönde etkileyen araç ve gereçlerin üretilmesidir. Böylelikle günlük hayatta çok uzun sürelerde yapılan işlemler kısa sürelerde yapılabilmektedir. Mühendislik çalışmalarının sonucunda elde edilen araç gereçler birçok malzeme ve elemanın bir arada kullanılması ile üretilmektedir. Bu durum ise birleşim elemanları ile sağlanabilmektedir. Araştırma konusunun içeriğini oluşturan yapıştırıcılar da bu elemanlardan birisidir. Yapıştırıcılar birçok alanda farklı şekillerde kullanılmaktadırlar. Her bir yapıştırma türünün kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Mühendislik ise tam bu noktada devreye girerek optimum durumları sağlamaya çalışmaktadır. Yapılan tasarımların estetik, ekonomik ve emniyetli olabilmesi için araştırmalar hız kesmeden devam etmektedir.

Yapıştırıcılar kullanılarak yapılan birçok birleştirme işlemi mevcuttur. Bunların başlıcaları;



Şekil 1.2 (a) Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı **(b)** Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı **(c)** Boyun Bindirme Bağlantısı **(d)** Açılı Bindirme Bağlantısı **(e)** Teraslama Bağlantısı **(f)** Tek Takviyeli Bindirme Bağlantısı **(g)** Çift Takviyeli Bindirme Bağlantısı **(h)** Alın Bağlantısı **(i)** Silindirik Bindirme Bağlantısı **(j)** Soyulma (Adams vd., 1994a, 1997b; Aydın, 2007).

Şekil 1.2 (a)'da gösterilen tek tesirli bindirme bağlantısı en fazla kullanılan yapıştırıcı ile birleştirme tipidir. Kullanılan yapıştırıcıların test edilmesi ve yapıştırıcıların incelenmesi adına en fazla kullanılan yöntemdir. Çalışmanın ana konusunu oluşturan tek tesirli bindirme bağlantılarında gerilme durumu karmaşıktır. Bunun temel sebebi ise uygulanan kuvvetlerin aynı doğrultuda olmamasıdır. Bunun yanı sıra kuvvetlerin birleşiminin yapışma bölgesi ile aynı doğrultuda ve paralel olmaması gerilme durumunu daha da karmaşık yapmaktadır. Bu durum tek tesirli bindirme bağlantılarını çalışma ve araştırmalarda daha fazla kullanılmaya iten sebeplerden birisidir.



Şekil 1.3 Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Kuvvetin Etki Ettiği Doğrultu Ve Sonucunda Oluşan Görünüm (Adams vd., 1994a, 1997b; Aydın, 2007).

Şekil 1.3'te görüldüğü üzere tek tesirli bindirme bağlantısı üzerine etki eden kuvvetler yapışma bölgesinin merkezi ile farklı doğrultudadır. Bu durum sistem üzerinde moment oluşturur. Oluşan moment bir birine tutturulan elemanları dönmeye zorlar bu da yapıştırıcı üzerinde hem kaymadan dolayı hem de yırtılma davranışından dolayı gerilmeler oluşturur. Oluşan bu gerilmeler yapıştırıcı performansını olumsuz yönde etkiler. Bunun sonucunda daha düşük gerilmelerde deformasyon meydana gelir. Tek tesirli bindirme bağlantılarında kullanılan elemanların geometrilerinde değişiklikler yaparak moment değeri azaltılıp yapıştırıcı performansı artırılabilir.

Yapıştırıcı İle Birleştirilen Bağlantıların Avantajları;

Günümüzde kullanılan tüm bağlantı türlerinin diğer bağlantı türlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunabilmektedir. Yapışma bağlantıları için de bu durum söz konusudur. Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantıların diğer bağlantı türlerine göre belirli avantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Uygulaması diğer bağlantı türlerine göre daha kolaydır.
- Parçaların hasarsız bir biçimde birleştirilmesine olanak sağlar.
- Birleştirilecek parçaların üzerinde herhangi bir delik, çentik bulunmadığından veya kaynak türü bir işlem yapılmadığından gerilme yığılması ve malzeme özelliklerinin birleşme bölgesinde değişmesine yol açacak bir durum yaşanmaz.

- Kalın, ince veya farklı kalınlıktaki parçaların birleştirme işlemi kolay bir şekilde yapılabilir.
- Gerilme dağılımı düzgündür ve oluşturulan bağlantılar büyük yükler taşıyabilir.
- Elektrik ve ısı iletimine karşı dayanıklıdır. Dış ortama karşı yalıtım olanağı sağlamaktadır.

Yapıştırıcı İle Birleştirilen Bağlantıların Dezavantajları;

Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantıların avantajları olduğu gibi çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Kullanılan bazı yapıştırıcılar uzun sürelerde sertleşmektedir. Bu durum bağlantının kullanımını geciktirebilmektedir.
- Tahribatsız muayene işlemi kolay değildir ve solventlere karşı dayanıksızlardır.
- Yapıştırıcının performansının etkilenmemesi için yüzey temizliği çok önemlidir.
- Kullanılan yapıştırıcılarda zaman içerisinde sürünme olayı gözlemlenebilir. Bu durum yapıştırıcıların viskoelastik yapısından kaynaklanmaktadır.
- Çalışma sıcaklığına bağlı olarak mukavemette azalma meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet düşmektedir.
- Yapıştırıcıların mekanik özellikleri sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişebilmektedir.
- Soyulma ve darbe dayanımları diğer bağlantı türlerine göre düşüktür.
- Nemli ve kimyasal ortamlar bazı yapıştırıcıların özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum yapıştırıcıların mukavemetini düşürmektedir.
- Çekme ve kayma durumlarında tokluk nispeten düşüktür.

Literatür Taraması;

Yapıştırıcılar günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra belirli kullanım koşulları, avantajları, dezavantajları ve sağladığı kolaylıklar vb. nedenlerden ötürü araştırmalara konu olan birleştirme elemanlarından. Yapıştırıcı ile birleştirilen mekanizmalar yapıştırıcı ve birleştirilen elemanların ne kadar uyumlu olduğuyla, birleştirilen yüzeylerin sürekliliğiyle ve işlemin gerçekleştirildiği ortamın şartlarıyla

alakalı olarak farklı performanslar sergilerler. Bu durum ise yapılan analiz ve çalışmaları güçleştirmektedir. Dolayısıyla yapıştırma mekanizmaları hakkında birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bunların başında, çalışmalarda fazlasıyla kullanılan tek tesirli bindirmeli bağlantılar gelmektedir. Literatürde bu konular hakkında fazlasıyla çalışılmış ve çalışılmaya devam edilmektedir.

Adams ve Peppiat (1974), yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda bağlantı genişliği boyunca, bağlantıyı etkileyen önemli gerilmelerin var olduğunu belirlemiştir. Yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcıya etki eden kayma gerilmelerinin, uygulanan yük doğrultusuna dik yönde olduğunu ve yapıştırılan malzemelerde bu gerilmelere poisson oranının sebep olduğunu dile getirmiştir.

Ojalvo ve Eidinoff (1978), yapıştırıcı kullanılarak birleşimi sağlanan tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığının gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kayma gerilmesinin belirlendiği denklemlerde bazı katsayıları düzenleyerek, birleştirme elemanı olan yapıştırıcıda oluşan soyulma gerilmesi için sınır şartlarında ve diferansiyel denklemlerde yeni terimler elde etmişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı ne kadar ince olursa olsun bundan bağımsız olarak kalınlık boyunca kayma gerilmesi dağılımının hesaplanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra kayma gerilmelerinin birleştirilen malzemeler ve yapıştırıcı ara yüzeyinin uç noktalarında maksimum değere ulaştığını göstermişlerdir.

Sawa vd. (2000), farklı yapıştırıcılar kullanılarak çekme yüküne maruz bırakılan tek tesirli bindirmeli bağlantıları, iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak analiz etmişlerdir. Yapılan sayısal hesaplamalarda kullanılan yapıştırıcılar arasındaki, yapıştırıcı kalınlıklarının oranı, yapıştırıcılar arasındaki young modülü oranı, yapıştırıcı uzunluklarının oranı ve yapıştırıcı kalınlığının arayüzdeki gerilme dağılımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmaların sonucu olarak gerilmelerin, yapışma arayüzünün kenarlarına yakın yerlerde meydana geldiği ve daha küçük young modülüne sahip yapıştırıcılarda tekil gerilme değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığının daha ince olması durumunda da tekil gerilme değerinin arayüz kenarlarında arttığını bununla beraber yapışma arayüzünün üst kısmının alt kısma oranı azaldıkça arayüz kenarlarında tekil gerilme değerinin arttığını dile getirmişlerdir. Yapıştırıcının fazla ince veya kalın olması durumunda da arayüzün kenarlarında tekil gerilme değerinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Özel vd. (2003), tek tesirli bindirme bağlantısında özellikleri farklı olan, farklı iki yapıştırıcı kullanarak, dört noktadan eğilme yüküne maruz bırakılan modeller oluşturup daha sonra sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yaparak elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla ile karşılaştırmışlardır. Yapıştırılan malzeme kalınlığının bağlantı performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir.

Özel vd. (2004), yaptıkları çalışmada, eğilme momentine maruz bırakılan tek tesirli bindirmeli bağlantıların elasto-plastik gerilme analizini, iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelemişlerdir. Farklı mekanik davranışlara sahip, sert ve esnek iki yapıştırıcı ile yapıştırılan sertleştirilmiş çelikten oluşan tek tesirli bindirmeli bağlantıların analizini yapmışlardır. Geometrik parametrelerin tek tesirli bindirmeli bağlantıların performansı üzerindeki etkisini belirlemek için her bir yapıştırıcı için dört farklı yapıştırma kalınlığı ve bindirme uzunluğu kullanmışlardır. Analizin doğruluğunun kontrolü için, sonlu elemanlar analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yapıştırıcı kalınlığının her iki yapıştırıcı ile birleşim mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, tek tesirli bindirmeli bağlantıların esnek yapıştırıcı ile taşıdığı yükün, artan bindirme uzunluğu ile arttığını gözlemlemişlerdir.

Demirgen (2007), gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında galvanizli kromatlanmış mikro alaşımlı çelik sac çiftleri kullanmış daha sonra laboratuvar ortamında sac çiftleri yapıştırmış ve çekme deneyi yapmıştır. Bu işlem sonrasında aynı şartlar sağlanarak ve aynı malzemeler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modeller oluşturulup analizler yapmıştır.

Banea ve Silva (2009), fiber takviyeli plastik kompozit yapıların, yapıştırıcıyla birleştirilmesini konu alan bir araştırma yapmıştır. Fiber takviyeli plastik kompozit yapılar için yüzey hazırlığının, derz konfigürasyonunun, yapıştırıcı özelliklerinin ve çevresel faktörlerin derz davranışı üzerindeki etkilerini kısaca açıklamışlardır. Yapılan çalışmada sayısal yaklaşımlar, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modelleri kapsamaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, bağlantının başarısızlığını tahmin etmek için kullanılan birkaç yöntem açıklamışlardır.

Sayman (2012) yaptığı çalışmada, sünek bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirmeli bağlantıda kesme gerilmesini incelemek için analitik bir elastoplastik gerilme analizi önermiştir.

Yaptığı çalışmada kullandığı yapıştırıcı DP460' dır. Yapıştırıcının akma durumunu incelemek için Von-Misses kriterlerini kullanmıştır. Araştırmanın çözüm kısmında, oluşan kesme gerilmesini yapıştırıcı kalınlığı boyunca sabit kabul etmiştir. Eğilme momentini ise ihmal etmiştir. Sonuçları, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kontrol etmiştir.

Xu ve Wei (2012), yaptıkları çalışmada, çekme yüküne maruz bırakılan tek tesirli bindirmeli bağlantıların arayüz arıza mekanizmalarını ve toplam mukavemetini sistematik olarak incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmış olup yapışkan tabakanın kırılma enerjisi, üst üste binme gibi çeşitli sistem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır.

Bağlantılarda örtüşme uzunluğunun ve yapıştırıcı kırılma enerjisinin, yük taşıma kapasitesi üzerinde birleşik etkilere sahip olduğunu göstermişlerdir. Bunun yanı sıra, yüklerin en yüksek değerlere ulaştığı durumlar göz önünde bulundurularak, yapışkan tabakanın bir ön hasar analizini yapmışlardır. Ayrıca, bağlantılardaki arayüz gerilme analizi ve arayüz kayması dahil bağlantıların arayüz davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, arayüz gerilme dağılımlarının kayma ve dönme açısı ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir.

Ghaffarzadeh (2015), yaptığı çalışmada, dört farklı noktadan eğme yüküne maruz bırakılan tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırıcı uygulama genişliği, malzeme kalınlığı ve uzunluğun ne kadar etkili olduğunu araştırmıştır. Bununla beraber nümerik analizler yaparak tekil noktaların sonlu eleman yoğunluğunu değiştirmiş ve gerilme dağılımlarını incelemiştir. Yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırdığında uyumun fazlası ile iyileştiğini belirtmiştir. Sonuç olarak bahsedilen boyutların bağlantı dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu dile getirmiştir.

Kırkayak (2019), yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantılarda, kayma gerilmesi, gerilme yığılması ve soyulmanın yapı mukavemeti açısından önemini belirtmiştir. Bahsedilen bu durumların etkisini azaltmak adına, tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı geometrik desenler ve farklı iki yapıştırıcının birleştirildikten sonra kullanılmasını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Bunun sonucunda yapılan hibrit modellerde, başlangıç modellerine göre soyulma ve kayma gerilmelerinin azaldığını saptamıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yapışma

Yapışma işlemi, yapıştırıcının kendi içinde ve yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Bu olaylar adhezyon ve kohezyon olaylarıdır (Özenç, 2007).

Adhezyon: Yapıştırıcı ile birleştirilen yüzeyler arasında meydana gelir. İki yüzeyin arayüzey kuvvetleri (Valans Kuvvetleri) tarafından bir arada tutulmasıdır (Özenç, 2007).

Kohezyon: Yapıştırıcının kendi içerisinde meydana gelen olaydır. Yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin kimyasal (monomerler arasındaki bağ kuvvetleri) ve fiziksel kuvvetler (Van der Waals kuvvetleri) tarafından bir arada tutulmasıdır (Özenç, 2007).

2.2. Yapıştırma Bağlantıları

Mühendislikte yapılan tasarımların temelini, tasarımı tüm yönleriyle etkileyecek etkenlerin belirlenebilmesi oluşturmaktadır. Bu duruma örnek verecek olursak yapılan bağlantının üzerine etki eden yük miktarının hesaplanabilirliği, bağlantının kullanılacağı alanlara uygunluğunu belirlemektedir. Bunun yanında yapılan uygulamaların, kullanılacağı mühendislik alanları için optimum şartları sağlaması ve maliyet açısından en uygun çözümleri ortaya koyması mühendisliğin temel amaçlarından biridir.

Yapışma bağlantıları, kullanılacağı bazı mühendislik alanları için yukarıda belirtilen şartları sağlayabilmektedir. Bu nedenle yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri özel olarak tasarlanmalıdır. Gerilme ve yükleri düşünmeksizin yapıştırma bağlantısını tasarlamak hatalı olur (Aydın, 2007). Bağlantı tasarımı genelde iki ana faktöre bağlıdır:

- Çalışma sırasında bağlantının maruz kalacağı kuvvetlerin yönüne (Aydın, 2007),
- Bağlantının oluşturulabilme kolaylığı ise parçaların imalat yöntemine (döküm, taslama vb.) ve kullanılan malzemeye bağlıdır (Aydın, 2007).

Yapıştırma bağlantıları uygun şartlar altında hazırlanarak kullanılan yapıştırıcının çalışma şartlarına uygun bir şekilde yapıldığı takdirde çoğu uygulama için optimum şartları sağlayabilmektedir.

2.2.1 Yapıştırma bağlantılarında yükleme tipleri

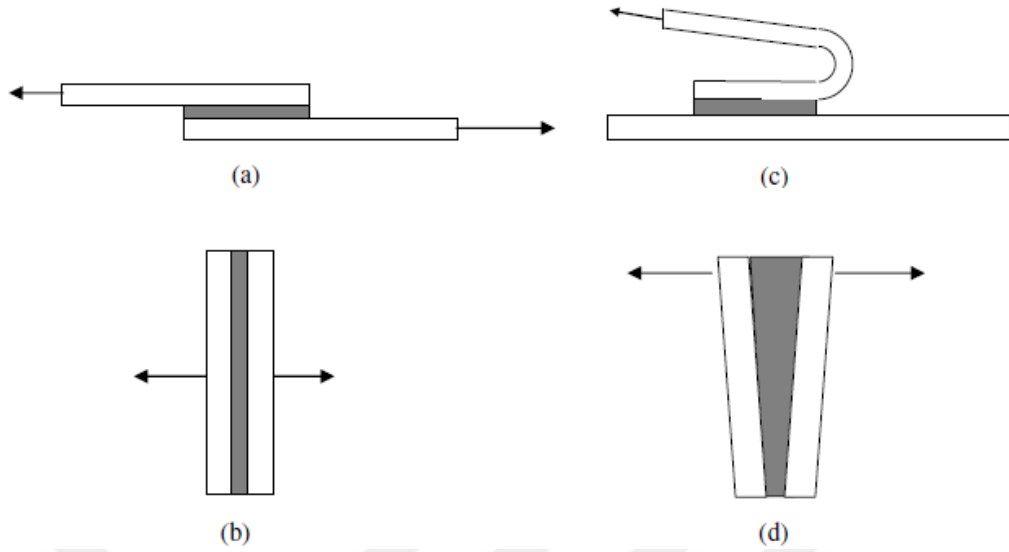
Diğer tüm bağlantı türlerinde olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da, bağlantı üzerine uygulanan yükten veya yüklerden dolayı farklı yükleme tipleri görülmektedir. Bunlar; kesme, soyulma, çekme ve çekme-makaslamadır. Farklı yükleme türleri bağlantıda farklı etkiler göstermektedir. Bu yüklemeler bağlantı üzerinde tek görülebileceği gibi uygulanan yükün çeşitliliğine göre bağlantıda birden fazla yükleme türü de görülebilir. Yapılan bağlantının istenilen performansı gösterebilmesi için bahsedilen yükleme türlerinin etkileri tasarım yapılırken dikkate alınmalıdır.

Çekme: Birleştirilen malzemelerin yapıştırıcı tabakasına, dik olarak etki eden gerilme türüdür. Çekmeden dolayı oluşan gerilme, normal şartlarda yapışma alanına eşit şekilde dağılmaktadır. Fakat bağlantıya etki eden kuvvetler sadece dik olarak etki ederse durum böyledir. Uygulanan kuvvetler farklı şekillerde (eksenden kaçık) etki ederse başka gerilme türleri ortaya çıkar. Bu durum gerilmenin yapışma tabakasına eşit dağılmasını engelleyerek bağlantının deformasyon olasılığını arttırmaktadır.

Kesme: Yapışma tabakasına paralel etki eden kuvvetlerin oluşturduğu gerilme türüdür. Kesme kuvvetinin yapışma bölgesinin tamamına etki etmesi istenir dolayısıyla yapışmanın homojen olması büyük önem taşımaktadır. Homojen bir bağlantı için yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemlerine dikkat edilmesi gerekir. Bu durum bağlantı ömrünü olumlu yönde etkilemektedir. Yapılan bağlantılarda uygulanan yükün çoğunun, bağlantıda kesme yükü olarak iletilmesi istenmektedir.

Soyulma: Yapılan bağlantıda soyulma gerilmelerinin görülebilmesi için birleştirilen malzemelerden bir tanesinin veya daha fazlasının esnek olması gerekmektedir. Soyulma gerilmesini oluşturan yüklemelerde bağlantı bölgesinin soyulma başlangıç sınırında çok yüksek gerilmeler meydana gelir. Yapılan bağlantılarda bu tip gerilmelerden olabildiğince kaçınılmalıdır.

Çekme-Makaslama: Bu tip yükleme, genellikle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucudur. Diğer yüklemelerin aksine bu yükleme, yapışma alanına eşit olmayan şekilde etki etmekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bağlantının bir tarafında yoğunlaşan gerilme büyük değerlere sahiptir. Bu gerilmeyi karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır (Aydın, 2007).



Şekil 2.1 (a) Kesme (b) Çekme (c) Soyulma (d) Çekme-Makaslama (Aydın, 2007)

2.2.2 Yapıştırmayı etkileyen faktörler

Yapılan tüm bağlantılarda olduğu gibi yapıştırıcı ile yapılan bağlantılarda da çevresel veya çevresel olmayan bazı etkenler yapışma mekanizmasını etkilemektedir. Bir yapışma mekanizmasında, yapışmayı etkileyen faktörler tek başlarına bulunabileceği gibi birden fazla etki bir arada görülebilmektedir. Yapıştırıcı özellikleri birbirinden farklı olduğu için bir yapıştırıcıyı etkileyen faktör diğerini etkilemeyebilir. Bu nedenle yapıştırıcı ile bağlantısı yapılan mekanizmalarda bağlantı elemanları kadar dış etkiler de önemlidir. Yapışmayı etkileyen en belirgin faktörler şunlardır;

Basınç: Kullanılan bazı yapıştırıcılar film veya bant halinde uygulanmaktadır. Yapıştırıcılar bu şekilde kullanıldıklarında bulundukları ara yüzeyin şeklini almaları ve yapışmalarını sağlamak amacı ile düşük bir baskı uygulanabilir. Bu durum yapıştırıcıların etkin olmasını ve kısa sürede yapışmanın gerçekleşmesini sağlar (Özenç, 2007).

Zaman: Bağlantılarda kullanılan yapıştırıcıların etkin olabilmeleri için kurumaları gerekmektedir. Kuruma işlemi, yapıştırıcının uygulanması ile başlayıp birkaç saniyeden birkaç güne kadar sürebilir. Yapıştırıcının kuruma süresi basınç ve sıcaklık ile kısaltılabilmektedir.

Sıcaklık: Yapıştırıcılar genel olarak oda sıcaklığında etkin olurlar. Ancak kontrollü yüksek sıcaklıklarla yapıştırıcı daha etkin olur ve yapışma süresi azalır. Çoğu kimyasal

reaksiyonda olduğu gibi sıcaklıkla yapıştırıcı reaksiyon hızında artış olur. Ancak sıcaklığın kontrolü yapılmalıdır. Aksi halde yapıştırıcıyı oluşturan polimerik maddenin bozulması ihtimaliyle karşılaşılır (Özenç, 2007).

Katalizör: Kullanılan bazı yapıştırıcılar kuruyup etkin hale gelebilmek için reaksiyon arttırıcı, hızlandırıcı veya başlatıcı maddelerin varlığına ihtiyaç duyarlar.

Çözücü: Su ve organik esaslı çözücüler kullanılarak hazırlanan yapıştırıcılar, yapışma işlemini, yapışma ortamından çözücü maddenin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta buharlaşarak ayrılması ile sağlar (Aydın, 2007).

2.3 Yapışma Teorileri

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda yapışma mekanizmasının açıklanabilmesi için bazı teoriler ortaya atılmıştır. Farklı bilim insanları farklı teoriler üzerinde çalışmalar yaparak yapışma mekanizmasını açıklamaya çalışmışlardır. Ortaya atılan teorilerden en kapsamlıları dahil hiç biri yapışma mekanizmasını tek başına açıklayamamaktadır. Bu nedenle yapışma mekanizmasının tam olarak anlaşılabilmesi için farklı teorilerden faydalanılabilir. Kullanılan en kapsamlı teorilerden bazıları şunlardır;

2.3.1. Mekanik tutunma teorisi

Mekanik tutunma teorisi, bağlantıda kullanılan yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik olarak birbirine tutturulmasını ifade eder. Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerine sıvı yapıştırıcı sürüldüğünde, sürülen yapıştırıcı malzemede bulunan gözeneklere girerek yapıştırılan elemanlarda mekanik tutunma meydana getirecektir (McBain ve Hopkins, 2002). Yapıştırıcının malzemelerdeki gözeneklere girmesinden dolayı, daha iyi bir yapışma sağlayabilmek adına, yüzey hazırlama işlemi sırasında yüzeyler bilinçli olarak pürüzlendirilebilir. Bu işlemden sonra yüzeydeki yağ ve kirleri temizlemek yapışmanın istenilen seviyede olmasını sağlayacaktır.

2.3.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon maddelerin yoğun ortamdan daha az yoğun ortama hareketi olarak tanımlanabilir. Difüzyon maddenin bütün hallerinde farklı hızlarda gerçekleşmektedir. Bu durum iki farklı yoğunluktaki grubun yoğunlukları birbirine eşitleninceye kadar devam

etmektedir. Difüzyon teorisi ise mekanik tutunma teorsine benzer şekilde işlemektedir. Fakat difüzyon teorisi moleküler seviyelerde meydana gelmektedir (Aydın, 2007).

Voyutskii (1963) tarafından geliştirilen difüzyon teorisi, iki polimer malzemenin birbirleri içine hareketi ile yapışma meydana geleceğini ifade eder. Bir yapıştırıcı, asıl malzeme içerisinde, erimiş halde ve yapıştırıcı katılaşmadan yeterli miktarda karıştığı zaman difüzyon mekanizması oluşur. Asıl malzemelerden en az biri metal olduğu zaman difüzyon teorisi anlamını yitirmiş olur. Fakat difüzyon teorisinden, eritilebilir polimerler için şu sonuç çıkarılabilir; yapışma esnasında difüzyonu artıran faktörler yapışmayı da arttırmaktadır (Parvatareddy, 1997).

2.3.3 Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon teorisi, kullanılan asıl malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi derecede temas sağlanması şartıyla ara yüzeyde atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışmanın meydana geldiğini ileri sürmektedir. Adsorpsiyon teorisi, yapıştırıcı biliminde halen en fazla kabul edilen uygulanabilir yapışma teorisidir (Aydın, 2007).

Adsorpsiyon teorisi Kinloch (1987), Sharpe ve Schorhorn (1963) tarafından geliştirilmiştir. Yapıştırıcı ve asıl malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak iki grupta incelenmektedir. Bunlar; iyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler ile Van der Waals kuvvetleri, dipole-dipole, induced dipole-dipole, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetlerdir (Kinloch, 1987).

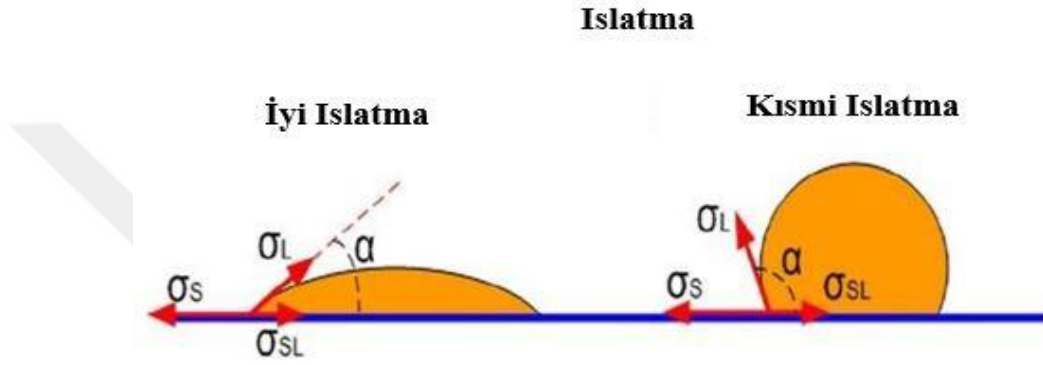
2.3.4. Elektrostatik teorisi

Elektrostatik teorisi, yapışma sırasında yapıştırıcı ve yapıştırılacak olan malzeme yüzeyleri arasında elektrostatik etkiler oluşunu ifade etmektedir. Yapıştırıcı ile asıl malzeme arasındaki elektron transferi, yapışmayı etkin hale getiren bir çekim üretmektedir (Derjaguin ve Smilga, 1967).

Yapışma sırasında yapıştırıcı ve birleştirilecek malzemelerin yüzeyleri arasında elektron transferi meydana gelir. Bu durum sonucunda oluşan çekim kuvveti farklı iki malzemenin yapışmasını sağlar. Oluşan elektrostatik kuvvetler yapışma tabakasında ara yüz oluşturmaktadır. Bu kuvvetler yapıştırılan yüzeyler arasında ayrılmaya karşı direnç oluştururlar.

2.4. Yapıştırıcıda Yüzey Islatma

Yapıştırılacak plakaların yüzeylerinin sıvı yapışkanla ıslatılması, iyi ve güçlü yapışma gerçekleştirilebilmesi için önemlidir. Islanabilirlik, atmosferde katı yüzey içinde kalan damlalardan oluşan bir sistem içindeki kuvvetlerin dengesini göz önüne alarak, verilen bir sıvı damlası yardımıyla ölçülebilir. Sistemin serbest enerjisinin net olarak azalması ile damla yüzeye tamamen yayılır ve yüzeyi ıslatır[18].



Şekil 2.2 Yüzey Islatma Olayı (Fıyouj, 2015)

Yukarıdaki şekil incelendiğinde, iyi bir ıslatma işlemi için gerekli olan ıslatma açısı aralığı görülmektedir. Burada;

$$\sigma_s = \sigma_L \cdot \cos\alpha + \sigma_{SL}$$

$$\cos\alpha = (\sigma_s - \sigma_{SL}) / \sigma_L$$

σ_s = Katı alt-tabakanın yüzey gerilimi

σ_L = Sıvı yapıştırıcı yüzey gerilimi

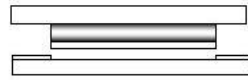
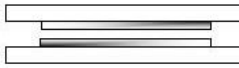
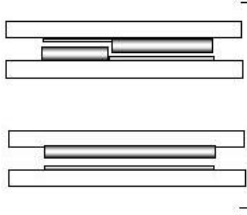
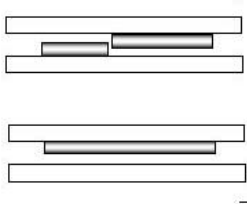
σ_{SL} = Sıvı yapıştırıcı ve katı alt-tabaka arasındaki ara yüzey gerilimi

α = Islatma açısı (Fıyouj, 2015)

Yüzey ıslatma, yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda yapışma işleminin istenilen seviyede olabilmesi için önemlidir. Yüzeyin ıslatılması esnasında, yüzey üzerinde hava kabarcığı, kir ve toz kalması durumunda ıslatma işlemi istenilen düzeyde olmayacaktır. Bu durum yapışma işlemini de etkileyeceğinden bahsedilen etkenlerden kaçınmak gerekmektedir.

2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Türleri

Yapıştırma ile birleştirilen bağlantılarda genel olarak iki çeşit hasar mekanizması bulunmaktadır. Bunlar adezyon ve kohezyon hasarı olarak tanımlanabilir. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcının veya bağlantının mekanik özelliklerinin, farklı yükleme durumlarında tam olarak anlaşılabilmesi için bu hasar mekanizmalarının karakterize edilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde temel hasar tipleri gösterilmiştir.

	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
Yapıştırılan Malzeme	 Yapıştırılan malzemelerin biri veya ikisinde de hasarın oluşması	YH
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı	KYH
	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar	DH
Yapıştırıcı	 Kohezyon hasarı	KH
	 Özel kohezyon hasarı	ÖKH
	 Adhezyon hasarı	AH

Şekil 2.3 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri (TS EN ISO 10365)

2.6. Yapıştırma İşleminde Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda en önemli aşamaların başında, yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanması gelmektedir. Bağlantının sürekliliği ve dayanımının yüksek seviyelerde olması için yüzey temizliği son derece önemlidir. Yüzey temizliği dikkatli bir şekilde yapılmazsa, yüzey üzerinde bulunan kir, toz ve yağ gibi maddeler yapıştırıcının yüzeye tam anlamı ile tutunmasını engelleyerek bağlantıda hasara neden olabilir. Bu gibi durumlarda bağlantıda genelde adezyon hasarı meydana gelir. Bunun dışında iyi temizlenmiş ve iyi hazırlanmış yüzeylerde kopmalar genelde yapıştırıcının kohezyon kuvvetinin aşılması durumunda meydana gelmektedir.

Yüzey hazırlama işlemi uzun süreli dayanım ve bağlantının sürekliliği için çok önemlidir. Basit yüzey hazırlama yöntemleri bazı metallerde iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanım elde etmek için yeterli olmayabilir (Aydın, 2003).

2.6.1. Yapıştırmada yüzey hazırlama yöntemleri

Yapıştırma işleminin istenilen düzeylerde olabilmesi için yüzeylerin hazırlığı çok önemlidir. Plastik ve elastomerler yüzey hazırlama işlemine metallerden daha çok bağımlıdır (Can, 2016). Bağlantılarda, yüzey hazırlama yöntemlerinin seçimine yönelik dikkat edilmesi gereken etkenler şöyledir;

- Bağlantının kullanılacağı çevre,
- Bağlantının sürekliliği,
- Bağlantı dayanımı,
- Yapıştırılacak malzemelerin özellikleri,
- Yapıştırılacak malzeme üzerindeki kirletici maddelerin miktarı ve türü.

Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda, yukarıda verilen etkenler dikkate alınarak yüzey hazırlama yöntemleri uygulanabilir. Yüzey hazırlama yöntemleri tek başına veya beraber uygulanabilir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan arındırılması: Güçlü ve uzun ömürlü yapışma için yapıştırılacak yüzeyden gres, yağ, toz ve diğer kalıntıların temizlenmesi gerekmektedir. Yüzey temizliğinde kalıntı bırakmadan buharlaşan çözeltilerin kullanılması uygundur (Can, 2016).

Mekanik Aşındırma: Yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantılarda yüzey pürüzlülüğünün önemi son derece fazladır. Yüzeylerin temizliğini yapmak için zımparalama önemli bir yöntemdir. Fakat zımparalama yaparken yapışma teorileri göz önünde bulundurulmalıdır. Bağlantı dayanımı genellikle yüzey pürüzlülüğünün derecesine bağlıdır. Farklı metaller için farklı zımpara boyutları aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.1 Farklı Metaller İçin Tavsiye Edilen Aşındırıcı Boyutları (Can, 2016)

Çelik	Kuru Zımparalama	80-100 mesh
Paslanmaz Çelik	Islak Zımparalama	140-325 mesh
Alüminyum	Islak Zımparalama	140-325 mesh
Pirinç	Islak Zımparalama	140-325 mesh

Kimyasal Ön İşlem: Yüzey hazırlama yöntemleri içerisinde en etkili olanı kimyasal kullanılarak yapılan ön işlemlerdir. Bu yöntem kullanılarak yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişimler meydana getirilir. Böylece yapışma için yüzeyin uygunluğu artırılır. Bu yöntemde yüzeyi aşındırıcı çözeltiler kullanılmaktadır. Ancak diğer yöntemlere göre maliyeti daha fazla olduğu için kullanımı kısıtlıdır.

2.7. Yapıştırıcı Çeşitleri

Günümüzde yapıştırıcılar, bağlantılar için önemli bir role sahiptir. Yapıştırıcı, birleştirilecek olan malzemeleri bir arada tutan eleman olarak tanımlanabilir. Yapıştırıcılar kullanıma hazır farklı fiziksel özelliklerde bulunabilirler (sıvı, katı, macun, bant, pasta vb.).

Sıvı ve pasta şeklinde olan yapıştırıcılar, uygulaması rahat olduğu için diğer şekildeki yapıştırıcılara göre daha çok kullanılır ve tek ya da iki bileşenli şeklinde bulunabilir. İki bileşenli olanlar ortam şartlarında sertleşir, tek bileşenli olanlar ise ısı ile sertleşir (Kılık, 1987).

Bağlantılarda yapıştırıcıların uygunluğu çok kritiktir. Bu nedenle yapıştırıcı seçimi, bağlantının istenilen düzeyde dayanıklı olabilmesi için önemlidir. Yapıştırıcı seçilirken bazı durumlara dikkat edilmelidir. Bunlar;

- Yapıştırma gücü, yapıştırıcının gevrekliği veya esnekliği

- Yapıştırılacak olan malzemenin türü, Bozunabilirlik
- Bağlantının kullanılacağı çevre koşulları
- Yapıştırıcının etken olması için gereken koşullar.

2.7.1. Yapıştırıcıların sınıflandırılması

Yapıştırıcı formüllerinde kullanılan maddelerin fazlalığı ve çeşitliliği farklı özelliklere sahip yapıştırıcıların formüle edilmesini sağlamakta ve ayrıca yapıştırıcıların sınıflandırılmasını zorlaştırmaktadır. Buna rağmen, yapıştırıcının seçimini ve kullanımını kolaylaştırmak maksadıyla çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır.

2.7.1.1. Kimyasal durumlarına göre yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar, bağlantıyı sağlamak için yüzeylere uygulandıklarında kimyasal reaksiyona girerek sertleşirler ve yapışma işlemini gerçekleştirirler. Bu yapıştırıcılar en etkili yapıştırıcı türleridir. Günümüzde kullanılan çeşitleri aşağıda verilmiştir.

Epoksiler

Bir bileşeni olan epoksilerin kürleşmesi için yüksek sıcaklık gerekirken, iki bileşenli epoksiler için oda sıcaklığı yeterli olmaktadır (Çalık, 2008). Epoksiler yüzeylere uygulandıktan belli bir süre sonra sıvı halden katı hale geçer ve bir kaç hafta içinde kürleşmesi tamamlanır. Epoksi reçineler kendi başlarına kullanılmazlar, formülasyona katılan başka maddelerle polimerize olarak değişik özelliklere sahip termoset yapıda plastik madde meydana getirirler. Sertleştiriciler, polimerizasyon için ya katalizör ya da çapraz bağlama bileşimidir (Can, 2016).

Akrilikler

Akrilikler hem metal hem de plastik yüzeylere uygulanabilen soyulma mukavemeti yüksek yapıştırıcılardır (Aydın, 2007). Bu yapıştırıcılar, yüzey hazırlama işlemlerinden dolayı oluşan kusurların etkilerini azaltabilecek kimyasal yapıya sahiplerdir. Akrilikler nemli ortamlara karşı dirençlidir ve nemden dolayı yapılarında bozulma meydana gelmez. Bununla beraber akrilikler yanıcı olduğu için yüksek sıcaklıklarda kullanımı uygun değildir. Akrilikler iki bileşenli yapıştırıcılardır (Özenç, 2007). Yüksek mukavemet ve sertlik istenen yerlerde kullanılırlar.

Poliüretanlar

Poliüretanlar tek veya iki bileşenlidir aynı zamanda hızlı sertleşen yapıştırıcılardır (Özenç, 2007). Tek bileşenli olan poliüretanlar, yüzeyde bulunan nem ile reaksiyona girerek, çift bileşenli olanlar ise aktivatör yardımı ile etkin hale gelirler. İyi derecede kohezyon dayanımı ve darbe mukavemetine sahiptirler. Aşınmaya karşı dirençleri yüksek olmasına rağmen nem dayanıklılığı düşüktür.

Poliüretanlarda kürleşme esnasında boyut değişiminden dolayı artık gerilmeler pek oluşmaz (Aydın, 2007). Poliüretanlar, düşük sıcaklıklarda genellikle, epoksi reçinelerden daha iyi mukavemet ve tokluga sahiptirler. Yüksek katılık ve elastik özelliği gösterirler. Bu özelliklerin yanında, toksik özelliklere sahip oldukları için bileşimlerine çıplak elle dokunulduğu zaman tehlikeli olabilirler (Aydın, 2007).

Anaerobikler

Anaerobikler tek bileşenli olmakla beraber oda sıcaklığında kürleşen yapıştırıcı türlerindendir (Özenç, 2007). Uygulanması en kolay olan yapıştırıcılardandır. Genelde sızdırmazlık için kullanılır. Bu yapıştırıcının kürleştiği ortamda oksijen olmaması gerekmektedir. Bu nedenle yüzeylere uygulandıktan hemen sonra oksijen ile bağlantısının kesilmesi gerekmektedir (Aydın, 2007).

Nem ve çözelti direnci yüksek yapıştırıcı türlerindendir. Farklı türde birçok malzemeyi yapıştırmak için kullanılabilirler. Tutuşabilir ve toksiktir, bu nedenle uygulanırken dikkat edilmesi gerekmektedir.

Siyanoakrilikler

Uygulaması kolay ve yapışmanın çok hızlı olduğu yapıştırıcı türüdür. Japon yapıştırıcısı olarak da bilinir. Yapıştırılacak olan yüzeylerde bulunan nem ile reaksiyona girerek kürleşir. Darbe dayanımları düşük olmakla beraber nem ve çözeltilere karşı dayanıksızlardır. Yapıştırma işleminden önce iyi yüzey temizliği gerekmektedir (Aydın, 2007). Diğer yapıştırıcılara göre pahalıdır (Özenç, 2007).

Siyanoakriliklerin en önemli avantajı ise farklı malzemeleri birbiri ile yapıştırabilmesidir. Plastikleri diğer malzemelerle yapıştırma özelliğine sahiptir. Hızlı sertleştiği için, dikkat edilmesi gerekmektedir (Aydın, 2007).

Silikonlar

Silikonlar sınırlı koheziv dayanıma sahiptirler. Buna rağmen -60 °C'den 370 °C sıcaklık aralığında çalışma şartlarına sahiptir. Zincir yapısı çok esnek olup iyi soyulma mukavemeti gösterir. Metal, cam, lastik ve plastiklerin yapıştırılmasında ve mikro elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber kısmen pahalıdır (Aydın, 2007).

Fenolikler

Fenolikler düşük sıcaklıkta gevrek bir yapıya sahiptir. Bununla beraber yüksek sıcaklıklar uygulanarak kürleşmesi sağlanır. Çevresel faktörlere dayanıklıdır. Genelde ahşap malzemelerin yapıştırılması için kullanılır (Aydın, 2007).

Modifiye Edilmiş Fenolikler

Fenol Formaldehit esaslı bir yapıştırıcıdır. Modifiye Edilmiş Fenolikler yüksek mukavemet sağlayan yapıştırıcı türüdür. Darbe dayanımına karşı dayanıklı olmasına rağmen nem direnci düşüktür. Metal-metal, metal-kompozit ve ahşap-metal türü malzemelerin yapıştırılması için uygundur (Özenç, 2007). Kürleşmesi için basınç ve sıcaklık gerekmektedir. Kesme gerilmelerine karşı yüksek mukavemet değeri gösterirler.

2.7.1.2. Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar

Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcı türleri kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara göre daha az dayanım sağlamaktadırlar. Bu yapıştırıcılar yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak da tanımlanabilmektedir. Endüstride geniş kullanım alanına sahiptir. Bahsedilen yapıştırıcı türünün en çok bilinen çeşitleri aşağıdaki gibidir.

Kauçuk Yapıştırıcılar

Yüke maruz kalan bağlantılar için uygun değildir. Ortamda bulunan nemin bağlantıdan uzaklaşması ile kürleşirler.

Polivinil Asetatlar (PVA)

Sanayide kullanım alanları çok geniştir. Suda çözünebilir yapıda sentetik polimerdir. Lateks boya, kağıt kaplamalarında, saç spreylерinde, şampuan ve yapıştırıcılarda inceltici

ve yapıştırıcı olarak, PET şişelerde karbondioksit bariyeri olarak, gıda endüstrisinde bağlayıcı ve kaplama etkeni olarak kullanılır (Baylak, 2017).

Sıcak Eriyikler

Bu yapıştırıcıların kullanımı, parçalar arasındaki yükü taşımak için artarak devam etmektedir. Hafif yüklere maruz yapışma modellerinde hızlıca birleştirmek için kullanılır (Baylak, 2017).

2.7.1.3. Formlarına göre yapıştırıcılar

Bağlantılarda kullanılan yapıştırıcılar, yüzeylere uygulandıkları formlara göre de sınıflandırılabilirler. Formlarına göre sınıflandırılan bazı yapıştırıcıları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Macun Tipi Yapıştırıcılar

Macun tipi yapıştırıcılar genelde kompozit ve metal yüzeyleri birleştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında kürleşme özelliğine sahip yapıştırıcılardır. Viskozitesi yüksek olan türleri yüksek mukavemet değeri sağlar. Belirli bir süre sonra sürünme oluşacağından düşey yüzeylerde kullanımı tercih edilmez (Baylak, 2017).

Film Tipi Yapıştırıcılar

Film tipi yapıştırıcılar metal ve kompozit malzemelerin yapıştırılmasında veya yapıştırılmasına yardım etmesi için kullanılan yapıştırıcılardır. Çok geniş bir yapışma alanına sahiplerdir (Baylak, 2017). Isıl dirençleri nispeten yüksektir.

Sıvı Yapıştırıcılar

Yapışmada optimizasyon, sertleşme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilebilir. Kompozit üretiminde kumaşların emdirilmesi için kullanılır. İki parçalı ve düşük viskozitelidirler (Baylak, 2017).

Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar

Epoksi reçine esaslı yapıştırıcılardır. Oda sıcaklığında kürleşme özelliği gösterirler. Kürleşme esnasında köpürme ve genişleme görülmez.

2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi (ANSYS)

Sonlu elemanlar yöntemi "parçadan bütüne gitme" prensibine dayanmaktadır. Sonlu eleman; iki ya da üç boyutlu yapıların bir parçası veya bir bölgesidir. Bu yöntemin ilk ve en geniş uygulama alanı "gerilme analizleri"dir. Günümüzde ısı analizi, akışkan analizi, piezoelektrik analizi, elektrik analizi vb. alanlarda da kullanılmıştır (Güler ve Sadri 2015).

Sonlu elemanlar gerilme analizinde, gerçek geometrik cismin tam olarak formüle edilmesinin güçlüğünden dolayı, bilgisayarda hesaplanması kolay olan elemanlardan oluşturulmaktadır. Daha sonra bilinen fizik kurallarının hepsi daha basit geometriye sahip olan bu küçük elemanların her birine uygulanmaktadır. Bütün cismin elemanlara bölünebilmesi için bir ağ yapısı gerekmektedir. Cismin boyutuna ve geometrisine uygun olarak seçilmiş elemanlara bölünmüş haline sayısal model denilmektedir. Sayısal modeli oluşturan elemanların birbirlerine temas ettiği yüzeylerde düğüm noktaları oluşturulmaktadır. Mümkün olduğunca çok sayıda eleman kullanmak, kuvvet dağılımının daha duyarlı ölçülebilmesi açısından önemlidir. Belirli bir başlangıç noktasına göre tüm düğümlerin x, y, z eksenleri üstündeki koordinatları saptanarak bilgisayara aktarılmaktadır. Ayrıca, geometrik şekli oluşturan tüm elemanların malzeme özelliklerini belirleyen, poisson oranı ve elastisite modülü değerleri bilgisayar programına tanıtılmaktadır. Oluşturulan matematik modelde, düğüm noktalarına dışarıdan en basit dış etken ve sınır şartlarının uygulanmasıyla meydana gelen değişiklik durumları için matrisler oluşmakta, bu matrisler bilgisayar yardımıyla çözülmektedir. Bu yolla her bir elemandaki ve dolayısıyla elemanların oluşturdukları cismin tamamındaki gerilme ve şekil değiştirmeler elde edilmektedir (Güler ve Sadri 2015).

Sonlu elemanlar gerilme analizi ile problemlerin çözülmesi için bilgisayara verilmesi gerekli olan bilgiler şunlardır (Güler ve Sadri 2015).

- Cismin geometrik modeli,
- Başlangıç, sınır ve yükleme koşulları,
- Elemanların poisson oranı ve elastisite modülü değerleri,
- Yapılacak olan analizin tipi.

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan en önemli yazılımlardan birisi de ANSYS programıdır. Bu program, model üzerinde analiz yapılırken, en yüksek von-mises

gerilmesinin elde edilmesine izin verdiği gibi gerilmelerin yoğunlaşmasını, bulunduğu yerleri ve sebep olduğu yer değişikliklerinin grafiksel olarak gösterilmesini de sağlamaktadır (Güler ve Sadri 2015).

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin daha basit ve kısa zamanda çözülmesi için bu problemlere eş değer, ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözümüne gidilmesi sonlu elemanlar yönteminin temelini oluşturan ana fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar yönteminin bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problemin istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçları elde edilmektedir (Güler ve Sadri 2015).

Sonlu elemanlar yönteminde, çözüm bölgesi çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsinde çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerinin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (Güler ve Sadri 2015).

Elastik ve sürekli ortamlara sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında yapının parçalara ayrılması, uygun bir interpolasyon seçimi, direngenlik matrisinin $[K]$ ve yük vektörlerinin, eleman denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerinin elde edilmesi, bilinmeyen düğümsel yer değişimleri için çözüm yöntemlerinin kullanılması ve sonuçların bulunması adımları uygulanır (Güler ve Sadri 2015).

2.8.1. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan eleman tipleri

Üç Boyutlu Kiriş Eleman: Üç boyutlu kiriş elemanı genel amaçlı bir sonlu eleman tipi olup 3 boyutlu işlemi yapabilme özelliğine sahiptir. Eleman uzayda iki adet nod ile tarif edilmektedir. Üçüncü bir nod ise serbestlik derecesine haiz olmayan ve eleman koordinat sistemini tarif etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elemanın her iki ucunu tespit eden iki adet nod için 12 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Her bir nod 3 adet öteleme ve 3 adet dönme serbestliğine sahiptir. Eleman herhangi bir doğrultuda gelen kuvvet ve herhangi bir eksen etrafında dönme zorlamasına direnç gösterecek özelliğe sahiptir. Elemanı tarif etmek için nodların koordinatına, elastisite modülüne (E), kayma modülüne (G), kesit alanına, kesit atalet momenti değerlerine, burulma sabitine (J) ve kiriş eksenine dik doğrultudaki deformasyon faktörlerine ihtiyaç vardır (Güler ve Sadri 2015).

Sabit Gerilmeli Üçgen Eleman (SGU): SGU elemanı sabit kalınlığı olan, üç nod noktasını birleştiren ve toplam altı serbestlik derecesi ile tarif edilen bir elemandır. SGU elemanı sonlu eleman modellerinde küçük gerilme gradyeni karakteristiğine sahip bölgelerde iyi sonuç verecektir. Diğer durumlarda SGU elemanının kullanılması iyi sonuç vermeyecektir. Örneğin eğilmeye maruz bir yapıyı SGU elemanlarıyla modellemek gerçek problem ile uyumsuz sonuçlar verecektir. SGU elemanlarının bu olumsuzlukları daha sık bir eleman ağ yapısıyla kısmen giderilebilir (Güler ve Sadri 2015).

Lineer Gerilmeli Üçgen Eleman(LGU): LGU elemanları SGU tip elemanların aksine, köşe noktalarına ilaveten kenar orta noktalarında birer adet daha nod noktasına sahiptir. Böylece her bir LGU elemanı 6 adet nod noktasına ve toplam olarak 12 nod serbestlik derecesine sahiptir.

SGU elemanının aksine gerilme büyüklüğü LGU elemanı içerisinde x ve y koordinatları ile lineer olarak değişmektedir. Sadece eğilmeye maruz yapılar için LGU elemanlarıyla yapılan modellemelerde, deplasman (yer değiştirme) ve gerilme alanları için çok iyi yaklaşımlar elde edilecektir (Güler ve Sadri 2015).

Kabuk Eleman: Bir kabuk eleman membran ve eğilme etkisini aynı anda temsil edebilmelidir. Örneğin dört nodlu basit bir dörtgen eleman tarif edilebilir. Elemanı tarif eden tüm nodlar aynı düzlem üzerinde olmayabilir. Bu da elemanda çarpılmaya neden olur. Elemanın çarpılması performansını olumsuz yönde etkiler.

Ticari paket programlarda küçük miktarlarda çarpılmaya müsaade edilmektedir. Bu dört nodlu elemanın en büyük avantajı formülasyonunun basit olmasıdır. Genellikle az sayıda daha karışık bir eleman tipi kullanılması yerine daha fazla sayıda basit bir eleman tipi kullanılması tavsiye edilmektedir.

Dört kabuk elemanın en büyük dezavantajı düzgün eğrisel yüzeylerin düzlem elemanlarla veya az miktarda çarpılmış şekle sahip olan elemanla temsil edilmesidir. Kabuk teorisine dayanarak elde edilen eğrisel yüzeyli elemanlar düzlemsel elemanların yaratmış olduğu problemleri ortadan kaldırmaktadır. Fakat diğer yandan beraberinde başka zorlukları getirmektedir. Eğrisel elemanı tarif etmek için çok daha fazla geometrik bilgiye ihtiyacımız olmaktadır. Elemanın formülasyonu ise düzlemsel elemanlara nazaran çok daha zordur (Güler ve Sadri 2015).

2.8.2. Sonlu elemanlar yönteminin faydaları

Sonlu elemanlar yönteminin faydalarını daha iyi anlatabilmek için örnek verilecek olursa, gerçek hayatta bir bisiklet tasarlarken üretilcek bisikletlerin her biri için prototip modeller imal edip testlerinin yapılması gerekir. Tasarımda yapılacak her bir değişiklikte de tüm testlerin tekrar edilmesi gerekir. Bu da maliyet, işçilik ve zaman demektir. Oysaki bilgisayarda tek bir sonlu eleman modeliyle istediğiniz kadar test yapabilirsiniz, böylece maliyet, işçilik ve zamandan tasarruf edilecektir. Belki burada bisiklet örneği basit bir örnek ve ekonomik olmayabilir fakat bu tür programlar daha çok otomotiv sanayi, uçak/uzay sanayi, savunma sanayi, makine sanayi gibi kompleks ve maliyeti oldukça yüksek makineler üreten sanayilerde kaçınılmaz olarak kullanılmaktadır. Çünkü bir uçağın üretim maliyetini ve bunun test maliyetini düşündüğünüzde, bu testlerin bilgisayar ortamında yapılmasının avantajları saymakla bitmez (Güler ve Sadri 2015).

2.8.3. Sonlu elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları;

- Uygulaması verimlidir. Deneysel olarak yapılan çalışmalara kıyasla çok fazla maliyetsiz tekrar yapılabilir.
- Düzensiz ve kompleks geometrilerin analizi yapılabilir.
- Farklı sınır şartlarının probleme dahil edilmesine izin verir.
- Çok sayıda problemin çözümü için aynı model tekrar tekrar kullanılabilir.
- Farklı uygulamalara kolayca entegre edilebilir. Uygulamalarda oluşturulan modeller sisteme dahil edilebilir.

Sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları;

- Daha kesin sonuçlar, daha küçük eleman boyutları ile elde edilecektir. Eleman boyutlarının küçülmesi ise daha büyük bilgisayar hafızası gerektirir. Buna göre bilgisayar hafızasının sınırlı oluşu çözümün hassasiyetine bir sınırlama getirecektir (Güler ve Sadri 2015).
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan esas teori kadar doğrudur. Malzemenin fiziksel verilerinin ve eleman verilerinin temininde ve bilgisayara yüklenmesinde yapılan hatalar sonuca olumsuz yönde etki edecektir.

2.8.4. Cohesive bölge modeli (CZM)

Bindirmeli yapıştırma bağlantılarında mühendislik uygulamalarının emniyetli bir şekilde kullanılabilmesi için malzemelerin mekanik özelliklerinin iyi analiz edilmesi çok önemlidir. Yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi farklı özellikteki malzemelerin birleşmesi oluşturulan yapılarda, arayüz boyunca kırılma ve delemantasyon olayları sıklıkla görülmektedir. Bu durum oluşturulan yapıların dayanımını sınırlamada önemli bir rol oynamaktadır (Saraç, 2021).

Ara yüzde oluşan ayrılma geleneksel kırılma mekaniği yöntemleri kullanılarak modellenenmektedir. Fakat son yıllarda, geleneksel kırılma mekaniği tekniğine alternatif olarak, ara yüzeydeki çekme-ayrılma (traction-seperation) ilişkilerini benimseyerek kırılma mekanizmasını doğrudan devreye sokan kohezif bölge modeli tekniği (CZM) kullanılmaya başlandı. Kohezif bölge modelinde (CZM), gerilme-şekil değiştirme eğrisinin en üst noktasına kadar elastik davranış gösterdiği ve eğrinin tepe noktasından itibaren hasar başlayarak kopma meydana geldiği ifade edilmektedir. Bunun sonucunda, ara yüz ayrılması için gereken enerji olan kritik kırılma enerjisi kavramı ortaya çıkmıştır (Çitil, 2019).

Klasik sonlu elemanlar yöntemi ile kıyaslandığında, ara yüzey ve malzeme özellikleri dikkate alınarak oluşturulan farklı şekillerdeki kohezyon yasalarının kullanılmasıyla, CZM yönteminde daha doğru dayanım tahminleri yapılabilir. CZM yönteminde aynı malzeme içerisinde ve farklı malzemelerin ara yüzeylerinde hasar büyümesini simüle etmek mümkündür. Malzemelerin ara yüzeyleri, ara yüz elemanları veya kontak elemanları ile temsil edilmekte ve ara yüz davranışını karakterize etmek için CZM modeli kullanılmaktadır (Saraç, 2021).

Yapıştırma bağlantılarının CZM kullanılarak modellenmesinde, genel olarak yapıştırıcı ara tabakası bir bütün olarak ele alınır. İnce yapıştırıcı tabakanın yerini bir dizi ara yüz veya kontak elemanı alır. Yapıştırıcı tabakası bir yüzey olarak modellenir. Bu yöntem ince yapıştırıcı tabakaya sahip yapıştırma bağlantılarının kırılma davranışının incelenmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Tüm olumlu yönlerine rağmen bu yöntemde de bazı sınırlamalar vardır. Kohezif dayanım, yapıştırıcı tabakasının elastoplastik davranışından etkilenmektedir. Yapıştırıcı

tabakası bir yüzey olarak ele alındığında, yapıştırma bağlantısına uygulanan zorlama etkisiyle yapıştırıcı tabakasının elasto-plastik davranışı dikkate alınmamaktadır. Kohezif bölge modeli parametreleri, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlıklarına bağımlı olduğu yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Dolayısıyla, tüm ince ara katmanı bir ara yüz olarak modellemek yerine, yapıştırıcı katmanın bir elastoplastik süreklilik olarak modellenmesi önerilmektedir.

Yapılan çalışmada CZM'in uygulanabilmesi için yapıştırılacak olan malzemelerin mekanik özellikleri ve yapıştırıcının CZM parametrelerinin kullanılan programa tanıtılması gerekmektedir.

CZM analizinde, kırılma enerjisi yüke ve yer değiştirmeye bağlı olduğu için, tek tesirli bindirme bağlantıları bindirme uçlarındaki kırılma enerjisi yapıştırıcının kırılma enerjisine ulaştığında hasar oluşumu başlar. Hasar oluşumu, yüzeylerin birbirinden ayrılması şeklinde kendini gösterir (Saraç, 2021). Uygulanan sınır şartlarına bağlı olarak tamamen ayrılma gerçekleşinceye kadar hasar ilerler. CZM uygulanmadan yapılan analizde ise bindirme uçlarında ayrılma gerçekleşmez, sadece deplasman meydana gelir.

Tek tesirli bindirme bağlantılarında yapılan çekme deneylerinde, bağlantının hasar durumu incelendiğinde ilk olarak, bindirme uç bölgelerinde oluşan yüksek gerilme yığılmalarının etkisiyle ayrılmalar net olarak gözlemlenmektedir. Bindirme uç kısımlarında ayrılmaların oluşmasından kısa bir süre sonra bağlantı tamamen hasara uğramaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ve sayısal analizler incelendiğinde CZM uygulanan modellerin bindirme uç bölgelerindeki davranışının deneysel çalışmalar ile direkt olarak uyumlu olduğu görülmektedir (Saraç, 2021).

Yapıştırma bağlantılarının sayısal analizinde; CZM yönteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda gerilme ve strain enerji dağılımları değişiklik göstermektedir. Bağlantıların sayısal analizinde, CZM yönteminin kullanılmasının, fiziksel probleme daha uygun olduğu, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler arasındaki ayrılmaların daha gerçekçi simüle edilebildiği gösterilmiştir (Saraç, 2021).

CZM'nin kullanımı, yapılan araştırmanın istenilen sonuca ulaşabilmesi açısından önemlidir. Yapılan modellerin daha gerçekçi oluşturulmasını ve dolayısıyla daha yaklaşık sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Yapıştırılan Malzemeler

3.1.1. 50CrV4 (Yay Çeliği)

Yay çeliği olarak bilenen 50CrV4 yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet istenen parçalar için kullanılan bir çelik türüdür. Kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- El aletleri, elektrik, elektronik
- Tekstil ve endüstriyel yaylar
- Tarım aletleri, pullar
- Otomotiv, gemi, asansör, inşaat
- Savunma sanayi (Fıyouj, 2015).

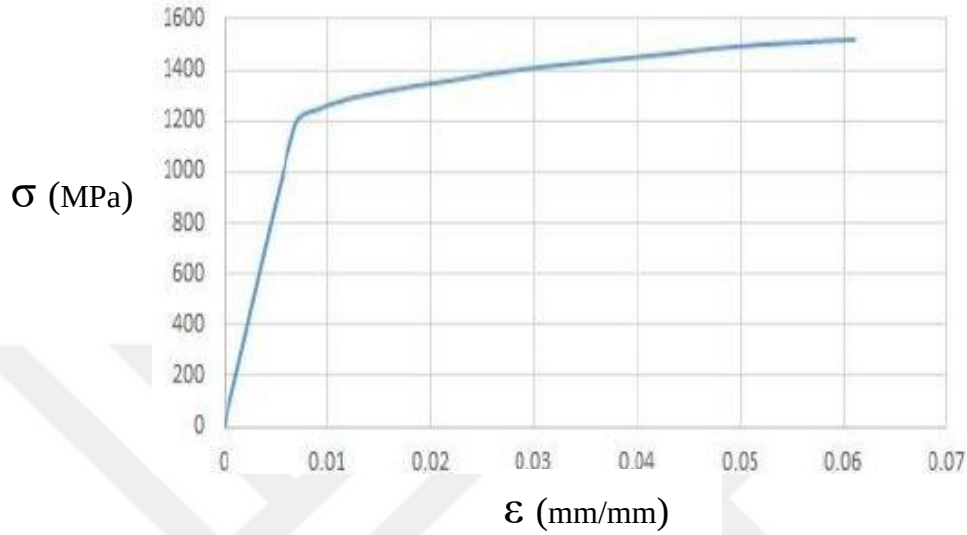
Çeliklerin kullanım alanlarını, dayanımlarını ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktör kimyasal kompozisyonlarıdır. 50CrV4 (Yay Çeliği) kimyasal kompozisyonu aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1 50CrV4 (Yay Çeliği)'un Kimyasal Kompozisyonu (Karaoğlu, 2004)

C	0.52
Si	0.23
Mn	0.95
S	0.03
P	0.02
Cr	1.02
Ni	0.05
Al	0.03
V	0.13

Yay çeliklerinin birçok kullanım alanı olduğu için malzeme özellikleri önem taşımaktadır. Çelik elde edildikten sonra üzerinde yapılabilecek işlemlerin sayısının artması kullanım alanlarını da arttırmaktadır. 50CrV4 ısıtıl işlemlerden sonra yaylanma özelliği kazanır. Şekillendirildikten sonra ısıtıl işlemler uygulanarak istenilen sertlik değerine ulaşır (Fıyouj, 2015).

50CrV4 mekanik özellikleri kullanım alanlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Aşağıdaki şekilde 50CrV4 gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı, tabloda ise mekanik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3.1 50CrV4 Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı (Fıyouj, 2015)

Tablo 2.2. 50CrV4 Mekanik Özellikleri (Fıyouj, 2015)

Akma Sınırı (Re)	min 1175 MPa
Çekme Dayanımı	1370-1620 MPa
Kopma Uzaması	9-13
Kesit Daralması	40-50
Çentik Darbe	35
Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı	1100-850 °C
Yumuşak Tavlama Sıcaklığı	680-720 °C
Yumuşak Tavlama Sertlik	235
Normal Tavlama Sıcaklığı	840-880 °C
Meneviş Sıcaklığı	540-680 °C
Elastisite Modülü	172 GPa
Poisson Oranı	0.3

Çeliğin kalitesini etkileyen birden fazla değişken bulunmaktadır. Bunlar; kimyasal bileşim, iç temizlik, yüzey kalitesi ve mikro yapı olarak sınıflandırılabilir.

3.1.2. Alüminyum alaşımı (AA2024-T3)

AA2024-T3 günümüzde yaygın olarak kullanılan bir alüminyum alaşımı türüdür. Hafifliği, fiziksel ve mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yüksek korozyon dayanımı sağlaması yaygın kullanılmasının en büyük nedenlerindendir. Kullanılmadan önce, depolama ve taşıma esnasında daha sonrasında ise kullanım aşamalarında çubuk, boru, levha ve profil şeklinde bulunabilir.

Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan cıvata, kaynak ve perçin gibi elemanlar, yapılan bağlantılarında bazı dezavantajlar oluşturmaktadır. Perçin ve cıvata için önceden açılan delikler alüminyumun yük taşıma kapasitesini düşürmektedir. Bununla birlikte alüminyuma uygulanan kaynak işlemi çeliklere oranla daha zor bir uygulamadır. Yüksek sıcaklık kaynak yapılan bölgenin özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle yapıştırma bağlantıları, alüminyum malzemelerde bahsedilen birleştirme yöntemlerinin eksikliklerini gidermek için kullanılabilir. AA2024-T3 kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Mühendislik uygulamaları, yapısal uygulamalar
- Günlük hayatta kullanılan birçok ev aleti ve eşyalar
- Havacılık ve uzay sanayi
- Otomotiv sektörü, askeri ekipmanlar
- Sertlik ve işlenebilirlik gerektiren parçalar (Fıyouj, 2015)

AA2024-T3 mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.3 AA2024-T3 Mekanik Özellikleri (Akpınar, 2013).

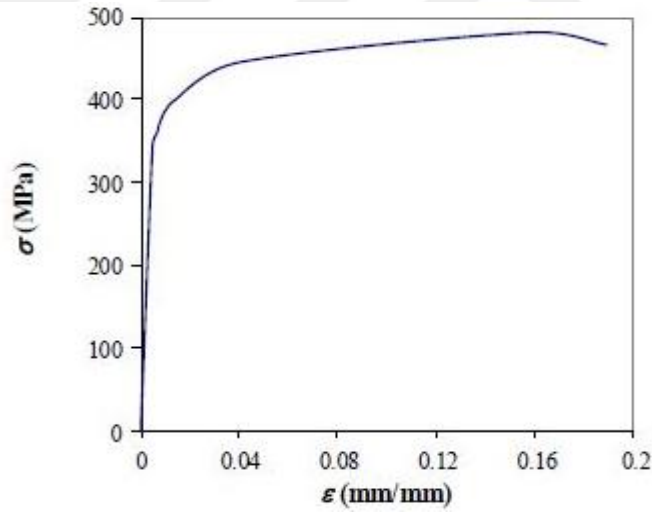
Elastisite Modülü	72.4 GPa
Kayma Modülü	27.2 GPa
Poisson Oranı	0.33
Akma Dayanımı	340 MPa
Sertlik HV	125
Sertlik HB	120
Kopma Uzaması	% 18
Çekme Dayanımı	475 MPa

AA2024-T3 kimyasal kompozisyonu aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.4 AA2024-T3 Kimyasal Kompozisyonu (Aydın vd., 2010)

Fe	0.50
Si	0.50
Cu	3.80-4.90
Mn	0.3-0.90
Mg	1.20-1.80
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.10

AA2024-T3 gerilme-şekil değiştirme diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.2 AA2024-T3 Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı (Akpınar, 2013).

3.2. Kullanılan Yapıştırıcı

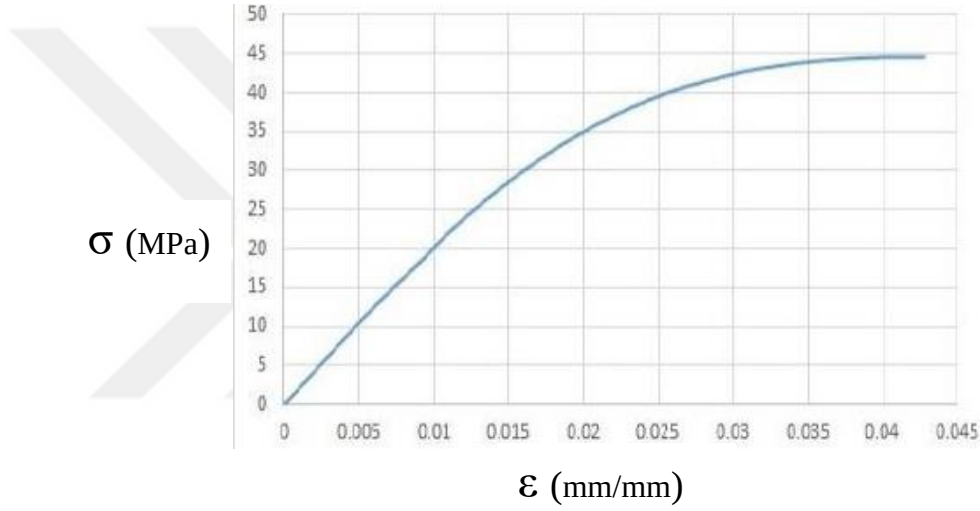
3.2.1. Yapıştırıcı DP460

DP 460 çift bileşenli sıvı epoksi yapıştırıcıdır. Epoksi ve hızlandırıcı'nın karışımıyla bağlantıya uygulanmaktadır. Sıvı yapıştırıcılar, yapısal yapıştırma bağlantılarında oldukça sık kullanılırlar ve yüksek bağlantı dayanımı, düzgün gerilme dağılımı ve iyi boşluk doldurma gibi avantajlar sağlarlar. Metal, seramik, cam ve birçok kompozit

malzemenin birleştirilmesinde kullanılır. DP460'ın en genel özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kontrollü akış
- Yüksek kesme mukavemeti
- Çevresel etkilere karşı direnç
- Çökelme yapmaz
- Karıştırma işlemi kolay yapılır (Fıyouj, 2015).

DP460 gerilme-şekil değiştirme diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.3 DP460 Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı (Akpınar, 2013)

DP460' mekaniik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.5 DP460 Mekanik Özellikleri (Kazaz vd. 2020)

Elastisite Modülü	1984 MPa
Poisson Oranı	0.37
Çekme Dayanımı	38.4 MPa
Şekil Değişirme	%4.7

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacak olan analizler için Cohesive Zone Model (CZM) kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin CZM parametrelerinin bilinmesi araştırmanın ilerleyişi açısından önemlidir. Araştırmada kullanılan DP460 yapıştırıcı için CZM parametreleri literatürde yapılan çalışmalardan elde edilmiştir.

Aşağıdaki tabloda belirli koşullardaki CZM parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.6 DP460 Cohesive Zone Model (CZM) Parametreleri (Kazaz vd., 2020)

Maksimum Normal Gerilme (t_n^0)	36.05 MPa
Kritik Normal Enerji Salınım Hızı (G_n^c)	2,56 N/mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (t_s^0)	28.5 MPa
Kritik Teğetsel Enerji Salınım Hızı (G_t^c)	11.71 N/mm

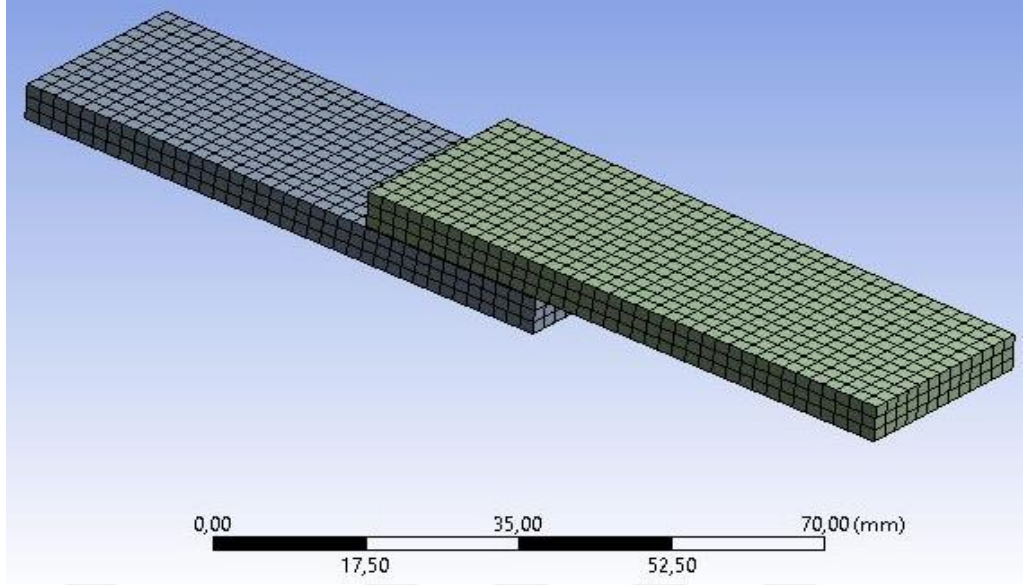
3.3. Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemleri başta olmak üzere birçok alanda, karşılaşılan problemlere çözüm arayan sayısal bir metoddur. Sonlu elemanlar yöntemi problemlerin çözümünü, parçadan bütüne gitme prensibi ile aramaktadır. Sonlu eleman; iki veya üç boyutlu yapıların bir parçası veya bir bölgesidir. Bu yöntemin ilk ve en geniş uygulama alanı "gerilme analizi"dir (Güler ve Sadri, 2015).

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1950'li yıllarda uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır (Güler ve Sadri, 2015). Daha sonra getirdiği yeniliklerin etkisi ile havacılık sanayi ve otomotiv teknolojileri başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin, problemlere nasıl çözüm aradığını ve yöntemin ana fikrini anlatan ilk makale Turner ve arkadaşları tarafından 1956 yılında yayınlanmıştır (Güler ve Sadri, 2015).

Sonlu elemanlar yönteminde gerilme analizinin temel mantığı, gerçekte var olan bir cismin formüle edilebilmesinin zorluğu ile ilişkilidir. Yöntem, var olan geometrik bir cismin, formülasyonu daha kolay olan ve çözümüne daha kolay gidilebilen parçalara ayrılması prensibine dayanmaktadır. Böylece daha basit olan bu geometrilerin çözümleri yapılarak ana geometrinin çözümüne ulaşılır.

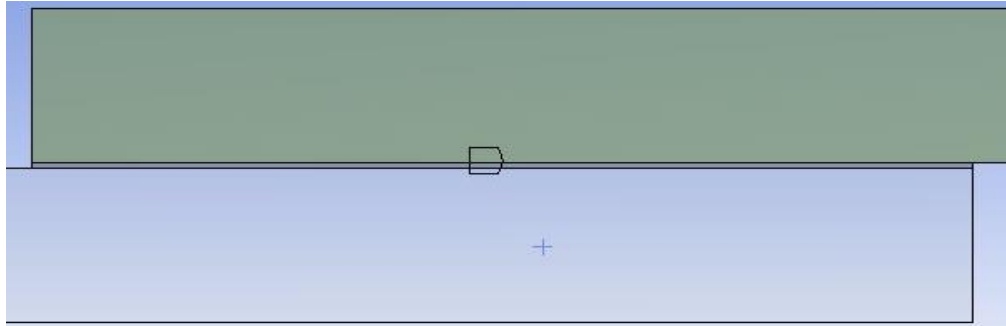
Bütün bir cismin elemanlara bölünebilmesi için bir ağ yapısına ihtiyaç vardır. Bu işlem Mesh olarak da bilinmektedir. Geometrinin mümkün olduğunca fazla sayıda elemana bölünmesi, çözümün hassasiyetini arttıracaktır.



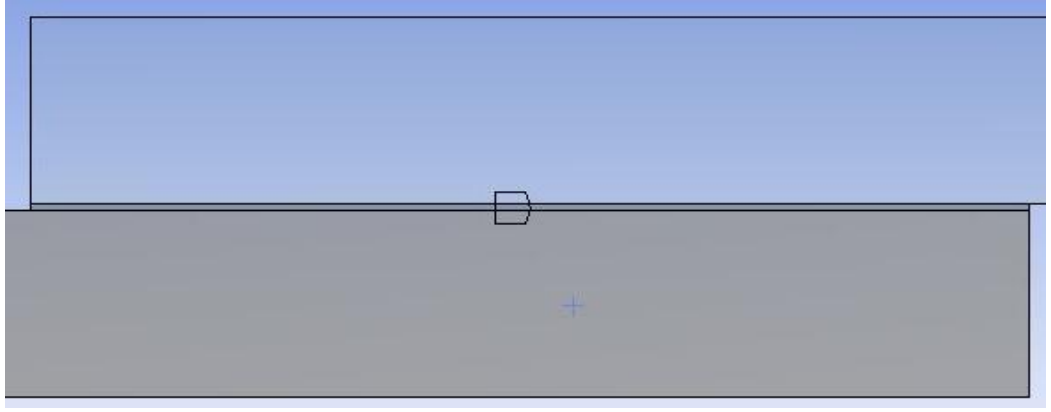
Şekil 3.4 Çalışmada Kullanılan Başlangıç Geometrisinin Mesh'lenmiş Hali

Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak geometrinin matematiksel modeli oluşturulurken, analiz için belirlenen sınır şartları başta olmak üzere malzeme özellikleri kullanılan bilgisayar programına aktarılmalıdır. Yöntem oluşturulan matematik modelde, düğüm noktalarına dışarıdan en basit dış etken ve sınır şartlarının uygulanmasıyla meydana gelen değişiklik durumları için matrisler oluşturmakta ve matrisler bilgisayar yardımıyla çözülmektedir. Bu yolla her bir elemandaki ve elemanların oluşturdukları cismin tamamında ki gerilme ve şekil değiştirmeler elde edilmektedir (Fish ve Belytschko, 2007).

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı eleman tiplerinin analizleri yapılabilir. Yöntemde kullanılan başlıca eleman tipleri şu şekildedir; Üç boyutlu kiriş eleman, sabit gerilmeli üçgen eleman, lineer gerilmeli üçgen eleman, kabuk eleman vb.



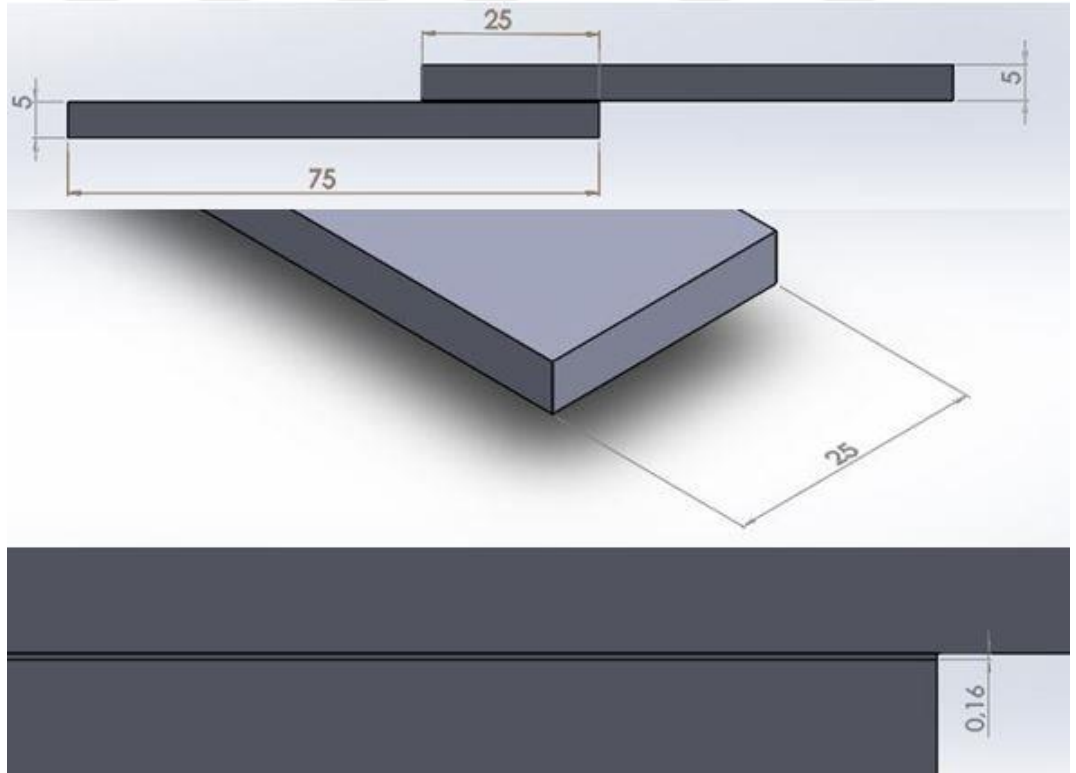
Şekil 3.5 CZM'de Yapıştırıcı İle Üst Plaka Arasında Oluşturulan Kontak



Şekil 3.6 CZM’de Yapıştırıcı İle Alt Plaka Arasında Oluşturulan Kontak

3.4. Modellerin Oluşturulması

Yapıştırıcı ile birleştirilen tek tesirli bindirmeli bağlantılarda, uygulamayı düşündüğümüz geometrilerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirebilmek için öncelikle modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Başlangıçta referans için analizi gerçekleştirilecek olan klasik model boyutları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

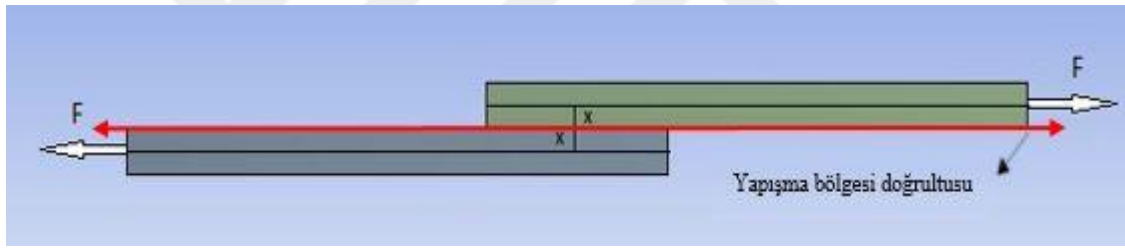


Şekil 3.7 Plakaların Boyu 75 mm, Plakaların Genişliği 25 mm, Plakaların Kalınlığı 5 mm, Bağlantı Bölgesi Uzunluğu ve Genişliği 25 mm, Yapıştırıcı Kalınlığı 0,16 mm

3.4.1. Klasik bindirme bağlantısı modelinin oluşturulması

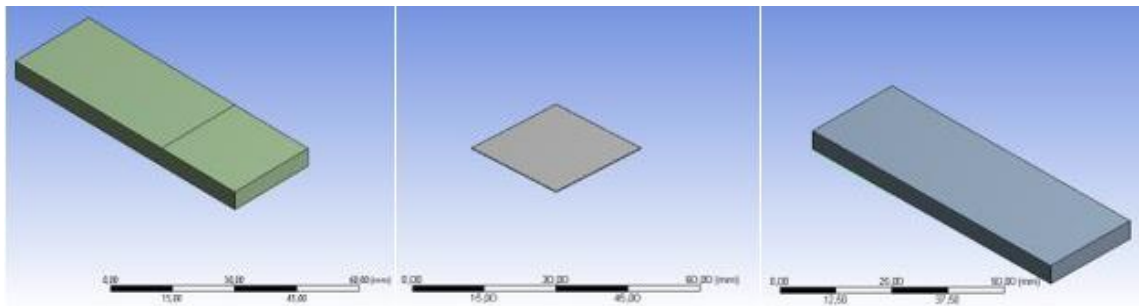
Klasik bindirme bağlantıları en yaygın bağlantılardan biridir. Klasik bağlantı modeli bu bağlantı türünde oluşan problemlerin belirlenmesini sağlamak amacı ile oluşturulmuştur. Aynı zamanda bağlantı üzerinde yapılacak olan geometri değişikliklerinin sonuçlarını karşılaştırabileceğimiz bir referans değer verecektir.

Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere uygulanan kuvvet bindirme bölgesi doğrultusunda etki etmemektedir. Uygulanan kuvvetin bindirme bölgesinden uzak eksenlere etki etmesi bağlantı bölgesinde moment oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum bindirmeli bağlantılarda bağlantı bölgesine, istenmeyen yönde kuvvetlerin etki etmesine ve hasar başlangıç eşiğinin aşağıya düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle yapılacak olan değişiklikler, bağlantıda oluşan istenmeyen kuvvetlerin değerlerini düşürerek oluşan negatif etkileri en aza indirmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 3.8 Kuvvet doğrultusu ile yapışma bölgesi doğrultusu arasındaki mesafe

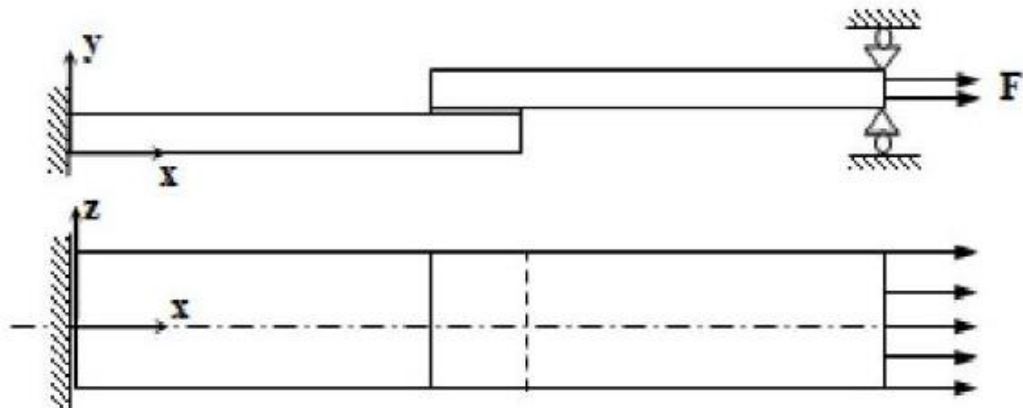
Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak klasik bağlantıda kullanılan malzemeler paket program yardımı (SOLIDWORKS) ile oluşturulduktan sonra aynı program üzerinde montajı yapılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminin kullanılacağı bilgisayar programına (ANSYS) aktarılmıştır.



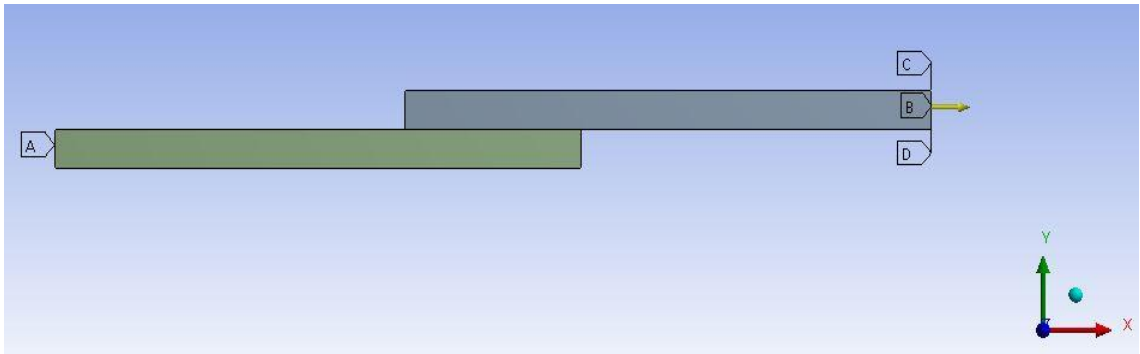
Şekil 3.9 Sırasıyla; Alt Plaka – Yapıştırıcı – Üst Plaka

Sonlu elemanlar yönteminin kullanılacağı programa aktarılan malzeme özellikleri bağlantısı yapılacak malzemelere tanımlanarak model oluşturulmaya devam edilmiştir. Daha sonra yapıştırıcı ile yapışacak pakalar arasında kontak yüzeyler oluşturularak sonlu elemanlar yönteminin temelini oluşturan, tüm geometrinin elemanlara ayırma işlemi yapılarak geometri parçalara ayrılmıştır. Daha sonra uygulanacak olan sınır şartları belirlenerek analizler yapılmıştır.

Uygulanan sınır şartları, bağlantının uç yüzeylerinden birinin sabit kalması ve diğer uç noktasından ise yapıştırıcı bölgesinden, kopana kadar çekme kuvvetine maruz bırakılmasını içermektedir.



Şekil 3.10 Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları (Fıyouj, 2015).

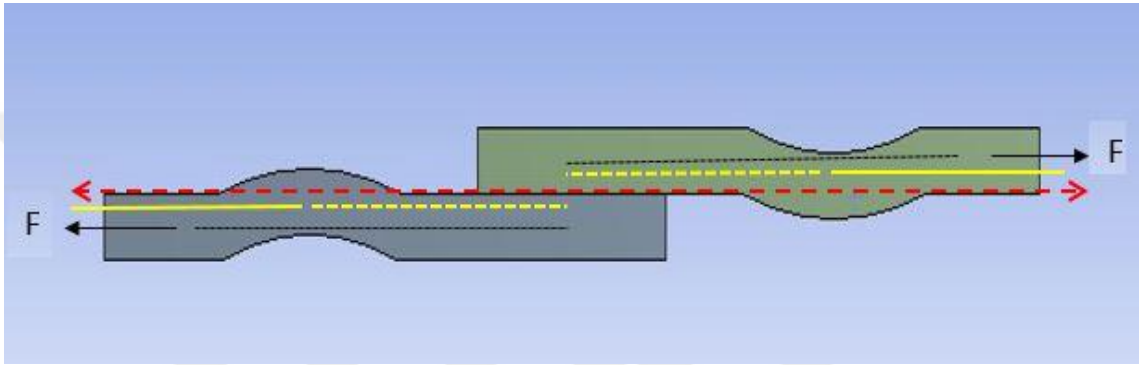


Şekil 3.11 Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere oluşturulan katı model A yüzeyinden sabit mesnet ile C ve D kenarlarından, X yönünde ve Z yönünde harekete müsade eden ancak Y yönünde hareketi kısıtlayan mesnet ile mesnetlenmiştir. Bağlantı kopana kadar çekme kuvvetine maruz bırakılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

3.4.2. Birinci geometri değişikliği ile oluşturulan bindirme bağlantısı modeli

Klasik bindirme bağlantısında oluşan momentin değerini ve etkilerini azaltmak amacı ile yapıştırıcı ile birleştirilecek olan malzemelerin geometrilerinde değişiklikler yapılması öngörülmüştür. Yapılacak olan değişiklik ile yapışma bölgesi doğrultusu ile uygulanan kuvvetin doğrultusu arasındaki mesafe azaltılarak, yapışma bölgesinde oluşan momentin değerinin azaltılması hedeflenmiştir. Yapılan değişiklik ile plakaların belirli bölgelerinde yapışma bölgesine doğru yay şeklinde eğimler oluşturulmuştur.

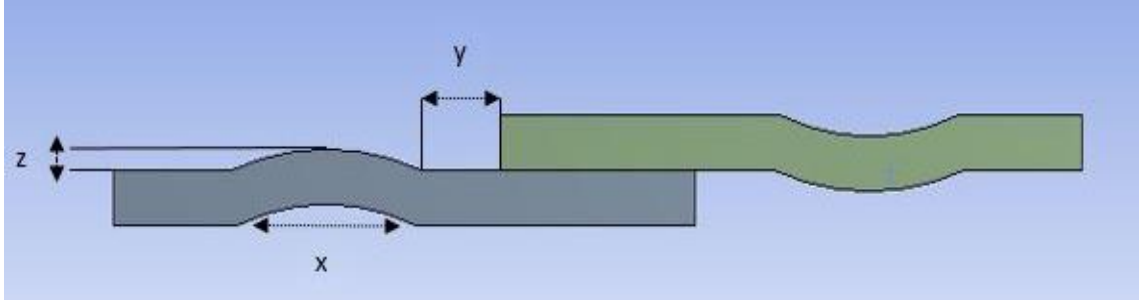


Şekil 3.12 Birinci geometri değişikliği ile, oluşan doğrultular arası mesafe

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere plakalar üzerinde oluşturulan yayın merkezi, kuvvet doğrultusu ile yapışma bölgesi arasındaki mesafe arasında kalmaktadır. Bu durumun oluşan momentin etkilerini azaltarak, sistemdeki kopma yükünü arttırması beklenmektedir.

Klasik bindirmeli bağlantı modeline alternatif olarak uygulanan geometrik değişikliklerin bağlantı üzerindeki konumunu, değişikliğin boyutlarını, yapılan geometrik değişikliğin yapışma bölgesine uzaklığını belirleyebilmek ve bunun sonucunda optimum değerleri elde ederek en iyi geometriyi tanımlamak, yapılacak analizlerin güvenilirliği açısından önemlidir. Bağlantıda kullanılan plakalar üzerinde oluşturulan geometrik değişiklik; plaka üzerindeki konumu, yapışma bölgesine uzaklığı ve yapışma bölgesine eksenel olarak uzaklığı olmak üzere üç farklı değişkene sahiptir. Kullanılacak olan optimum geometrinin belirlenebilmesi için bu üç değişkenin kombinasyonlarının kullanılması gerekmektedir. Her bir değişken farklı boyutlarda sonsuz sayıda olabilir. Problemin çözümünün yapılabilmesi için bu sayının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu nedenle değişkenlerin her birinin boyutları için alt ve üst değerler belirlenmiştir. Alt değer

üzerinde eşit artışlar yapılarak üst değere ulaşılmıştır. Böylece değişkenler için kullanılacak boyutlar belirlenmiştir. Değişkenler aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.13 1. Geometri değişikliği için değişkenler; x: izdüşüm, y: uzaklık, z: yükseklik

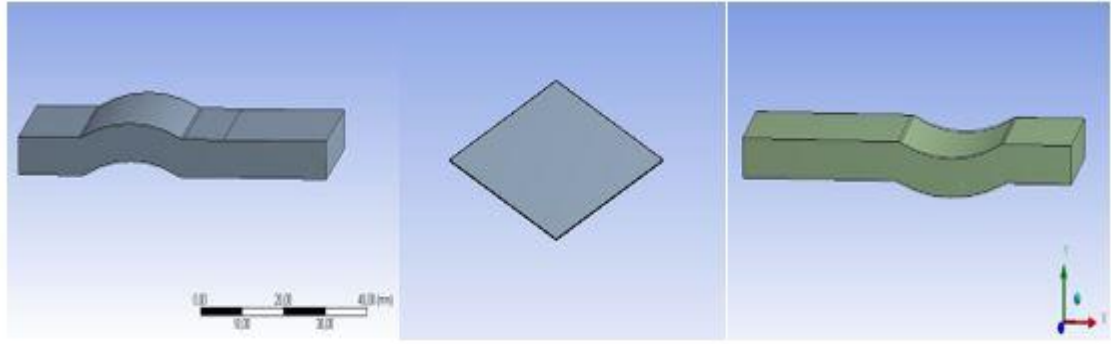
Modelde kullanılacak değişkenlerin boyutları aşağıdaki taloda verilmiştir.

Tablo 3.7 Değişkenler için kullanılacak boyutlar

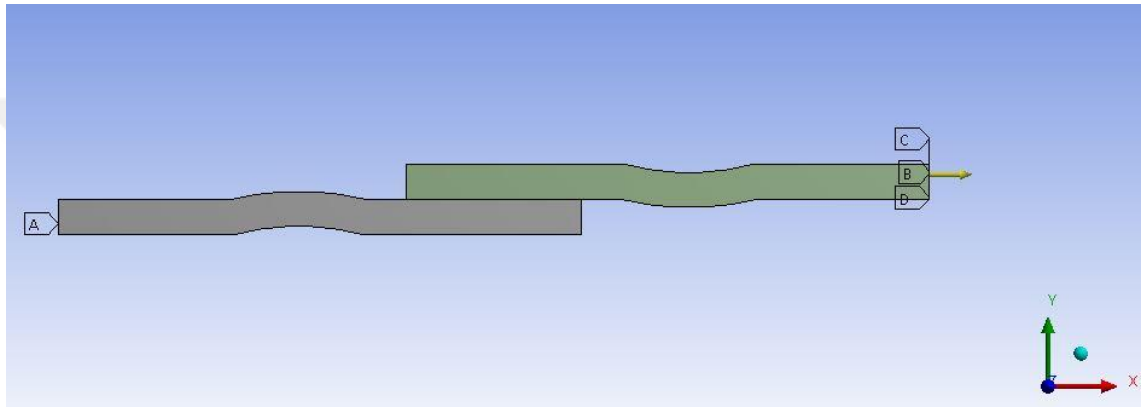
İzdüşüm – X (mm)	Uzaklık – Y (mm)	Yükseklik – Z(mm)
15	1	0.5
20	3.25	1.25
25	5.50	2
30	7.75	2.75
35	10	3.5

Taboda verilen değerlerin birbiriyle kombinasyonu sonucunda yapılacak olan analizler ile optimum geometri belirlenebilir. Ancak bu durumda çok sayıda analiz yapılması gerekmektedir. Bu nedenle daha az analiz ile daha verimli sonuçlar alınması adına Taguchi Metodu’ndan faydalanılmıştır. Bu metod ile beraber analiz sayısı azalarak, en etkili değişkenin hangisi olduğu belirlenebilmektedir. Böylece kopma yükünün maksimum çıkacağı optimum değişken değerleri yaklaşık olarak belirlenir.

Modelde kullanılacak değişken değerleri belirlendikten sonra sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak geometrisi değiştiriliş yeni bağlantıda kullanılan malzemeler paket program yardımı ile oluşturulduktan sonra aynı program üzerinde montajı yapılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminin kullanılacağı bilgisayar programına (ANSYS) aktarılmıştır. Klasik bağlantıda kullanılan yollar izlenerek model oluşumu tamamlanmıştır. Modellerin hepsinde aynı sınır şartları kullanılmıştır.



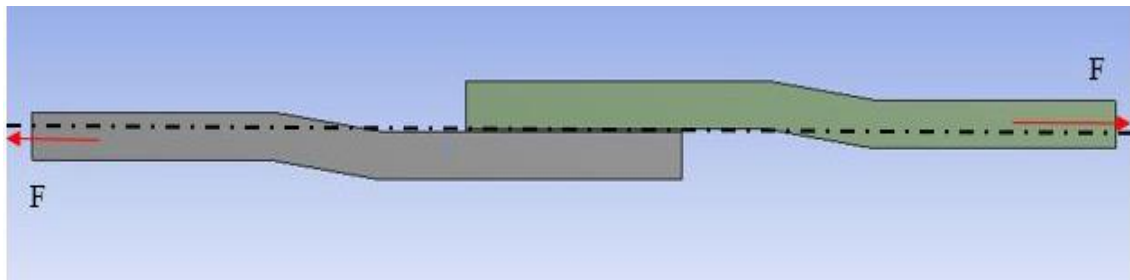
Şekil 3.14 Birinci geometri değişikliği sırasıyla; alt plaka – yapıştırıcı – üst plaka



Şekil 3.15 Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları

3.4.3. İkinci geometri değişikliği ile oluşturulan bindirme bağlantısı modeli

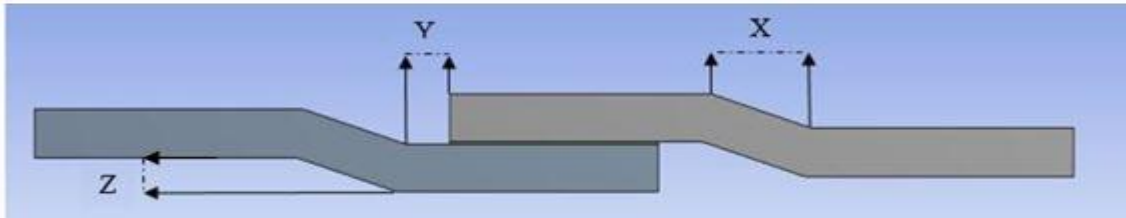
Klasik bindirme bağlantısında oluşan momentin değerini ve etkilerini azaltmak amacı ile yapıştırıcı ile birleştirilecek olan malzemelerin geometrilerinde değişiklikler yapılması öngörülmüştür. Yapılacak olan ikinci bir değişiklik ile yapışma bölgesi doğrultusu ile uygulanan kuvvetin doğrultusu arasındaki mesafe azaltılarak, yapışma bölgesinde oluşan momentin değerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu işlem bağlantıda kullanılacak plakaların belirli bir doğrultuda ve ölçüde bükülmesi ile yapılmıştır.



Şekil 3.16 İkinci geometri değişikliği ile, oluşan doğrultular arası mesafe

Şekil 3.16’ da görüldüğü üzere plakalar belirli ölçüler kullanılarak bükülmüştür. Oluşturulan eğimin etkisi ile plakalara uygulanan kuvvet ve yapışma merkezi doğrultuları paralel olarak birbirlerine yaklaştırılmıştır. Bu durumun oluşan momentin etkilerini azaltarak, sistemdeki kopma yükünü arttırması beklenmektedir.

Klasik bindirmeli bağlantı modeline alternatif olarak uygulanan bir diğer geometrik değişikliğin bağlantı üzerindeki konumunu, değişikliğin boyutlarını, yapılan geometrik değişikliğin yapışma bölgesine uzaklığını belirleyebilmek ve bunun sonucunda optimum değerleri elde ederek en iyi geometriyi tanımlamak için ilk modelde uygulanan yöntemler tekrarlanmıştır. Bu modelde de aynı şekilde üç farklı değişken bulunmaktadır. Bunlar plakalar üzerinde gerçekleştirilen eğimin uzunluğunun izdüşümü, eğim başlangıcının yapışma merkezine uzaklığı ve uygulanan eğimin yapışma merkezine göre yüksekliğidir. İlk modelde olduğu gibi bu değişkenlerin kombinasyonları kullanılarak optimum değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır. Her bir değişken farklı boyutlarda sonsuz sayıda olabilir. Problemin çözümünün yapılabilmesi için bu sayının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu nedenle değişkenlerin her birinin boyutları için alt ve üst değerler belirlenmiştir.



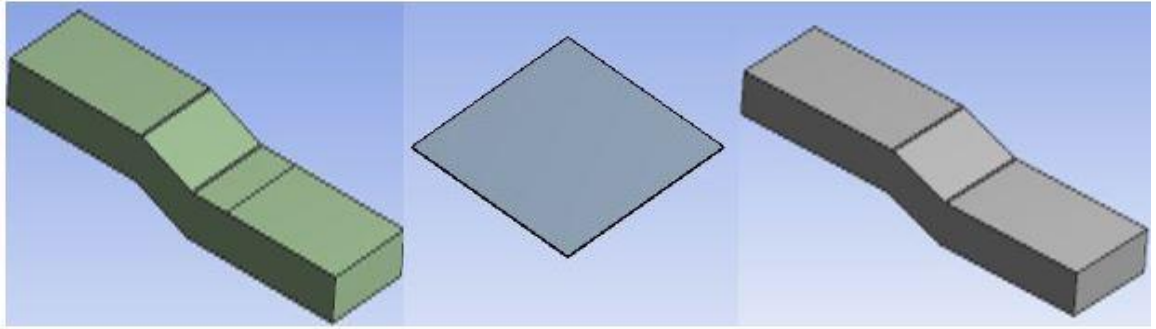
Şekil 4.17 2. Geometri değişikliği için değişkenler; x: izdüşüm, y: uzaklık, z: yükseklik

Modelde kullanılacak değişkenlerin boyutları aşağıdaki taloda verilmiştir.

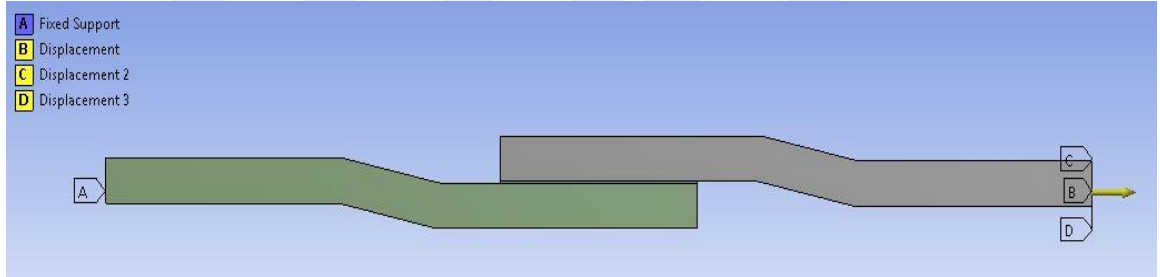
Tablo 3.8 Değişkenler İçin Kullanılacak Boyutlar

İzdüşüm – X (mm)	Uzaklık – Y (mm)	Yükseklik – Z(mm)
5	1	0.5
12,5	3.25	1.25
20	5.50	2
27,5	7.75	2.75
35	10	3.5

Tabloda model için kullanılacak olan değişkenlerin farklı değerleri verilmiştir. İlk modelde olduğu gibi bu değerlerin kombinasyonları kullanılarak optimum geometriye en yakın geometriye ulaşılmaya çalışılabilir. Fakat bu durum çok fazla analiz ve bunun sonucunda çok uzun süreli bir çalışma gerektirmektedir. Çok sayıda analiz yapmamak için ilk modelde olduğu gibi Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Bu modelde de klasik bağlantıda ve ilk geometri değişikliğinde kullanılan sınır şartları kullanılmıştır.



Şekil 3.18 İkinci geometri değişikliği sırasında; alt plaka – yapıştırıcı – üst plaka



Şekil 3.19 Çekme yüküne maruz kalan modele uygulanan sınır şartları

3.5. Taguchi Metodu

Günümüzde üretime dayalı işletmelerin, ürünlerini daha az deney ve bunun sonucunda daha az maliyetle üretebilmesi pazarda tutunabilmelerini sağlayan en önemli etkenlerdendir. Daha az deney ve bununla beraber optimum ürün özelliklerinin sağlanması işletmeler açısından önemlidir. Bu doğrultuda üretim yönetimi araçlarında da gelişmeler olmuş ve günümüz gereksinimleri için teknikler ortaya konmuş ya da yıllardır teoride kalmış yöntemler uygulama alanına geçirilmiştir. Sanayileşmiş ülkelerde birçok deney tasarım tekniği kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerden birisi de Taguchi metodudur. Taguchi metodu uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi sonuçlar veren ortogonal dizileri geliştirmiştir (Kayı, 2006).

Ortogonal diziler, faktör seviyelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Bu sayede deney tasarımında Taguchi yaklaşımı, kimya ve elektronik sektöründe olduğu gibi üretim sektöründe de kabul görmüştür (Kayı, 2006).

3.5.1. Taguchi metodunun temel çalışma prensibi

Taguchi Metodu, bir çok faktörün bağlı olduğu ürün ve prosesin kalitesini yükseltmek için geliştirilmiştir. Faktörler tek tek, izin verilen aralıklarda olabilecek tüm kombinasyonları etkili bir şekilde test ve geliştirme stratejisi içerisinde kullanılabilmektedir. Mühendislik projeleri çok sayıda faktör ve değişken içerdiği için, bütün kombinasyonlar denenemeyecek kadar geniştir. Üstelik özel projeler için etkili faktörler arasında etkileşimlerin olması deneme sayısını artırmaktadır (Kayı, 2006).

Test kombinasyonlarını azaltmada geleneksel olarak kısmi faktöriyel tasarım kullanılmaktadır. Taguchi faktöriyel deneyler için özel bir dizayn geliştirmiştir. Bu dizayn ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Bu dizaynların kullanılması verilen faktörlerin en az sayıda deneyle incelenmesine olanak tanımaktadır (Canıyılmaz, 2001).

Tablo 3.9 Taguchi ve tam faktöriyel tasarım için deney sayıları(Canıyılmaz, 2001).

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

Tabloda görüldüğü üzere kullanılan farklı parametrelerin sayısı ve seviyesi arttıkça oluşturulması gereken kombinasyonların sayısı artırmaktadır. Buna bağlı olarak yapılması gereken deney sayısı artmaktadır. Mühendislik uygulamalarında çok fazla deney sayısı, maliyet ve zaman kaybı anlamına gelmektedir. Taguchi metodu faktör eşleşmelerini en uygun şekilde yaparak oluşturulması gereken kombinasyon sayısını azaltmaktadır. Bunun sonucunda deney sayısını azaltarak maliyetin düşmesinde ve zamandan tasarruf sağlanmasında önemli rolü olan bir araçtır.

3.5.2. Araştırmada taguchi metodunun kullanımı

Modellerin her birinde üçer adet değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin her birinin beşer tane farklı değeri belirlenmiştir. Taguchi metodunu kullanırken üç faktörü bulunan beş seviyeli deney modelini seçerek modellerde kullanacağımız değerlerin 25 farklı kombinasyonu belirlenmiş oldu. Belirlenen bu değerler sonucunda her bir geometri için 25 farklı model oluşturuldu ve analizleri gerçekleştirildi.

↓	C1	C2	C3	↓	C1	C2	C3
	izdusum(mm)	yukseklik(mm)	uzaklik(mm)		uzaklik	yukseklik	uzunluk
1	15	0,50	1,00	1	1,00	0,50	5,0
2	15	1,25	3,25	2	1,00	1,25	12,5
3	15	2,00	5,50	3	1,00	2,00	20,0
4	15	2,75	7,75	4	1,00	2,75	27,5
5	15	3,50	10,00	5	1,00	3,50	35,0
6	20	0,50	3,25	6	3,25	0,50	12,5
7	20	1,25	5,50	7	3,25	1,25	20,0
8	20	2,00	7,75	8	3,25	2,00	27,5
9	20	2,75	10,00	9	3,25	2,75	35,0
10	20	3,50	1,00	10	3,25	3,50	5,0
11	25	0,50	5,50	11	5,50	0,50	20,0
12	25	1,25	7,75	12	5,50	1,25	27,5
13	25	2,00	10,00	13	5,50	2,00	35,0
14	25	2,75	1,00	14	5,50	2,75	5,0
15	25	3,50	3,25	15	5,50	3,50	12,5
16	30	0,50	7,75	16	7,75	0,50	27,5
17	30	1,25	10,00	17	7,75	1,25	35,0
18	30	2,00	1,00	18	7,75	2,00	5,0
19	30	2,75	3,25	19	7,75	2,75	12,5
20	30	3,50	5,50	20	7,75	3,50	20,0
21	35	0,50	10,00	21	10,00	0,50	35,0
22	35	1,25	1,00	22	10,00	1,25	5,0
23	35	2,00	3,25	23	10,00	2,00	12,5
24	35	2,75	5,50	24	10,00	2,75	20,0
25	35	3,50	7,75	25	10,00	3,50	27,5

Şekil 3.20 Farklı Geometriler İçin Taguchi Metodu İle Belirlenen Değişken Değerleri

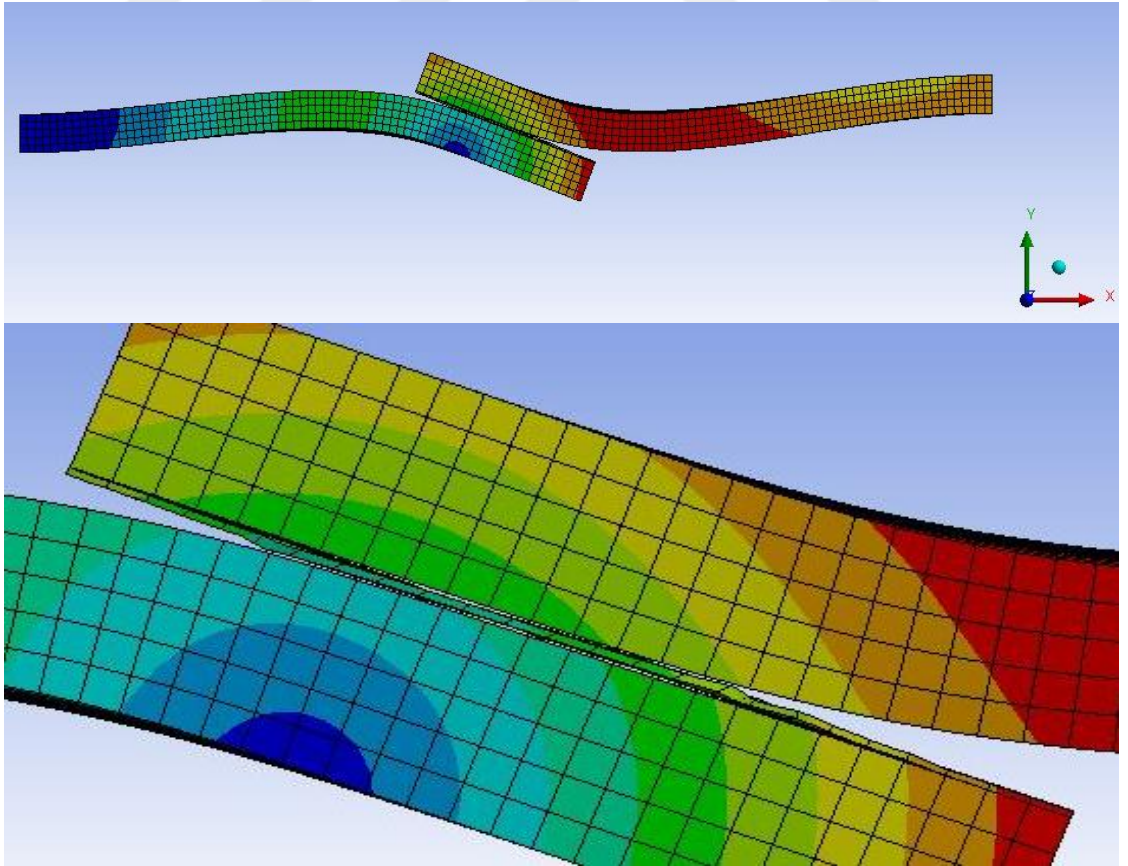
Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere çok sayıda kombinasyon oluşturmak yerine kullanılan metot ile deney sayısı azaltılmıştır. Belirlenen değişken değerleri kullanılarak her bir geometri için 25'er tane model oluşturulup analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sonuçlar metot yazılımına aktarılarak en verimlileri belirlenmiştir. Aynı zamanda kullanılan değişkenlerin en etkili olanı taguchi metodu ile saptanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında geometri değişikliklerinin kullanılabilirliği, yapılan değişikliklerin bağlantıya olan etkisi araştırılmıştır. Çalışma yapılırken sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. Bunun yanı sıra farklı yazılımlar da kullanılmıştır. İki farklı geometri değişikliği belirlenerek, her bir değişiklik için daha önceki başlıklarda bahsi geçen 25'er adet model hazırlanarak analizleri yapılmıştır. Çıkan sonuçların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için öncelikli olarak klasik bağlantı modelinin analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

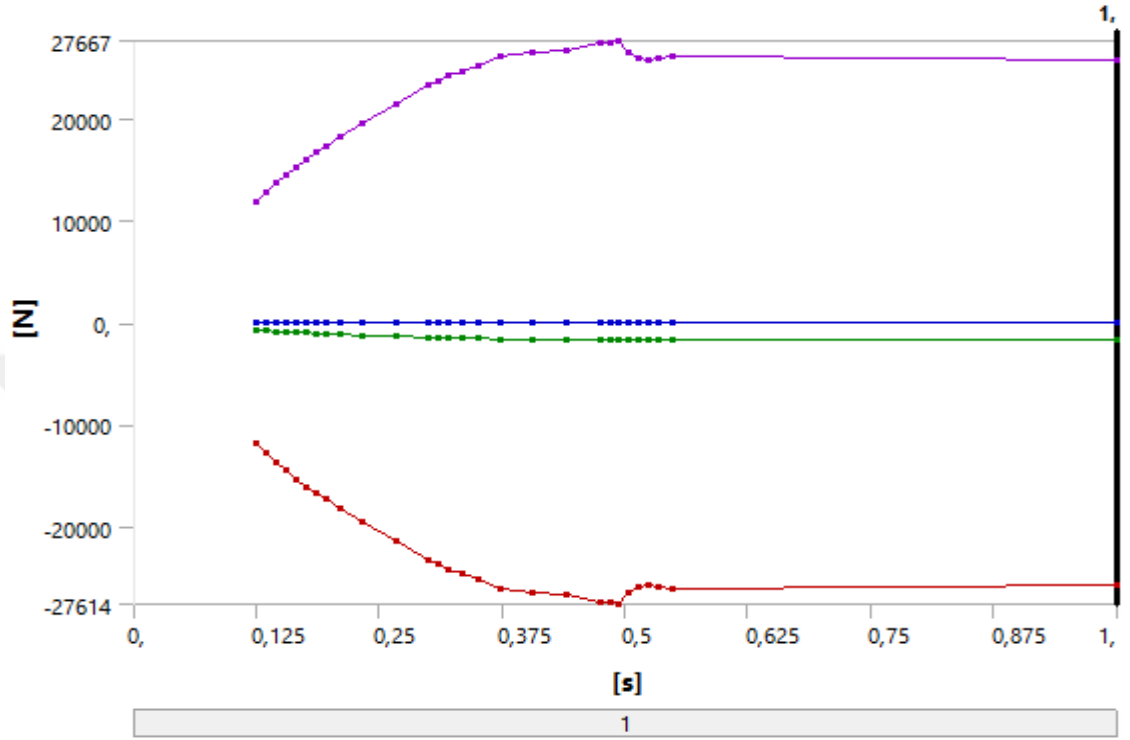
4.1. Klasik Bindirme Bağlantısı Analizi

Klasik bağlantı için oluşturulan model belirtildiği üzere paket programa aktarılarak sınır şartları belirlenmiştir. Daha sonra model belirli değerlerde yer değiştirmeye maruz bırakılarak yapıştırma bölgesinde kopma sağlanmıştır. Programın topladığı datalar diğer geometrilerin davranışları ile karşılaştırılmak üzere kaydedilmiştir.

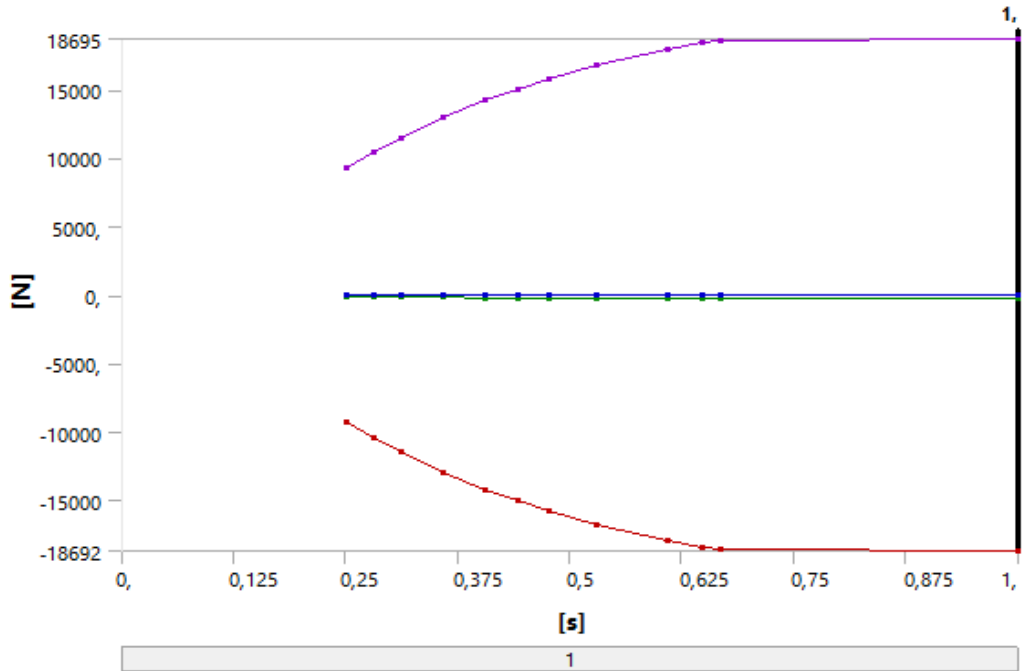


Şekil 4.1 Klasik Bindirme Bağlantısında Kopmanın Gerçekleşmesi

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere kuvvetin merkeze paralel uzak bir eksende etki etmesinden dolayı oluşan momentin, bağlantısı yapılan plakaları bükerek bağlantı bölgesini deformasyona uğrattığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.2 50CrV4 (Yay Çeliği) kopma yükü bağlantının

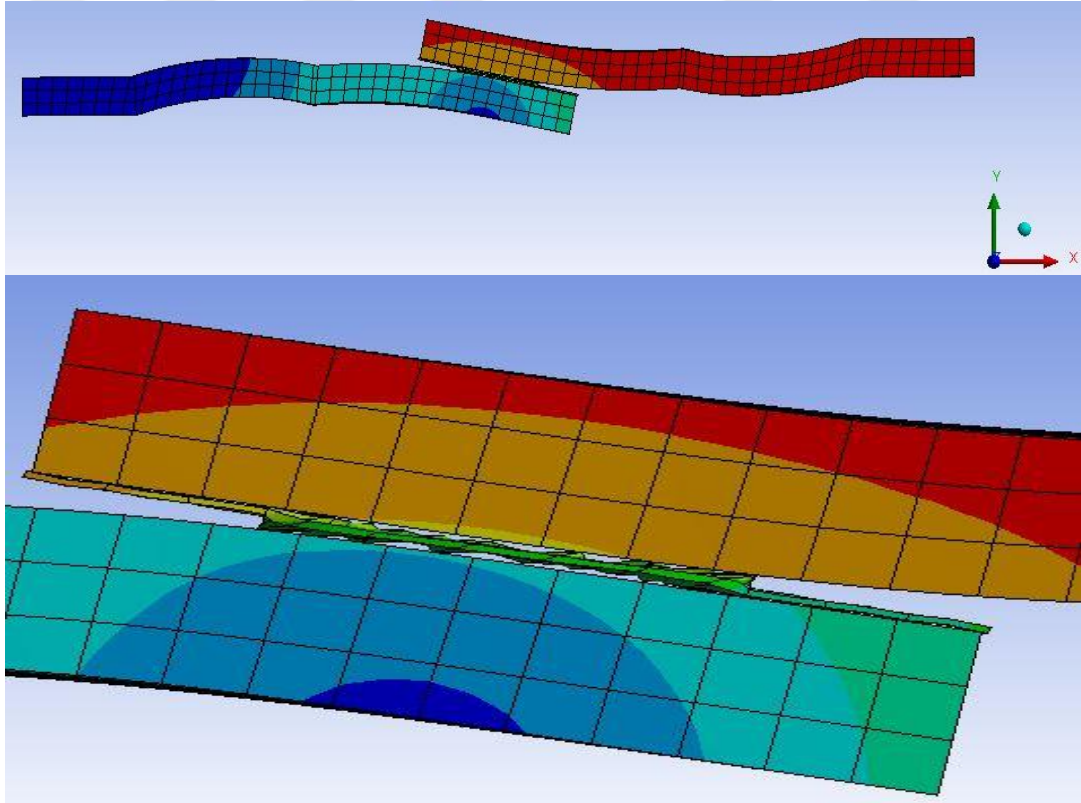


Şekil 4.3 AA2024-T3 bağlantının yükü kopma

Çelik ve Alüminyum plakalar ile yapılan klasik bağlantılarda kopmaya kadar olan deformasyon esnasında ölçülen en yüksek kopma yükü Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görülmektedir. Çelik için bu değer 27667 N, Alüminyum için ise 18695 N'dur. Grafiklerde mor renkle gösterilen eğriler kopmaya kadar olan maksimum yükü, kırmızı renkle gösterilen eğriler bağlantı üzerine etkiyen yüke karşılık oluşan reaksiyon kuvvetini, yeşil eğriler y yönünde oluşan reaksiyon kuvvetini, mavi z yönünde oluşan reaksiyon kuvvetini ifade etmektedir. DP 460 teknik data listesi sonuçların uygunluğu açısından referans kabul edilmiştir. Bu listede alüminyum için kopma yükü 19370 N'dur.

4.2. Birinci Geometri Değişikliği İle Oluşturulan Bindirme Bağlantılarının Analizi

Klasik bağlantı modelinde, oluşan momentin etkileri net bir şekilde görülmektedir. Bu nedenle uygulanan kuvveti paralel olarak yapışma merkezine yaklaştırmak için yapılan geometri değişikliğinin analizi sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Uygulanan geometrik değişikliğin farklı kombinasyonları denenerek en etkili sonucu veren model değerlerine göre analiz gerçekleştirildiğinde sonuçların gözle görülür bir şekilde iyileştiği görülmektedir.



Şekil 4.4 Birinci geometri değişikliği bağlantısında kopmanın gerçekleşmesi

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere kuvvetin merkeze paralel uzak bir ekseninde etki etmesinden dolayı oluşan momentin etkilerini azaltmak için yapılan geometrik değişiklik sonucunda, plakalardaki yay şeklindeki eğimler düzleşmektedir. Aynı zamanda bu geometrik değişiklikler ile kuvvetin paralel olarak yapışma merkezi eksenine etki etmesi hedeflenmiştir.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	izdusum(mm)	yukseklik(mm)	uzaklık(mm)	kuvvet reaksiyonu(N)	SNRA1	MEAN1
1	15	0,50	1,00	27702	88,8502	27702
2	15	1,25	3,25	28530	89,1060	28530
3	15	2,00	5,50	28683	89,1525	28683
4	15	2,75	7,75	29227	89,3157	29227
5	15	3,50	10,00	28617	89,1325	28617
6	20	0,50	3,25	28053	88,9596	28053
7	20	1,25	5,50	27998	88,9425	27998
8	20	2,00	7,75	28517	89,1021	28517
9	20	2,75	10,00	29210	89,3106	29210
10	20	3,50	1,00	29968	89,5332	29968
11	25	0,50	5,50	27960	88,9307	27960
12	25	1,25	7,75	27851	88,8968	27851
13	25	2,00	10,00	28804	89,1891	28804
14	25	2,75	1,00	28336	89,0468	28336
15	25	3,50	3,25	29448	89,3811	29448
16	30	0,50	7,75	28513	89,1009	28513
17	30	1,25	10,00	28669	89,1483	28669
18	30	2,00	1,00	29277	89,3305	29277
19	30	2,75	3,25	28977	89,2411	28977
20	30	3,50	5,50	30416	89,6620	30416
21	35	0,50	10,00	28185	89,0004	28185
22	35	1,25	1,00	29193	89,3056	29193
23	35	2,00	3,25	29739	89,4665	29739
24	35	2,75	5,50	29151	89,2931	29151
25	35	3,50	7,75	30782	89,7659	30782

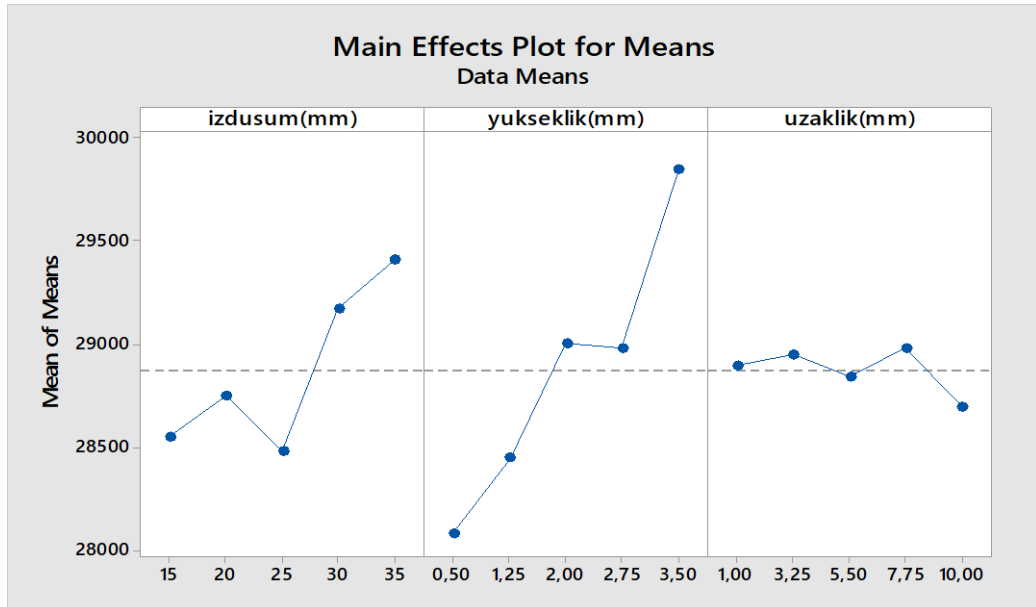
Şekil 4.5 Birinci geometri değişikliği için taguchi metodu ile oluşturulan model kombinasyonları ve yapılan deneylerin sonuçları

Taguchi metodu kullanılarak belirlenen optimum değerler ve en iyi sonuç veren geometri değerleri şekil 4.5'te görülmektedir. Taguchi metoduyla belirlenen kombinasyonlar ile oluşturulan modellerin analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar tekrardan yazılıma aktarılmıştır. Böylece en etkili değişken belirlenmiştir.

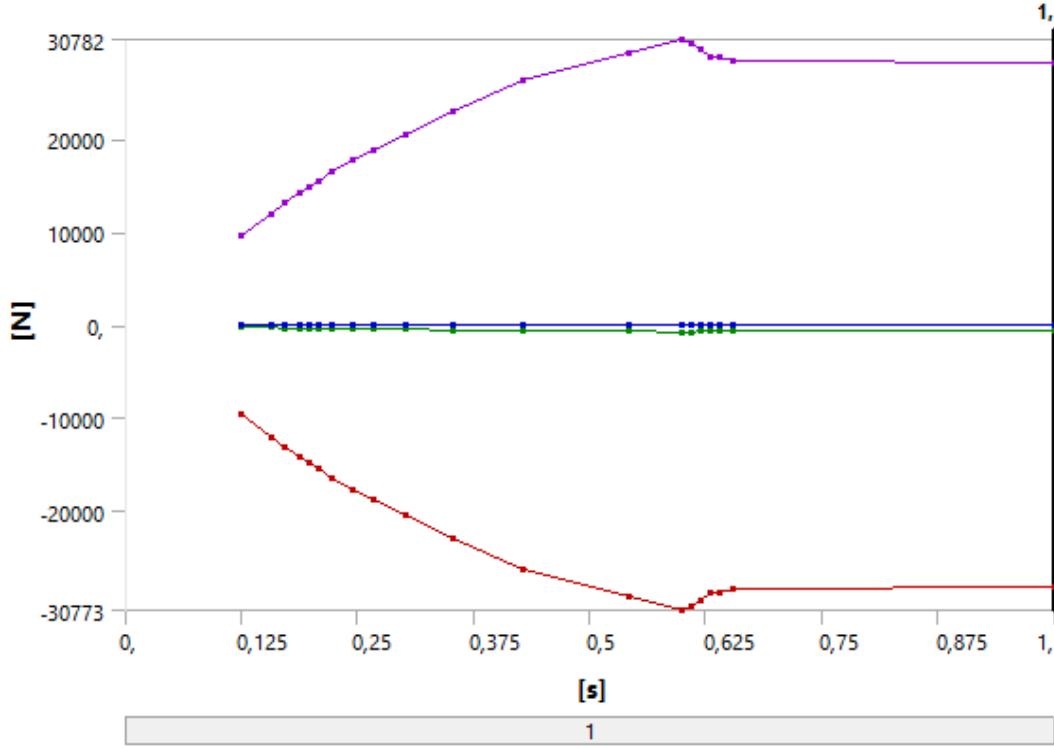
Tablo 4.1 Birinci geometri değişikli için en etkili değişken sıralaması

Level	izdusum(mm)	yukseklik(mm)	uzaklik(mm)
1	89,11	88,97	89,21
2	89,17	89,08	89,23
3	89,09	89,25	89,20
4	89,30	89,24	89,24
5	89,37	89,49	89,16
Delta	0,28	0,53	0,08
Rank	2	1	3

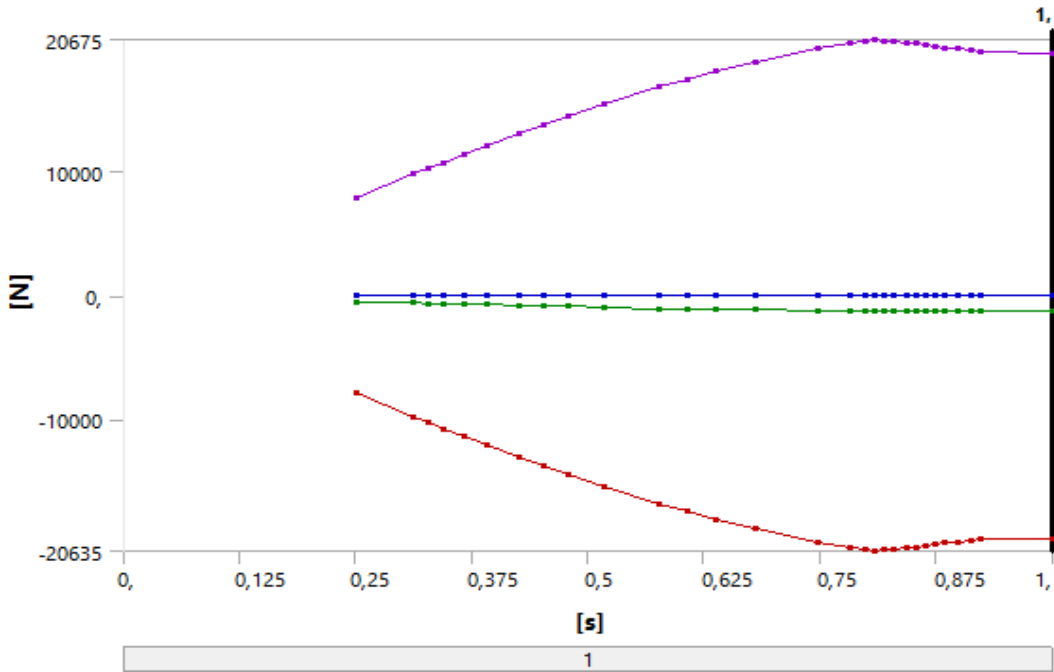
Level	izdusum(mm)	yukseklik(mm)	uzaklik(mm)
1	28552	28083	28895
2	28749	28448	28949
3	28480	29004	28842
4	29170	28980	28978
5	29410	29846	28697
Delta	930	1764	281
Rank	2	1	3

**Şekil 4.6** Birinci geometri değişikli için en etkili değişken sıralaması

Tablo 4.2’de ve şekil 4.5’te birinci geometri için en etkili değişkenin yükseklik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Birinci geometri değişikliği için 50CrV4 bağlantının kopma yükü

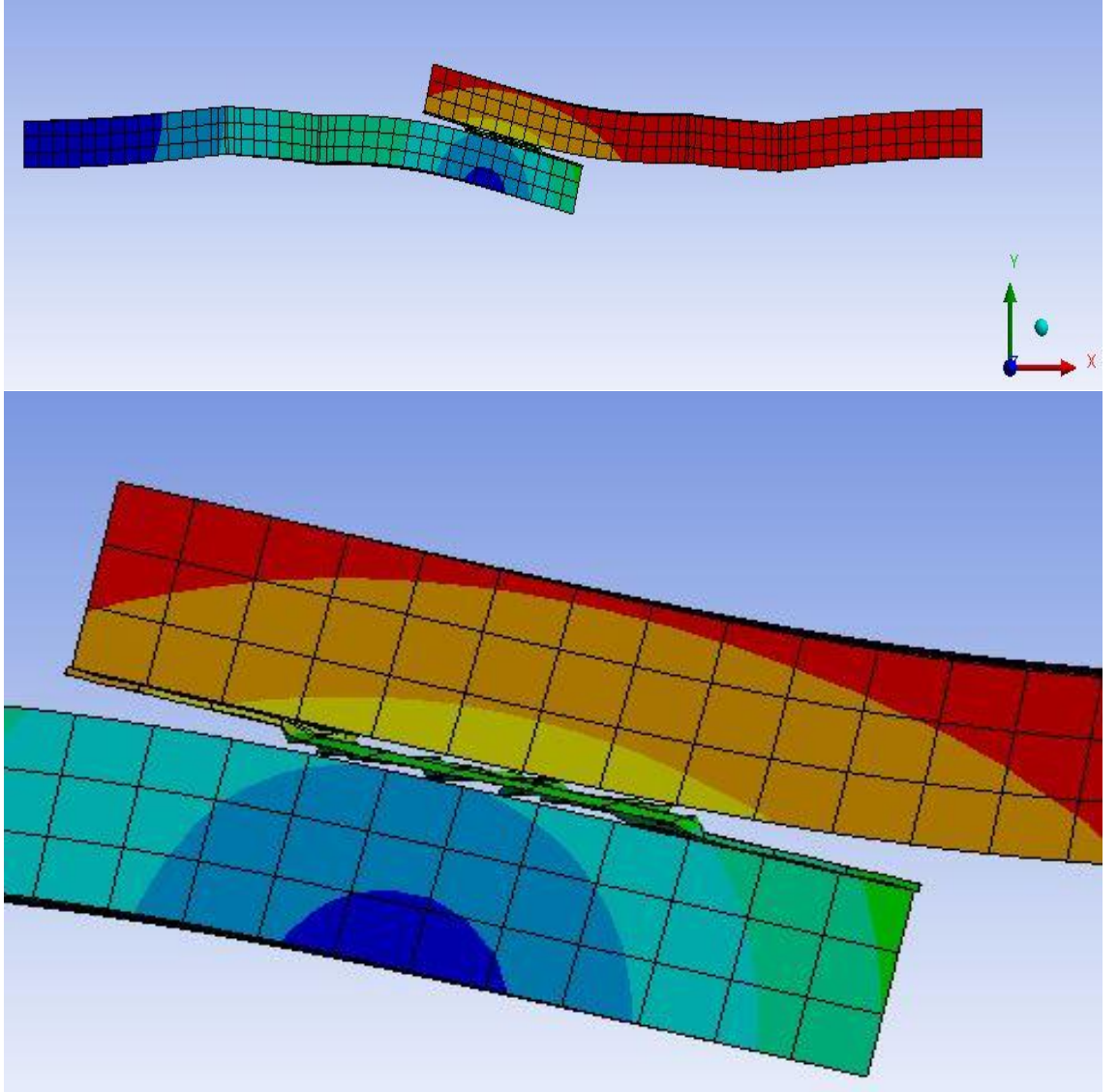


Şekil 4.8 Birinci geometri değişikli için AA2024-T3 bağlantının kopma yükü

Geometrileri değiştirilerek, çelik ve alüminyum plakalar ile yapılan bağlantıların maksimum kopma yükleri yukarıdaki grafiklerde görülmektedir. Çelik için bu değer 30782 N (Artış %11.26), alüminyum için 20675 N'dur (Artış %10.60). Sonucu veren optimum geometri ölçüleri Tablo 4.2.1.'de gösterilmiştir.

4.3. İkinci Geometri Değişikliği İle Oluşturulan Bindirme Bağlantılarının Analizi

Klasik bağlantı modeline alternatif olarak düşünülen bir diğer geometri ise, bağlantısı yapılacak plakaların belirli bir eğimde bükülmesi ile oluşturulmuştur. Bu değişikliğin amacı ilk geometride olduğu gibi kuvveti yapışma merkezi eksenine paralel olarak yakınlaştırmak ve moment etkilerini azaltmaktır.



Şekil 4.9 İkinci geometri değişikliği bağlantısında kopmanın gerçekleşmesi

Şekil 4.9’de, kuvvetin merkeze paralel uzak bir ekseninde etki etmesinden dolayı oluşan momentin etkilerini azaltmak için yapılan geometrik değişiklik sonucunda, plakalarda belirli bir eğim ile yapılan bükülmelerin açıldığı görülmektedir. Aynı zamanda bu geometrik değişiklikler ile kuvvetin paralel olarak yapışma merkezi eksenine etki etmesi hedeflenmiştir. Resimde aradaki yapıştırıcı katmanın plakalardan sıyrıldığı da görülmektedir.

↓	C1	C2	C3	C4 ☒	C5	C6
	uzaklik	yukseklk	uzunluk	kuvvet reaksiyonu	SNRA1	MEAN1
1	1,00	0,50	5,0	28470	89,0877	28470
2	1,00	1,25	12,5	29210	89,3106	29210
3	1,00	2,00	20,0	30793	89,7690	30793
4	1,00	2,75	27,5	31143	89,8672	31143
5	1,00	3,50	35,0	32007	90,1049	32007
6	3,25	0,50	12,5	28607	89,1294	28607
7	3,25	1,25	20,0	29105	89,2794	29105
8	3,25	2,00	27,5	29454	89,3829	29454
9	3,25	2,75	35,0	30231	89,6091	30231
10	3,25	3,50	5,0	33039	90,3805	33039
11	5,50	0,50	20,0	27664	88,8383	27664
12	5,50	1,25	27,5	29643	89,4384	29643
13	5,50	2,00	35,0	30458	89,6740	30458
14	5,50	2,75	5,0	32160	90,1463	32160
15	5,50	3,50	12,5	31783	90,0439	31783
16	7,75	0,50	27,5	28353	89,0520	28353
17	7,75	1,25	35,0	29101	89,2782	29101
18	7,75	2,00	5,0	30679	89,7368	30679
19	7,75	2,75	12,5	30600	89,7144	30600
20	7,75	3,50	20,0	31066	89,8457	31066
21	10,00	0,50	35,0	28261	89,0238	28261
22	10,00	1,25	5,0	30309	89,6314	30309
23	10,00	2,00	12,5	29537	89,4073	29537
24	10,00	2,75	20,0	31265	89,9012	31265
25	10,00	3,50	27,5	31154	89,8703	31154

Şekil 4.10 İkinci geometri değişikliği için taguchi metodu ile oluşturulan model kombinasyonları ve yapılan deneylerin sonuçları

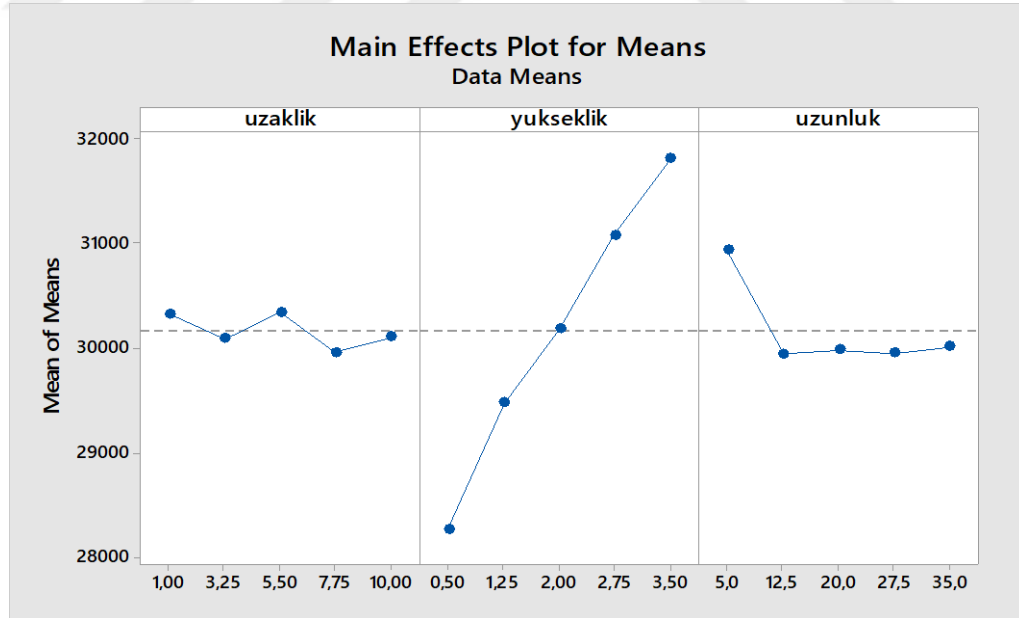
Taguchi metodu kullanılarak belirlenen optimum değerler ve en iyi sonuç veren geometri değerleri yukarıda şekil 4.10’da görülmektedir. Taguchi metoduyla belirlenen kombinasyonlar ile oluşturulan modellerin analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar

tekrardan Taguchi metodunu kullandığımız yazılıma aktarılmıştır. Böylece en etkili değişken belirlenmiştir.

Deneylerde en etkili değişkenin belirlenmesi, hangi değişken üzerinde yoğunlaşılması gerektiğinin bilinmesi açısından önemlidir. Değişkenlerin etkinlik sıralaması deneysel çalışmalarda, uygulanacak değişiklikler için önemli bir parametredir.

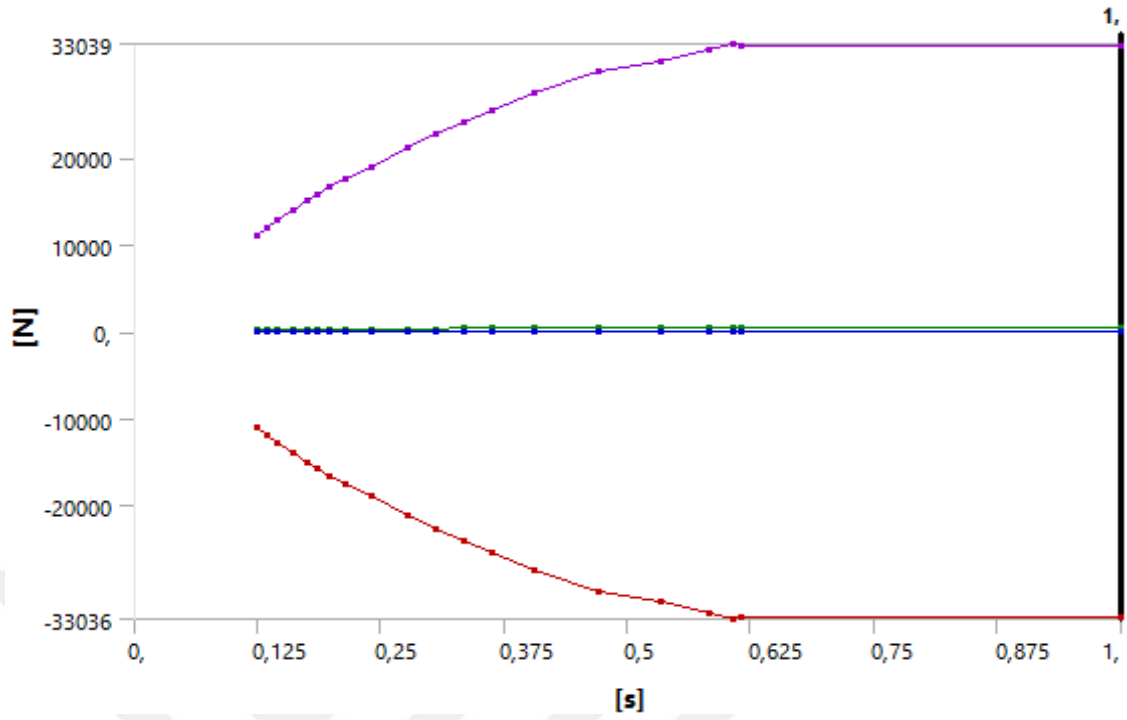
Tablo 4.2 İkinci geometri değişikliği için en etkili değişken sıralaması

Level	Uzaklık	Yükseklik	Uzunluk	Level	Uzaklık	Yükseklik	Uzunluk
1	30325	28271	30931	1	89.63	89.03	89.80
2	30087	29474	29947	2	89.56	89.39	89.52
3	30342	30184	29979	3	89.63	89.59	89.53
4	29960	31080	29949	4	89.53	89.85	89.52
5	30105	31810	30012	5	89.57	90.05	89.54
Delta	382	3539	984	Delta	0.10	1.02	0.28
Rank	3	1	2	Rank	3	1	2

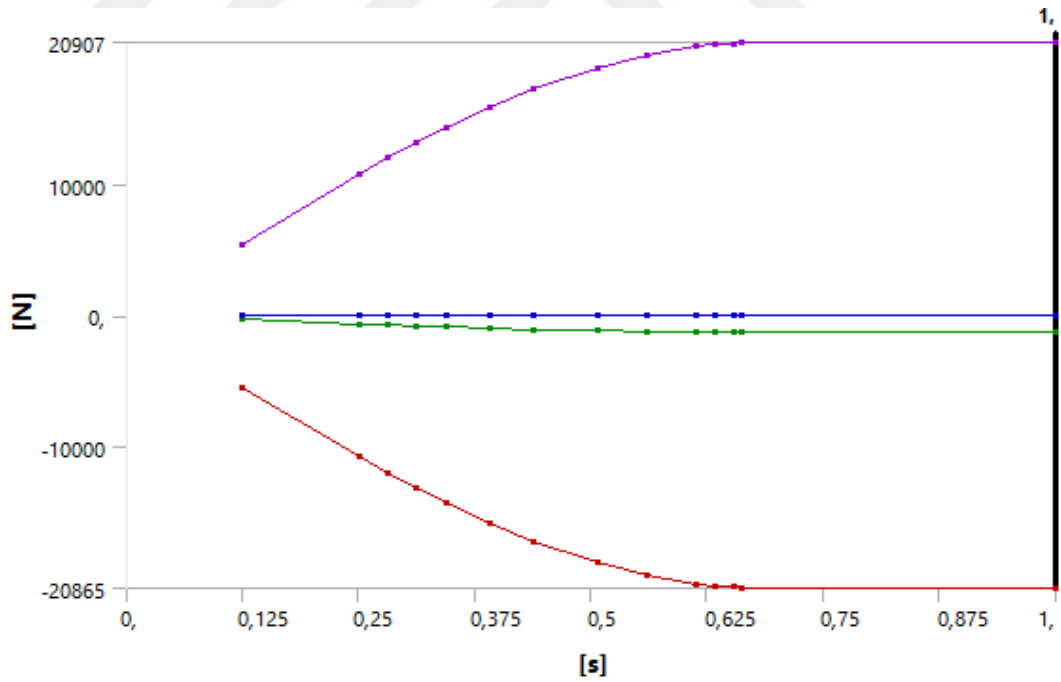


Şekil 4.11 İkinci geometri değişikliği için en etkili değişken sıralaması

Yukarıdaki tablolarda ikinci geometri için de en etkili değişkenin yükseklik olduğu görülmektedir. Yüksekliğin yanı sıra diğer değişkenlerin de etkinlik sıralaması tablolardan okunabilmektedir.



Şekil 4.12 İkinci geometri değişikliği için 50CrV4 bağlantının kopma yükü



Şekil 4.13 İkinci geometri değişikli için AA2024-T3 bağlantının kopma yükü

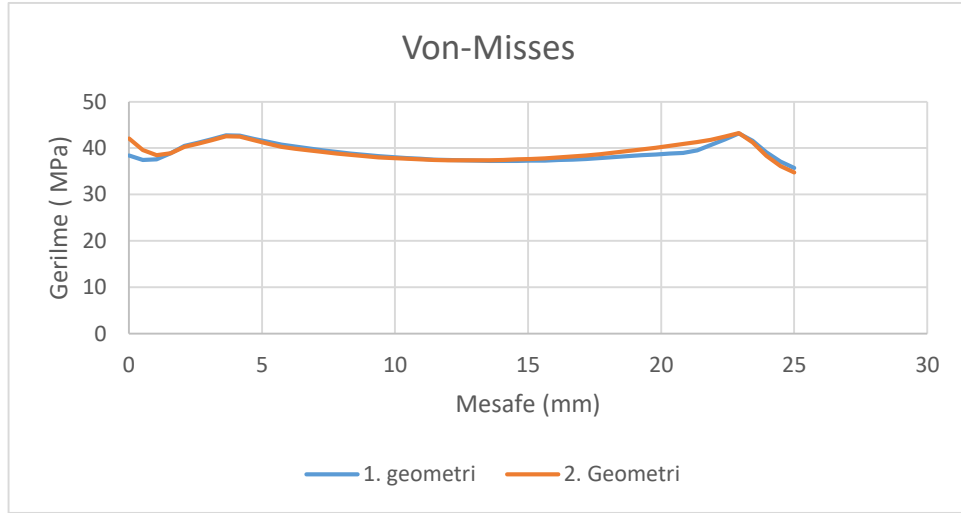
Geometrileri değiştirilerek, çelik ve alüminyum plakalar ile yapılan bağlantıların maksimum kopma yükleri Grafik 4.3.2. ve Grafik 4.3.3.'te görülmektedir. Çelik için bu değer 33039 N (Artış %19,42), alüminyum için 20907 N'dur (Artış %11,83).

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada çekme yüküne maruz bırakılan tek tesirli bindirme bağlantılarında, kullanılan plakaların geometrilerinin değiştirilmesiyle oluşturulan yeni bağlantıların mekanik davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Plakaların malzeme özellikleri, yapıştırıcı, yapıştırıcı kalınlığı ve plaka kalınlığı tüm modellerde aynı olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta klasik bindirme bağlantısı modeli oluşturulup, daha sonra bağlantılarda geometrik değişiklikler yapılarak diğer modeller oluşturulmuştur. Çalışmanın amacına ulaşip ulaşmadığının belirlenebilmesi adına sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan analizlerin grafiksel sonuçları;

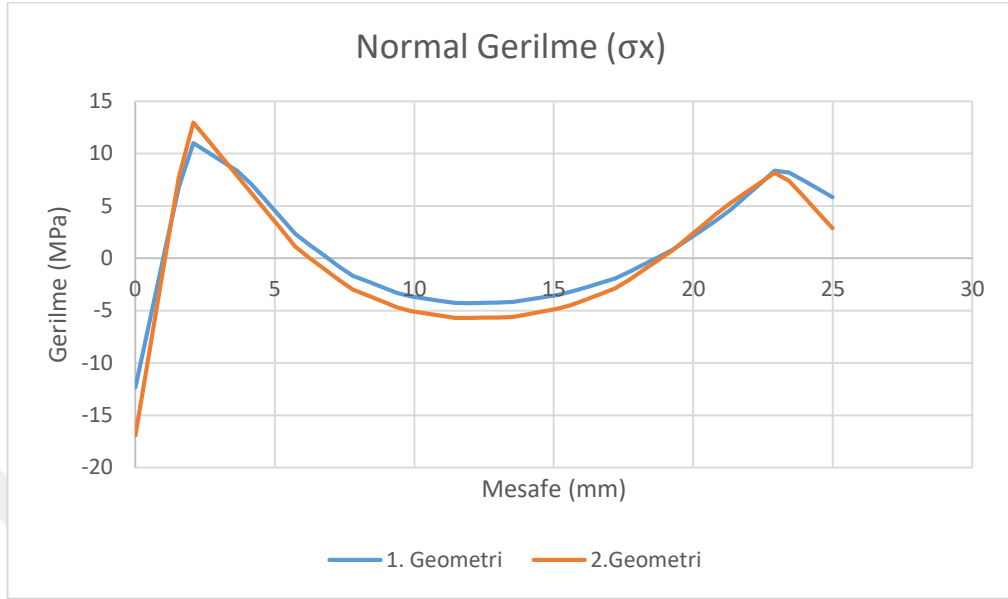
Yapılan analizlerin yorumlanabilmesi için yapıştırıcı yüzeyi boyunca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapıştırıcının ortasında bir çizgi (Path) oluşturulmuştur. Daha sonra bu çizgi boyunca oluşan gerilme değerleri incelenmiştir. Gerilmelerin incelenebilmesi için plakalara uygulanacak bir kuvvet belirlenmiştir. Bu kuvvet çelik için normal geometride bulunan kopma kuvvetinin yaklaşık olarak yarısı, 13835 N'dur.



Şekil 5.1 Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin von-misses gerilmeleri

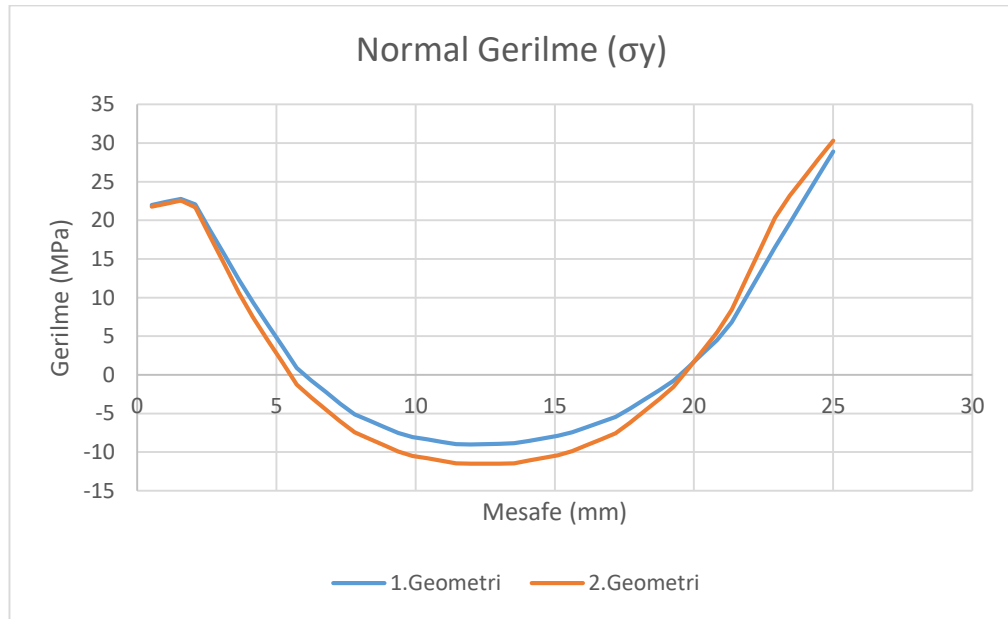
Grafikte görüldüğü üzere belirlenen kuvvet (Normal geometri için bulunan kopma kuvvetinin yaklaşık olarak yarısı, 13835 N) plakalara uygulanmaya başladıktan sonra daha yüksek gerilmeler meydana gelmeye başlamıştır. Daha sonra mesafe ilerledikçe bu gerilmenin azaldığı ve sonra tekrar artmaya başladığı görülmüştür. Son olarak belirli bir

mesafeden sonra tekrar azalmıştır. Bu durum yapılan geometri değişikliklerinin olumlu sonuçları olarak karşımıza çıkmaktadır.

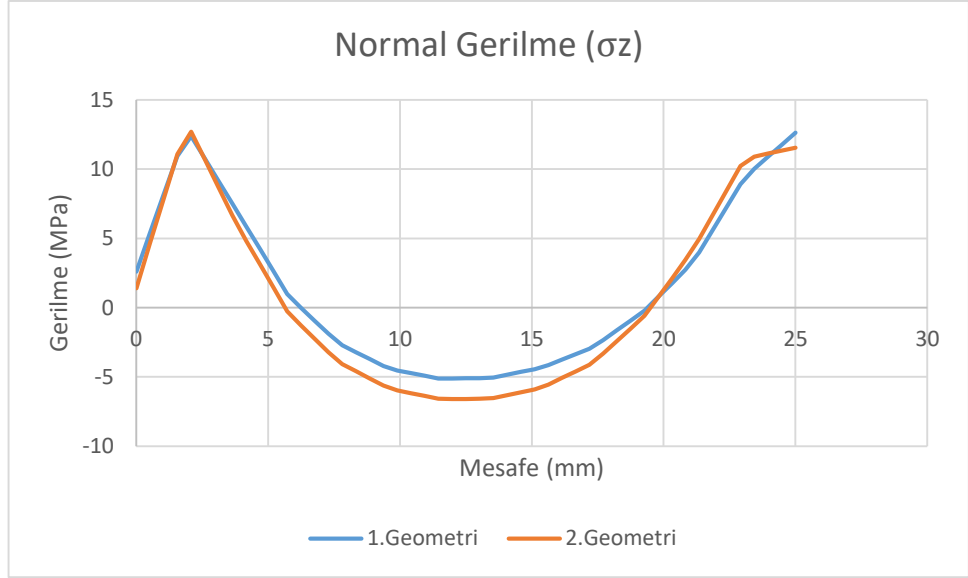


Şekil 5.2 Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin x yönündeki normal gerilmeleri

Yukarıda ki grafikte görldüğü üzere x yönündeki normal gerilmelerde de benzer türde eğriler bulunmaktadır. Bu durum normal gerilmelerde de aynı olumlu etkilerin olduğunu göstermektedir.

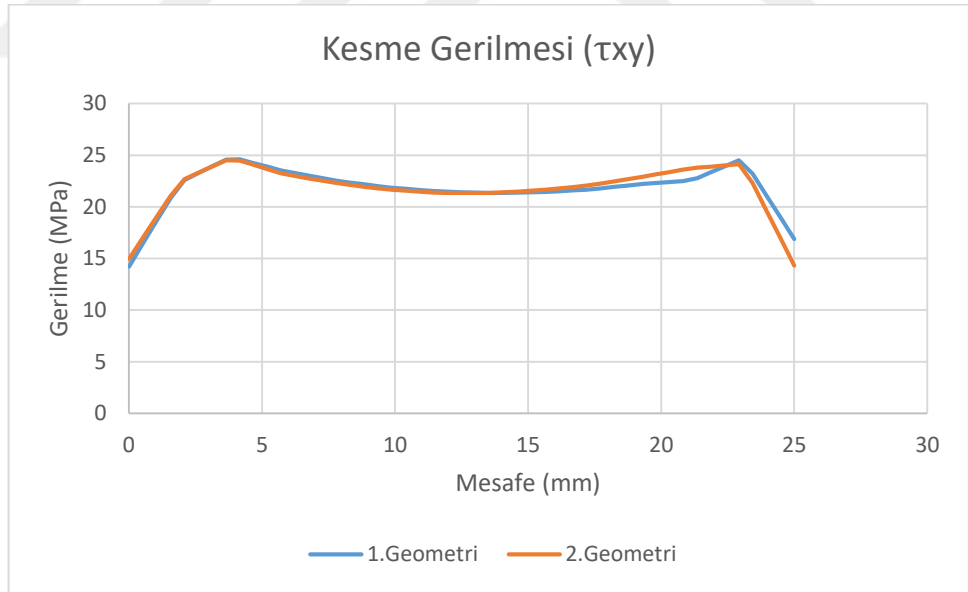


Şekil 5.3 Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin y yönündeki normal gerilmeleri



Şekil 5.4 Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin z yönündeki normal gerilmeleri

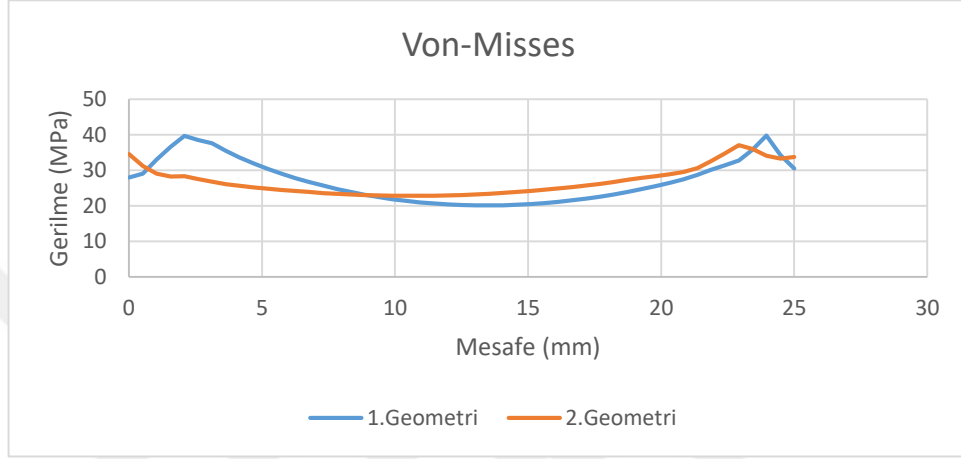
Birinci ve ikinci geometrilerde x, y, z yönlerindeki normal gerilmelerin tümünde birbirine benzeyen grafikler görülmektedir. Bu durum yapılan çalışmanın olumlu etkilerini göstermektedir.



Şekil 5.5 Çelik için birinci ve ikinci geometrilerin xy' deki kayma gerilmeleri

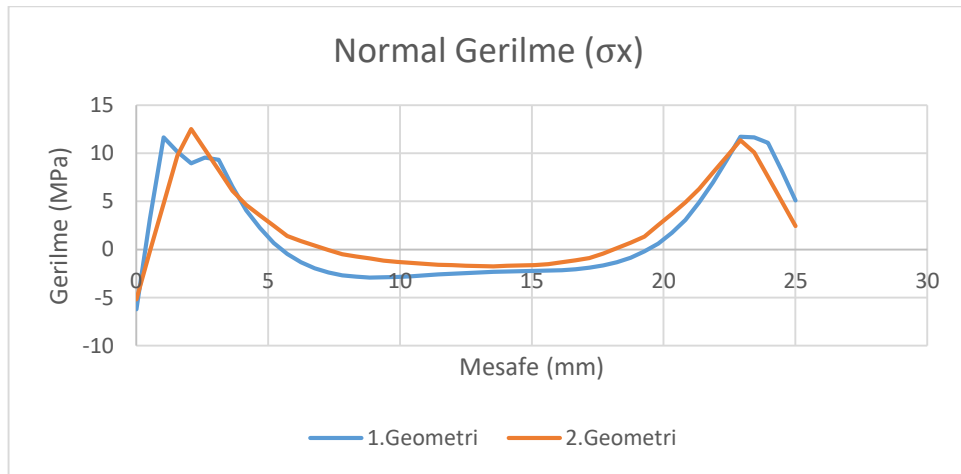
Uygulanan kuvvet neticesinde yapıştırıcıda belirlenen çizgi üzerinde kayda değer sadece xy'de kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Bu gerilmeler de normal gerilmelerde olduğu gibi grafikte aynı eğrileri oluşturmuştur. Bu durum olumlu sonuçların kayma gerilmelerinde de devam ettiğini göstermektedir.

Alüminyum için yapılan analizlerin yorumlanabilmesi için yapıştırıcı yüzeyi boyunca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapıştırıcının ortasında bir çizgi (Path) oluşturulmuştur. Daha sonra bu çizgi boyunca oluşan gerilme değerleri incelenmiştir. Gerilmelerin incelenebilmesi için plakalara uygulanacak bir kuvvet belirlenmiştir. Bu kuvvet alüminyum için normal geometride bulunan kopma kuvvetinin yaklaşık olarak yarısı, 9350 N'dur.



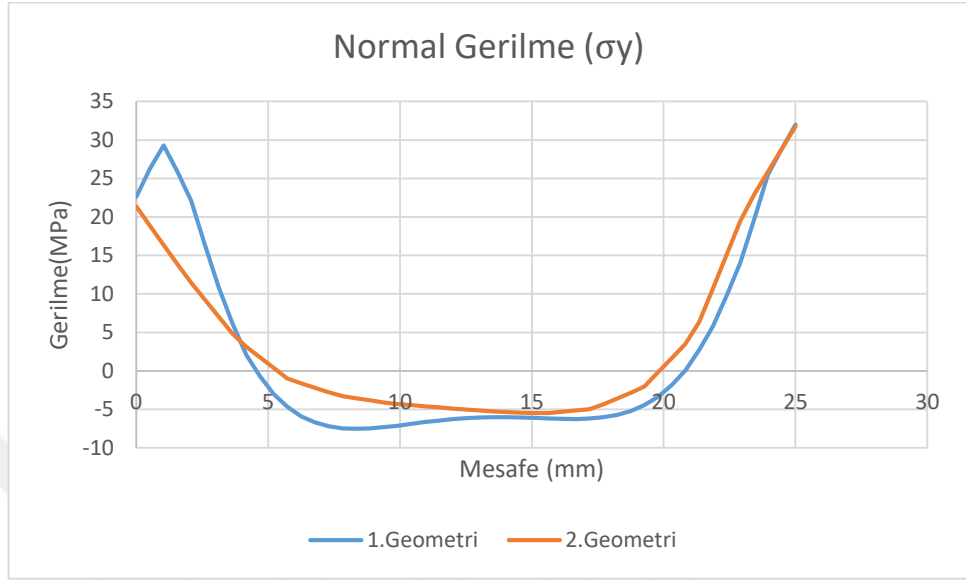
Şekil 5.6 Alüminyum İçin Birinci ve İkinci Geometrilerin Von-Misses Gerilmeleri

Grafikte görüldüğü üzere belirlenen kuvvet (Normal geometri için bulunan kopma kuvvetinin yaklaşık olarak yarısı, 9350 N) plakalara uygulanmaya başladıktan sonra daha yüksek gerilmeler meydana gelmeye başlamıştır. Daha sonra mesafe ilerledikçe bu gerilmenin azaldığı ve sonra tekrar artmaya başladığı görülmüştür. Son olarak belirli bir mesafeden sonra tekrar azalmıştır.

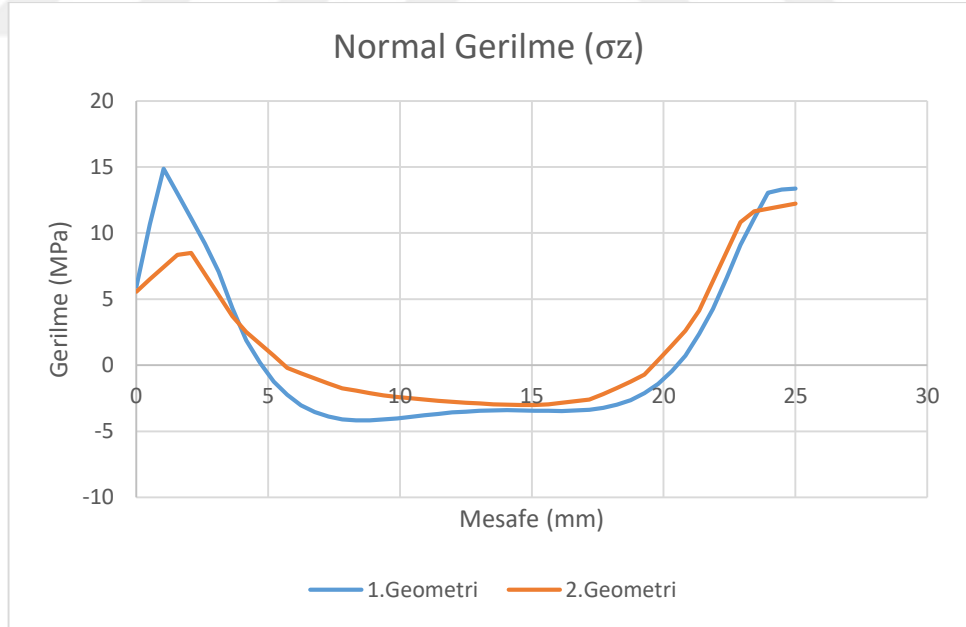


Şekil 5.7 Al için birinci ve ikinci geometrilerin x yönündeki normal gerilmeleri

Yukarıda ki grafikte görüldüğü üzere x yönündeki normal gerilmelerde de benzer türde eğriler bulunmaktadır. Bu durum normal gerilmelerde de aynı olumlu etkilerin olduğunu göstermektedir.

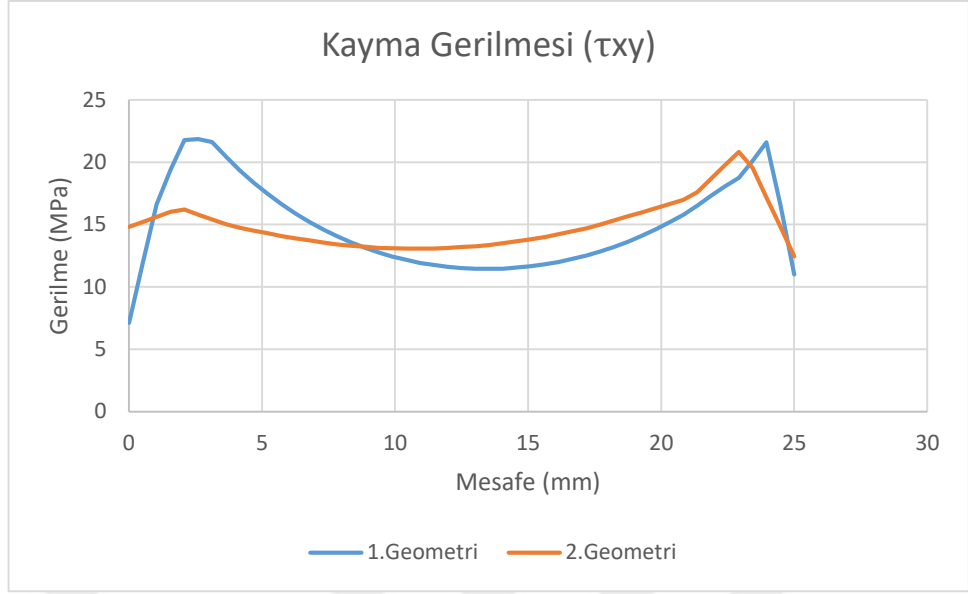


Şekil 5.8 Al için birinci ve ikinci geometrilerin y yönündeki normal gerilmeleri



Şekil 5.9 Al için birinci ve ikinci geometrilerin z yönündeki normal gerilmeleri

Birinci ve ikinci geometrilerde x, y, z yönlerindeki normal gerilmelerin tümünde birbirine benzeyen grafikler görülmektedir. Bu durum yapılan çalışmanın olumlu etkilerini göstermektedir.



Şekil 5.10 Al için birinci ve ikinci geometrilerin xy’ deki kayma gerilmeleri

Uygulanan kuvvet neticesinde yapıştırıcıda belirlenen çizgi üzerinde kayda değer sadece XY’de kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Bu gerilmeler de normal gerilmelerde olduğu gibi grafikte aynı eğrileri oluşturmuştur. Bu durum olumlu sonuçların kesme gerilmelerinde de devam ettiğini göstermektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Çalışma sırasında oluşturulan modellerdeki malzemeler aynı özelliklerde kullanılarak geometrinin dayanım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yeni geometriler, uygulanan kuvveti yapışma eksenine paralel olarak yakınlaştırmış, bunun sonucunda moment değerini ve etkilerini azaltmıştır.
- Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirmeli bağlantılarda kullanılan plakaların malzemeleri 50CrV4 (Yay Çeliği) ve AA2024-T3 (Alüminyum Alaşım) olarak seçilmiştir. Yapıştırıcı ise DP460 olarak belirlenmiştir. Geometrisi değiştirilen bağlantılarda plakası çelik olanların, alüminyum olanlara oranla daha fazla dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun bağlantıda kullanılan malzemenin, oluşan momentin etkisi ile plakalardaki bükülmelere karşı gösterdiği direnç ile alakalı olduğu anlaşılmıştır.
- Bahsedilen geometri değişimlerinden ilkinin, ikinci geometriye göre yük taşıma kapasitesinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. İkinci geometri için kopma

yükünün en yüksek değeri 33039 N, ilk geometri için kopma yükünün en yüksek değeri 30782 N'dur.

- Yeni geometrilerde üç adet değişken (uzaklık,yükseklik,izdüşüm) kullanılmıştır. Bu değişkenlerin optimum değerlerinin belirlenmesinde taguchi yöntemine başvurulmuştur. Kullanılacak değerler elde edildikten sonra taguchi metodu ile en uygun model kombinasyonları belirlenmiştir. Bunun sonucunda ilk geometri için en uygun değerlerin sırası ile 35 mm (izdüşüm), 3,5 mm (yükseklik), 7,75 mm (uzaklık) olduğu, ikinci geometri için optimum değerlerin sırasıyla 5 mm (izdüşüm), 3,5 mm (yükseklik), 3,25 mm (uzaklık) olduğu saptanmıştır.
- Yapılan bütün analizlerin sonuçlarını inceleyerek hangi değişkenin daha etkili olduğunu bulmamız çalışmanın ileriki seviyelere taşınması açısından önemlidir. Model analizlerinin sonuçlarını yazılıma aktardığımızda en etkili değişkenlerin sırasıyla yükseklik, izdüşüm ve uzaklık olduğu görülmüştür.
- DP460 yapıştırıcının daha mukavemetli bir plaka grubunda birleştirme işlemini gerçekleştirmesi durumunda bağlantının daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Araştırma ve analiz sonuçlarına göre yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirmeli bağlantılarda, bağlantısı gerçekleştirilecek plakalar üzerinde yapılması düşünülen geometrik değişikliklerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinin istenilen sonuçları verdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Adams, RD and Peppiatt, NA (1974) “ Stress analysis of adhesive lap joints”, *Journal of stress analysis* , 9 (3), 185-196.
- Adams, R. D., Adams, R. D., Comyn, J., Wake, W. C., and Wake, W. C. (1997) “Structural adhesive joints in engineering”, *Springer Science and Business Media*, 13-14.
- Akpınar, S. (2013) “Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis”, *Materials and Design*, 51, 501-512.
- Akpınar, S. (2013) “ Effects of different curvature patches on the strength of double-strap adhesive joints”, *The Journal of Adhesion*, 89(12), 937-947.
- Akpınar, S. and Aydın, M.D., (2014) “3-D Non-Linear Stress Analysis on the Adhesively Bonded Composite Joint Under Bending Moment”, *International Journal of Mechanical Science*, 81, 149-157.
- Aydın, H. (2007) “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ters z tipi kompozit malzeme bağlantılarının mekanik analizi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 20-35.
- Aydın, M. D. (2003) “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 18-24.
- Aydın, Ş. I. K., Ertürk, İ., ve Önder, M. (2010) “AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 139-147.
- Banea, M. D., and da Silva, L. F. (2009) “Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials”, *Design and Applications*, 223(1), 1-18.
- Baylak, M. O. K. (2017) “Reçinelerin kayma değerlerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 20-30.
- Can, H. (2016) “T-bağlantılarda (T-joint) yapıştırıcı ve malzemenin çekme dayanımına etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 25-35.
- Canıyılmaz, E. (2001) “Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu ve Bir Örnek Uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-20.
- Çalık, A. (2008) “Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 40-50.

- Çitil, Ş. (2019) “Investigation of curved and scarf lap joints subjected to tensile loads using the cohesive zone model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(17), 6149-6156.
- Demirgen, T. (2007) “Metal yapıştırma bağlantı performansının bilgisayar destekli modelleme ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 50-55.
- Derjaguin, B. V., and Smilga, V. P. (1967) “Electronic theory of adhesion”, *Journal of applied Physics*, 38(12), 4609-4616.
- Fish, J., and Belytschko, T. (2007) “A first course in finite elements”, *New York: John Wiley and Sons*, 9(11), 1-10.
- Fıyoudj, A. (2015) “Farklı Kalınlık Ve Binderme Uzunluğundaki Yapıştırma Bağlantılarında Farklı Malzeme Özelliklerinin Yük Taşıma Kapasitesine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-50
- Ghaffarzadeh, H. (2015) “Eğilmeye zorlanan yapıştırma bağlantılarında hasar analizi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 35-43.
- Güler, M., and Sadri, Ş. E. N. (2015) “Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler” *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S., and Pang, S. S. (2010) “Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints”, *International Journal of Solids and Structures*, 47(18-19), 2445-2458.
- Karaoğlu, S. (2004) “Az Alaşımlı Çeliklerde Karbon Miktarının Plazma Nitrürasyonu Davranışına Etkisi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2), 47-52.
- Kayı, Y. (2006) “Plastik enjeksiyon prosesindeki parametrelerin çekme problemine etkilerinin taguchi metodu ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 40-43.
- Kazaz, I., Akpınar, S., and Ozel, A. (2020) “The effects of thermal cycle and nanostructure reinforcement on the shear load in adhesively bonded joints”, *Mechanics of advanced materials and structures*, 27(19), 1627-1638.
- Kinloch, A. J., and Kinloch, A. J. (1987) “Adhesion and adhesives: science and technology”, *Springer Science & Business Media*, 4-7.
- Kirkayak, L. (2019) “Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 27-33.

- Kılık, R., 1987 “Yapıştırma ve Yapıştırma Bağlantıları”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Enstitüsü*, 526-531.
- McBain, J. W., and Hopkins, D. G. (2002) “On adhesives and adhesive action”, *The Journal of Physical Chemistry*, 29(2), 188-204.
- Ojalvo, I. U., and Eidinoff, H. L. (1978) “Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints”, *AIAA journal*, 16(3), 204-211.
- Özel, A., Kadioğlu, F., Şen, S., ve Sadeler, R. (2003) “Dört nokta eğilme yükünde yapışkan bağlantıların sonlu eleman analizi”, *Yapışma Dergisi*, 79 (7), 683-697.
- Özel, A., Aydın, M., and Temiz, Ş. (2004). “The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment”, *Journal of adhesion science and technology*, 18(3), 313-325.
- Özenç, M. (2007) “Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 38-45.
- Parvatareddy, H. (1997) “Durability of polyimide adhesives and their bonded joints for high-temperature applications”, Doctoral Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 28-30.
- Saraç, İ. (2021) “Yapıştırma Bağlantılarında Kohezif Bölge Modeli Uygulayarak Ve Uygulamadan Modelleme Yapılmasının Gerilme Dağılımına Etkisinin Araştırılması”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Adıyaman, 8(15), 457-468.
- Sawa, T., Liu, J., Nakano, K., and Tanaka, J. (2000) “A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads”, *Journal of adhesion Science and Technology*, 14(1), 43-66.
- Sayman, O. (2012) “Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint”, *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 204-209.
- Schönhorn, H., and Sharpe, L. H. (1965) “Surface tension of molten polypropylene”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters*, 3(3), 235-237.
- Sharpe, L. H., and Schönhorn, H. (1963) “Theory gives direction to adhesion work”, *Chemical and engineering news*, 41(15), 67-68.
- Stein, N., Rosendahl, P. L., and Becker, W. (2018) “Modelling load transfer and mixed-mode fracture of ductile adhesive composite joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 82, 299-310.
- Voyutskii, S. S., and Vakula, V. L. (1963) “The role of diffusion phenomena in polymer-to-polymer adhesion”, *Journal of Applied Polymer Science*, 7(2), 475-491.
- Xu, W., and Wei, Y. (2012) “Strength and interface failure mechanism of adhesive joints”, *International journal of adhesion and adhesives*, 34, 80-92.