

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESLERİNDE İZ YÜRÜMESİNİN
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖNDER KAYA

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2025

10692665

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESLERİNDE İZ YÜRÜMESİNİN
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖNDER KAYA

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2025

10692665

BEYAN

“Sac metal şekillendirme proseslerinde iz yürümesinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi”adlı yüksek lisans yeterlik tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
		x	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Önder KAYA

.../.../2025

İmza

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde yardımlarını, görüşlerini ve değerli bilgilerini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Emre ESENER'e katkı ve emeklerinden dolayı kendisine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın büyük bir bölümünde tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen Mustafa YENİCE , Yahya GÜNEŞ ve COŞKUNÖZ Ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım hayatım boyunca sabırlarını ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, her zaman yanımda duran aileme teşekkür ederim.

Önder KAYA

2025

ÖZET

SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESLERİNDE İZ YÜRÜMESİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Otomotiv endüstrisinde rekabetin artmasıyla beraber markaların birbirine üstünlük sağlaması temeline dayanan agresif görünümlü araçlar artmaktadır. Araçlar, agresif stil hatlarına sahip olduklarında beraberinde fizibilite sorunlarını da getirmektedirler. Bu çalışmada, araçların görünür sac parçalarında, şekillendirme esnasında meydana gelen deformasyonlardan biri olan iz yürümesi davranışının tespiti için deneysel ve nümerik olarak çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, panel parçalarda sıklıkla kullanılan 0.73 mm kalınlığında CR4 malzeme, 1000 mm x 80 mm'lik numune tipi seçilmiştir. Sorunun tespiti için deneysel çalışmalarda 3 piston yardımıyla hidrolik test cihazı kullanılmıştır. Numuneyi sıkıştırmak için üst tampon kuvveti değişken (40 kN, 50 kN, 60 kN) olarak belirlenmiştir. Üst tampon sac parçayı tuttuğu esnada aynı anda hem çekirme çelikleri 100 mm/s hızla sacı bir yönde 110 mm hareket ettirmiştir, hem de R8 zımba, sacı 50 mm kurs ve 100 mm/s hızla şekillendirmeye zorlamıştır. Bu çalışma neticesinde sacın altında ve üstünde oluşan deformasyonlar ölçülmüştür. Sonlu elemanlar analizi programında ise aynı hız ve kuvvet parametreleri ile Hill48 plastite modeli kullanılmıştır. Bu çalışma neticesinde ise sonlu elemanlar analizi programındaki iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktılarıyla sorunun tespiti ölçüsel olarak ortaya koyulmuştur. Deneysel ve nümerik yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda sonlu elemanlar yazılımındaki iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktılarının deneysel sonuçlardaki farklılıkları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu, sonlu elemanlar analizleri, sac metal şekillendirme

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SKIDLINE IN SHEET METAL FORMING PROCESSES

With the increase in competition in the automotive industry, aggressive looking vehicles based on brands gaining superiority over each other are increasing. When vehicles have aggressive style lines, they also bring feasibility problems with them. In this study, experimental and numerical studies were conducted to determine the skidline behavior, which is one of the deformations that occur during forming in the visible sheet metal parts of vehicles. In this direction, 0.73 mm thick CR4 material, which is frequently used in panel parts, 1000 mm x 80 mm sample type was selected. In order to determine the problem, a hydraulic test device was used with the help of 3 pistons in the experimental studies. The upper buffer force was determined as variable (40 kN, 50 kN, 60 kN) to compress the sample. While the upper buffer was holding the sheet metal part, both the pulling steels moved the sheet metal 110 mm in one direction at a speed of 100 mm/s at the same time, and the R8 punch forced the sheet metal to be shaped with a 50 mm stroke and a speed of 100 mm/s. As a result of this study, the deformations formed under and above the sheet were measured. In the finite element analysis program, the Hill48 plasticity model was used with the same speed and force parameters. As a result of this study, the problem was determined with the skidlines, unbending strain and contact pressure outputs in the finite element analysis program. The results of the experimental and numerical methods were compared. As a result of the comparisons, the differences in the experimental results of the skidlines, unbending strain and contact pressure outputs in the finite element software were determined.

Keywords: Skidline, unbending strain, finite element analysis, sheet metal forming

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.İZ YÜRÜMESİ KAVRAMI.....	9
3.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	17
4.UYGULAMA ÇALIŞMASI	24
4.1 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
4.2 SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ.....	36
4.3 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	36
5.DEĞERLENDİRME.....	64
KAYNAKÇA	66

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan eleman ve ağ yapısı parametreleri	28
Tablo 4.2. CR4 malzemesine ait mekanik özellikler	29
Tablo 4.3. SEA yazılımında kullanılan değişkenler	30
Tablo 4.4. Simülasyon değerlendirme kriterleri	31



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Parça üretim süreci.....	1
Şekil 1.2. Proses tasarım görseli	1
Şekil 1.3. Döküm kalıp tasarımı.....	2
Şekil 1.4. Sonlu elemanlar analizi simülasyon görüntüsü	7
Şekil 1.5. Sac şekillendirmede deformasyon örnekleri.....	4
Şekil 2.1. Yeni araç tasarımlarındaki agresif form örnekleri	5
Şekil 2.2. İz yürümesi görseli.....	6
Şekil 2.3. Dış panel parçada iz yürümesi örneği.....	7
Şekil 2.4. İz yürümesi limit diyagramı.....	7
Şekil 2.5. SEA yazılımında iz yürümesinin görseli ve ölçümü	9
Şekil 2.6. SEA yazılımında bükülmezlik deformasyonu görüntüsü	10
Şekil 2.7. Temas basıncı şematik gösterimi	11
Şekil 2.8. Autoform programında malzeme kartı görseli.....	12
Şekil 2.9. Autoform’da bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktısının farkları	12
Şekil 2.10. Autoform’da iz yürümesinin çıktısının ölçümü.....	13
Şekil 3.1. Eleman ve düğüm noktaları	17
Şekil 3.2. Autoform’da Hill48 plastisite modeline sahip CR420LA malzemesi	18
Şekil 3.3. Örnek uzama-gerilme ve % uzama ve gerilme grafikleri	20
Şekil 3.4. Nakajima testi görseli	20
Şekil 3.5. FLC grafiği	21
Şekil 4.1. Hidrolik test cihazında deney düzeneği	23
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan numune tipi ve ebatları	24
Şekil 4.3. Deney düzeneği ve değişkenleri	24

Şekil 4.4. Sacın altındaki iz yürümesi sonuçları	25
Şekil 4.5. Deformasyon tespiti için taş sürme işlemi	26
Şekil 4.6. Taş sürülmüş numunelerdeki deformasyon ölçümleri	26
Şekil 4.7. R8 zımbaya gelen kuvvetlerin karşılaştırılması	27
Şekil 4.8. Autoform’da kullanılan Çeliklerin ağ yapıları	28
Şekil 4.9. Autoform’da CR4 malzemesine ait malzeme kartı görseli	29
Şekil 4.10. SEA yazılımında kullanılan açınım bilgileri	30
Şekil 4.11. SEA yazılımındaki genel değişkenler ve yapı	30
Şekil 4.12. İz yürümesi sonuçları	31
Şekil 4.13. Bükülmezlik deformasyonu sonuçları	31
Şekil 4.14. Temas basıncı sonuçları	32
Şekil 4.15. Tampon kuvvetine bağlı deformasyon mesafeleri	32
Şekil 4.16. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında oluşan deformasyon mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	33
Şekil 4.17. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında oluşan deformasyon mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	33
Şekil 4.18. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında oluşan deformasyon mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	34
Şekil 4.19. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	35
Şekil 4.20. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	35
Şekil 4.21. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	36
Şekil 4.22. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	37
Şekil 4.23. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	37

Şekil 4.24. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	38
--	-----------



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SEA: Sonlu Elemanlar Analizi

σ : Akma Gerilmesi Değeri

σ_0 : Hadde yönünde ki akma gerilmesi değeri

σ_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{12} : Çift Eksenli Akma Gerilmesi Değeri

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal Gerilmeler

$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$: Kayma Akma Gerilmeleri

r : Anizotropi Katsayısı

r_0 : Hadde yönünde ki anizotropi değeri

r_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi değeri

r_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi değeri

F, G, H, L, M ve N: Anizotropi katsayılarına ve akma gerilmelerine bağlı sabitler

M: Malzemenin kristal kafes yapısına bağlı üstel

a, c, h, k1, k2, p: Barlat-89 plastisite modeline bağlı katsayılar

SIGY, ϵ_{eff} , P, C, σ_y , s: Parça Boyunca Lineer Plastisite Sabitleri

R: Zımba Yarı Çapı

mm: Milimetre

s: Saniye

MPa: Megapaskal

kN: Kilo Newton

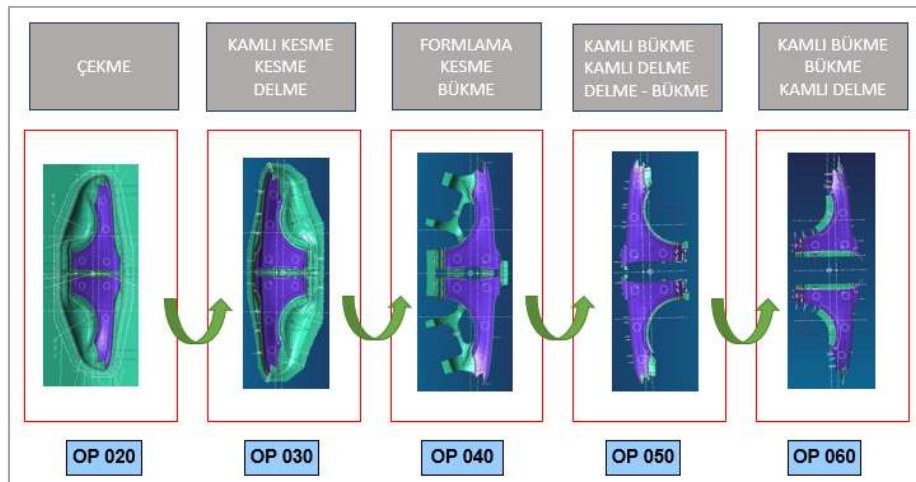
1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme, metal şekillendirme endüstrisinin temel süreçlerinden biridir ve birçok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, beyaz eşya, havacılık ve inşaat sektörlerinde, farklı metal bileşenlerin üretimi için sac metal şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir. Bu süreç, metal levhaların belirli bir şekle sokulması amacıyla çeşitli yöntemlerle yapılır ve genellikle yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektirir. Bu yöntemler kabaca, bükme, çekme, kesme ve delme gibi sıralanabilir. Sac metal şekillendirme, genellikle deforme olabilen metal levhaların presler, kalıplar gibi ekipmanlarla şekillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Şekil 1.1’de sac şekillendirme süreçlerindeki parça üretim süreci verilmiştir.



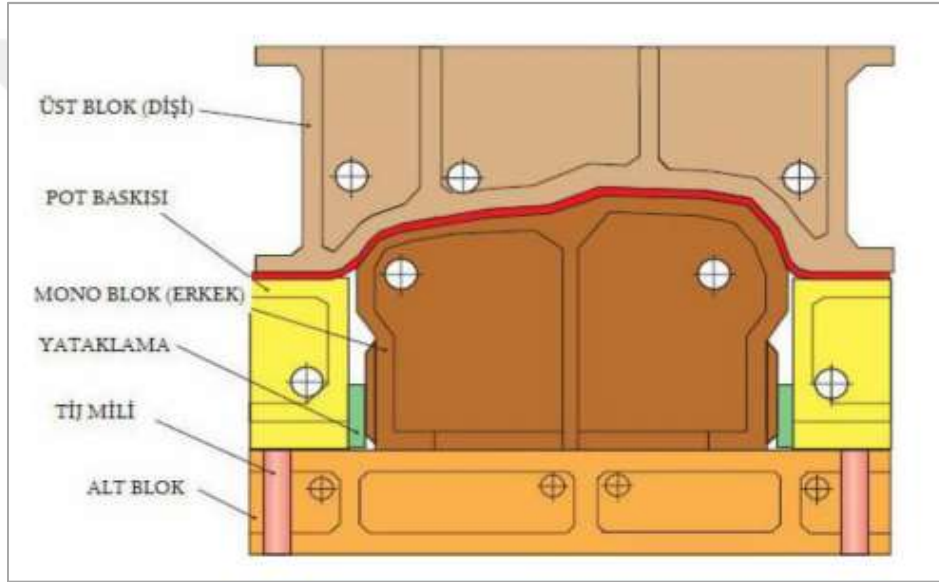
Şekil 1.1. Parça üretim süreci

Bu süreçler, metalin elastik ve plastik deformasyon özelliklerine dayanır ve oldukça karmaşık fiziksel davranışları içerir. Sac metal şekillendirme, bu nedenle malzeme bilimi, mekanik mühendislik, proses tasarımı ve kalıp tasarımı alanlarındaki çeşitli disiplinlerin birleşimidir. Bu alandaki süreçlerin verimliliği ve doğruluğu, hem üretim maliyetlerini hem de ürünün kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Şekil 1.2’de örnek bir proses tasarımı görseli verilmiştir.



Şekil 1.2. Proses tasarım görseli

Sac metal şekillendirme sürecinde karşılaşılan zorluklar, malzeme özellikleri, proses parametreleri ve şekillendirme ekipmanının etkileşimi gibi bir dizi faktörden kaynaklanmaktadır. Metalin şekillendirme sırasında yaşadığı gerilim, plastik deformasyon, aşınma ve yorulma gibi davranışlar, kalıp tasarımını ve üretim parametrelerini doğrudan etkiler. Bu tür problemler, üretim sürecinin verimliliğini ve nihai ürünün kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, sac metal şekillendirme süreçlerinin optimize edilmesi ve bu süreçlerde karşılaşılan problemlerin en aza indirilmesi, endüstriyel üretimin temel hedeflerinden biridir. Şekil 1.3’de örnek bir döküm kalıp tasarımı görseli verilmiştir.

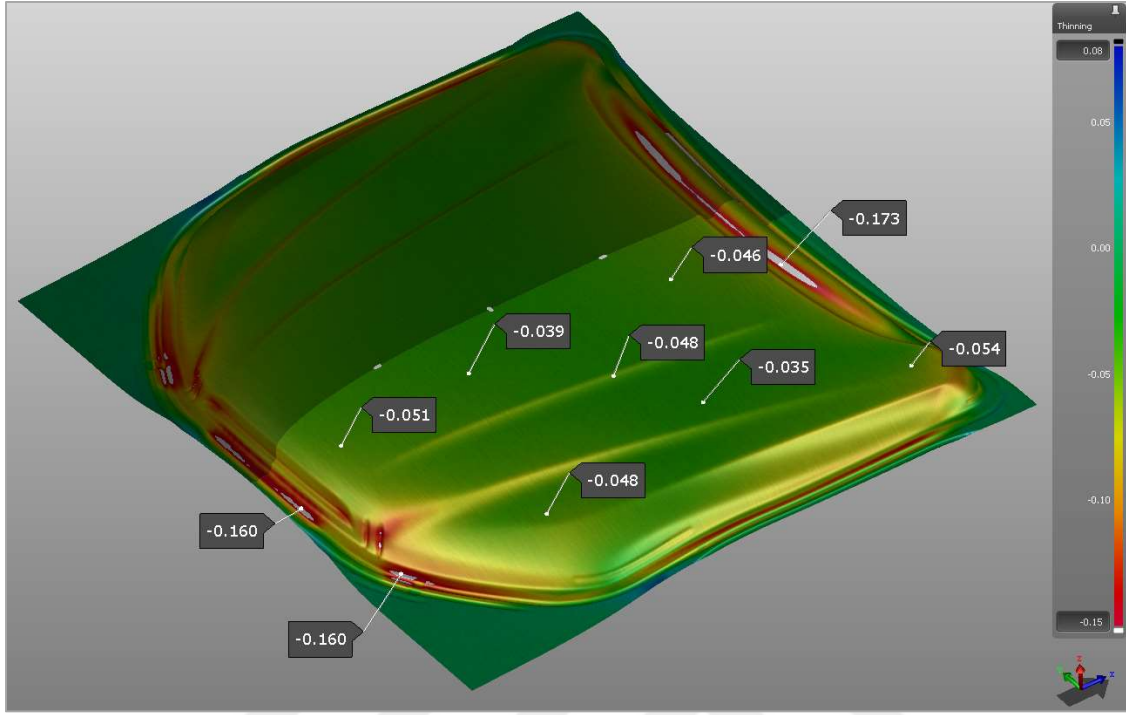


Şekil 1.3. Döküm kalıp tasarımı

Kaynak: (Schuler, 1998)

Bu problemleri anlamak ve çözmek için, geleneksel deneysel yöntemler sıklıkla kullanılsa da, son yıllarda numerik analiz yöntemlerinin büyük bir öneme sahip olduğu görülmektedir. Bilgisayar destekli mühendislik yazılımları ve sonlu elemanlar yöntemi (SEA) gibi teknolojiler, sac metal şekillendirme süreçlerini modelleyerek, malzeme davranışları, kalıp tasarımı, gerilim dağılımı ve deformasyonun daha doğru bir şekilde simüle edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemler, özellikle kalıp üretiminden önce olası hataları öngörerek, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, proseslerin optimizasyonu ve iyileştirilmesi adına

önemli veriler sunarak, süreçlerin daha verimli hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 1.4’de bir parçaya ait sonlu elemanlar analizi simülasyon görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.4. Sonlu elemanlar analizi simülasyon görüntüsü

Nümerik yöntemler ile yapılan incelemeler, sac metal şekillendirme sırasında oluşabilecek çeşitli problemlerin kalıp üretiminnden önce anlaşılmasına, tespit edilmesine ve çözülmesine olanak tanımaktadır. Bu problemler arasında, örneğin; ürünün geometrik hataları, yırtılma, kırılma, geri yaylanma ve görsel hatalar gibi deformasyon türleri yer alır. Bunun yanı sıra, kalıp aşınması, sıcaklık dağılımlarının etkileri ve gerilim birikimi gibi faktörler de sac metal şekillendirme sürecinde karşılaşılan zorluklardandır. Nümerik simülasyonlar, bu tür problemleri daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmeye imkan tanır ve tasarım sürecinde yapılacak iyileştirmeleri ortaya koyar. Şekil 1.5’de sac şekillendirme esnasında karşılaşılan deformasyon örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.5. Sac şekillendirme de deformasyon örnekleri

Kaynak: (Lim, 2010)

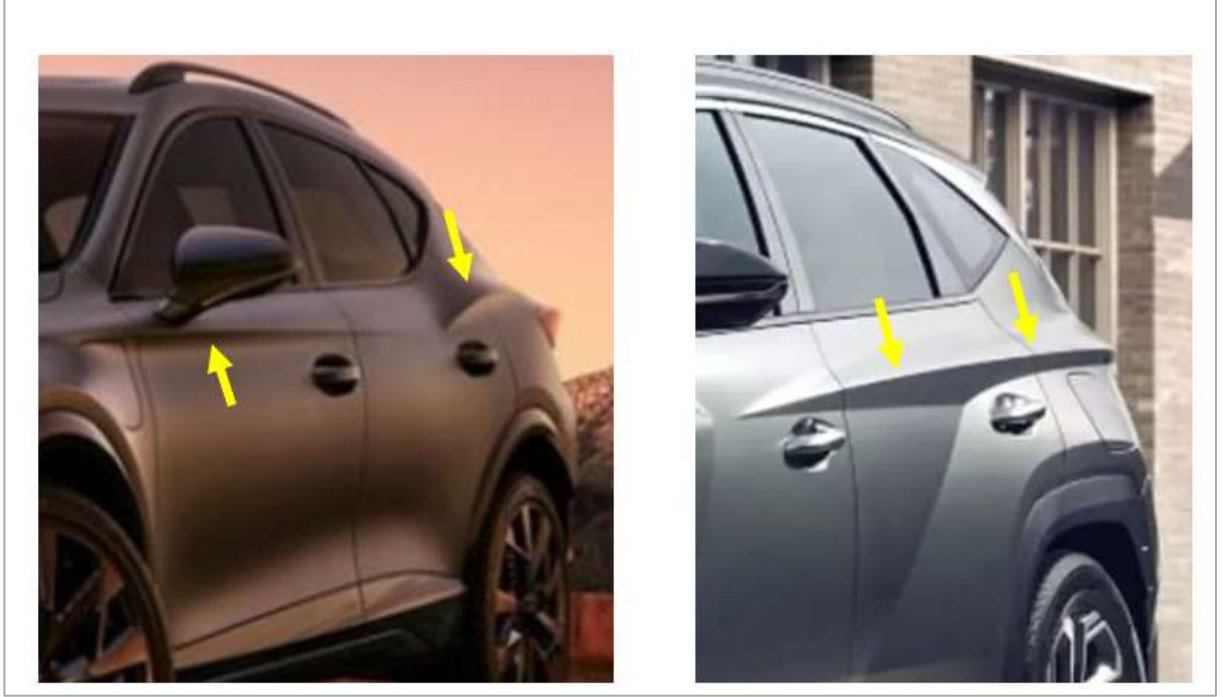
Sac metal şekillendirme süreçlerinde karşılaşılan problemlerin anlaşılması ve çözülmesi adına yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, özellikle otomotiv endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Otomotiv sektörü, sac metal şekillendirme teknolojilerinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu sektörde, araçların dış ve iç saclarının üretilmesi sırasında birçok farklı şekillendirme işlemi uygulanmaktadır. Bu süreçlerde, üretim sırasında meydana gelen gerilim, deformasyon, malzeme akışı ve yüzey hataları gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, sac metal şekillendirme sırasında meydana gelen önemli problemlerden biri de skidline yani iz yürümesidir.

İz yürümesi, otomotiv sektörü başta olmak üzere sac metal şekillendirme işlemleri sırasında karşılaşılan önemli bir problemdir. Bu olgu, özellikle otomobil dış saclarının şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkar ve ürünün yüzeyinde istenmeyen çizgi ya da izlerin oluşmasına yol açar. İz yürümesi, genellikle metalin düzgün akışını engelleyen, malzeme kayma davranışlarının bir sonucudur. Bu izler, ürünün estetik görünümünü bozmanın yanı sıra, yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkileyebilir. İz yürümesi, çoğunlukla yanlış kalıp tasarımı, yanlış proses parametreleri veya malzeme özelliklerinden kaynaklanır ve bu durum, üretim sürecinde ciddi kalite sorunlarına yol açabilir. Dolayısıyla, iz yürümesi olgusunun numerik yöntemler ile modellenmesi ve analizi, bu problemin önceden tahmin edilmesi ve engellenmesi adına kritik bir öneme sahiptir. İz yürümesi oluşumunun önlenmesi ve kontrol altına alınması, hem üretim kalitesini artırmak hem de maliyetleri düşürmek için önemli bir adımdır.

Bu tezde, sac metal şekillendirmede karşılaşılan temel problemlerin incelenmesi ve bu problemlerin çözümü adına numerik yöntemlerin nasıl kullanılabileceği ele alınacaktır. İz yürümesi fenomeni, özellikle otomotiv endüstrisindeki sac metal şekillendirme uygulamalarında karşılaşılan önemli bir problem olarak derinlemesine incelenecek ve bu problemin çözümüne yönelik stratejiler üzerinde durulacaktır.

2. İZ YÜRÜMESİ KAVRAMI

Bir otomobilin işlevsel kalitesinin yanı sıra, tüketicinin dikkatini çeken şey, etkili bir görsel imza sağlayan arabanın estetiğidir. Bu nedenle, üreticilerin göze hitap eden ürünler üretmesi kritik öneme sahiptir (Bob, 2021). Otomotiv sektöründeki rekabetin artmasıyla beraber araç tasarımlarının daha agresif ve benzersiz tasarımları göz çarpmaktadır. Araç tasarımlarının zorlaşması, beraberinde fizibilite sorunlarının artmasına ve şekillendirmedeki problemlerin giderilmesini güçleştirmektedir.



Şekil 2.1. Yeni araç tasarımlarındaki agresif form örnekleri

Şekil 2.1’de ki örneklerden de görüleceği üzere araç üreticileri son yıllarda artan teknoloji ve rekabet ortamından kaynaklı araç tasarımlarını benzersiz ve çekici olarak güncellemelerine neden olmuştur. Görünür sac parçalardaki küçük radyüsler her zaman beraberinde fizibilite problemleri getirmektedir. Fizibilite sorunlarından kaynaklı bu bölgelerdeki radyüslerin büyütülmesi aracın çekiciliğiyle ters orantılı olarak düşünülmektedir.

Oluşan problemler başlıca incelme, kırışıklık, geri yaylanma, yırtılma ve iz yürümesi şeklinde sıralayabiliriz. Özellikle araçların dış saclarında ölçüsel toleranslar önemli olsada kırışıklık, yırtılma ve iz yürümesi gibi fizibilite problemleri de kabul edilemez durumlardır.

Derin çekme kalıbında çekme işlemi esnasında sac, kalıp içerisine hareket ederken deforme olmaya başlamaktadır. Kalıp içerisindeki tampona , parçanın karakteristik radyüslerine ve kalıp yüzeylerine sürtünerek hareket etmektedir. Kalıp radyüsünün üzerinde sabit veya

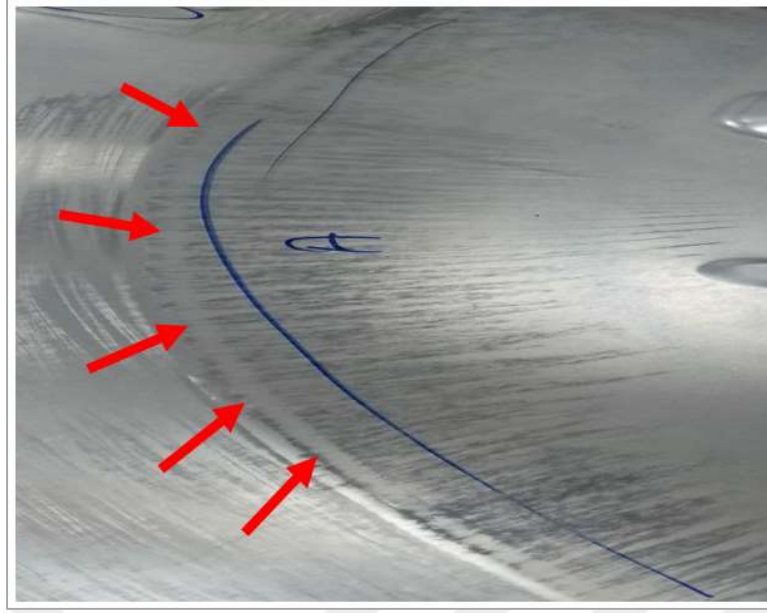
değişken basınç ve kuvvet altında sürtünmesiyle sacın üzerinde oluşan hasara ve çiziklere iz yürümesi denilmektedir. Şekil 2.2’de iz yürümesini anlatan görsel bulunmaktadır.



Şekil 2.2. İz yürümesi görseli

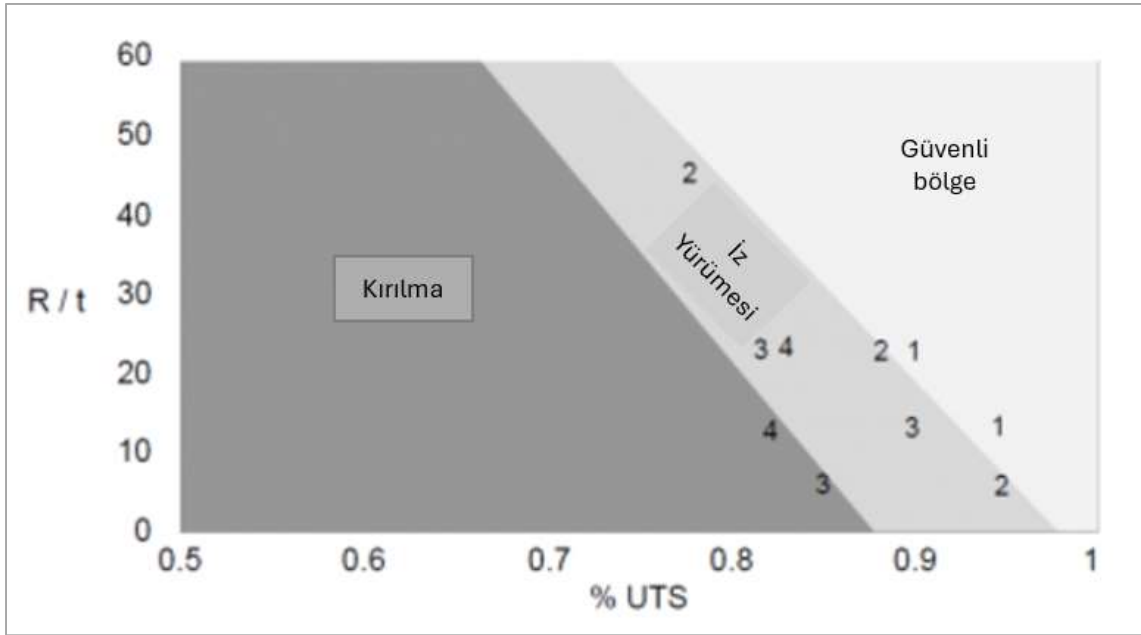
Kaynak: (Raffin, 2021)

İz yürümelerini araçların iç parçalarında ve yapısal olan parçalarda görmek muhtemeldir. Bu tip parçalarda iz yürümesi sadece görünür yüzey kusuru olarak kalır ve sacın hurdaya ayrılmasına neden olacak bir sorun olarak görülmez. Görsel kusurlar araçların iç parçaları için önemli bir sorun değildir. Fakat, otomobillerin çamurluk, kaput ve kapı gibi dış yüzey parçalarının üst yüzeyinde görünür hale geldiği durumda üretilmiş sacın hurda olmasına yol açacaktır. Dış saclar için iz yürümesi kalıp yapımından sonra tespit edilirse ciddi maliyetler oluşturacaktır. Bu nedenle iz yürümesinin oluşum mekanizmasını, etki faktörlerini ve kontrol methodlarını deneysel olarak tespit etmek ve ilgili teorileri ortaya koymak oldukça önem taşımaktadır. Şekil 2.3’de araçların görünür panel parçalarında meydana gelmiş bir iz yürümesi örneği yer almaktadır.



Şekil 2.3. Dış panel parçada iz yürümesi örneği

Üstteki şekilden de görüleceği üzere deformasyonun olduğu bölgeden kesit alındığında birkaç mikronluk bir deformasyon olup bakış açısına göre belirginliği artıp-azalan bir sorundur. Sac boyanmadan önce, yani üretimden hemen sonra ilgili bölgeye çeşitli boyutlarda özel taşlar sürterek iz yürümesi tespit edilmektedir. Sacdaki gerilmeyi hesaplamak gerektiğinde sac kalınlığı ile sac parçanın ilgili radyüsü arasındaki oran büyüdükçe gerilme de doğru orantılı şekilde büyüyecektir. Şekil 2.4’de iz yürümesi limit diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 2.4. İz yürümesi limit diyagramı

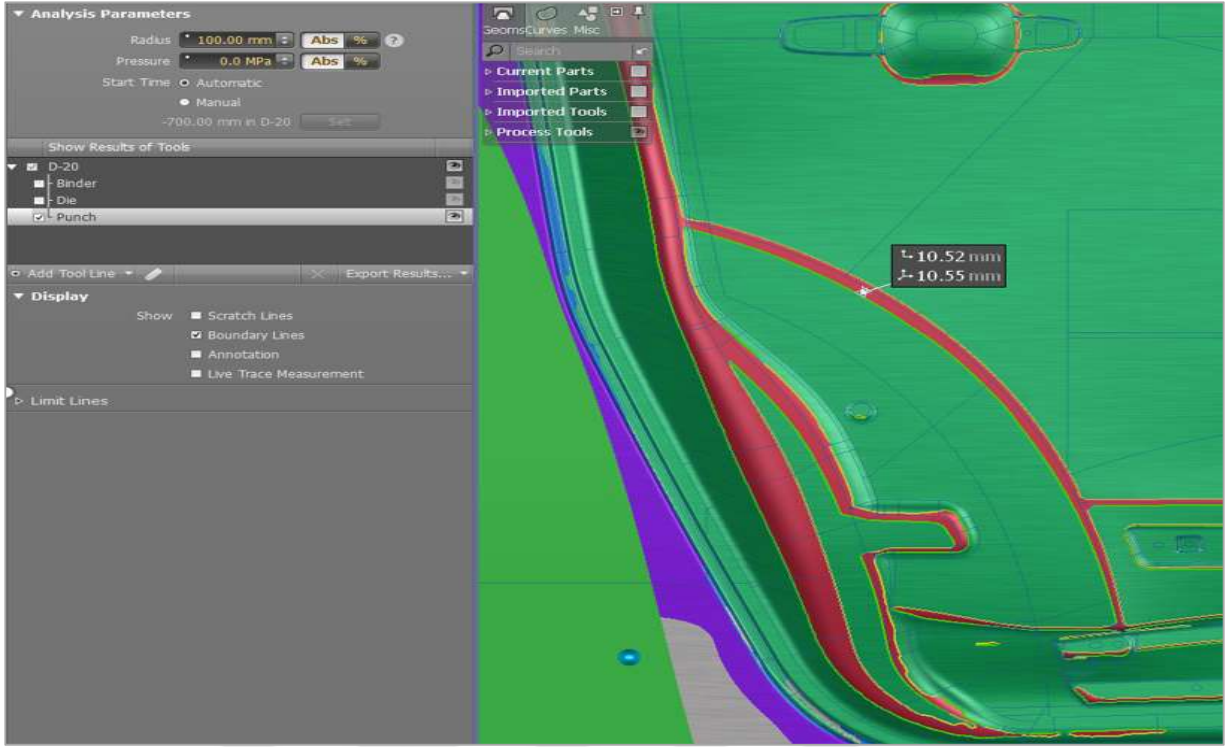
Kaynak: (Cyron, vd., 2021)

Grafikten de anlaşılaçağı gibi iz yürümesi belli bir yük aralığında meydana gelmektedir. Oluşan iz yürümesini her iki taraftaki gerilmeyi eşitleyerek azaltabiliriz. Bunu sağlamak için yapılacaklardan birkaçı; gerilimi az olan taraftaki tamponda kuvveti artırmak için gazlı yay ilave edilebilir, süzdürme ilave edilerek daha çok kuvvet uygulanabilir, açınımı artırarak gerilimi eşitlenmeye çalışılabilir, çekme kalıbının eksenini gerilimi eşitlemek için değiştirilebilir veya oluşacak basıncı azaltmak için parçanın radyüsü büyütülebilir. Bu çözümlerin birçoğunu hayata geçirmek oldukça maliyetli ve sonuçları net olarak problemin çözümü için ışık tutmayabilir.

Tüm bu soru işaretlerini ve riskli durumları azaltmak için bilindiğı üzere günümüzde sac şekillendirme analizi programları bulunmaktadır. Kullanılan SEA programları inceltme, kırışma, yırtılma ve geri yaylanma gibi temel düzey fizibilite tahminleri konusunda çok başarılılardır. Ancak, özellikle iz yürümeleri olmak üzere, otomobillerin görünür yüzey panelleri gibi sac metal parçalarının yüzey kusurlarının görünümüyle ilgili böyle bir sayısal tahmin için henüz yeterli bir temel sağlamamaktadır.

Sonuç olarak, bu tezde SEA simülasyonunu kullanarak bir dış yüzey parçasının çekme operasyonu sırasında iz yürümesinin oluşumunu tahmin etmek ve ölçmek için deneysel bir metodolojinin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Bir SEA programı olan Auotofom'da iz yürümesini tespit etmek için birkaç sonuç çıktısı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi skidline yani iz yürümesi çıktısı olacaktır. SEA programında iz yürümesi çıktısı doğrudan belirli bir formülle yapılamaz, ancak malzeme akışını ve deformasyonu belirleyen parametrelerin birleşimiyle tahmin edilir. Bu çıktıda doğru sonuçları görebilmek için incelenecek olan radyüs değerini analiz parametrelerine girmemiz gereklidir. Hesaplama sonunda oluşabilecek iz yürümesinin radyüs dışına ne kadar çıktığını SEA programı aracılığıyla ölçebiliriz. Bu ölçümü pres en alt noktadayken yani çekme operasyonunun sonunda ölçmek gereklidir. Şekil 2.5'de SEA yazılımında pres en alt noktadarken dış panelde meydana gelen iz yürümesinin programdaki görüntüsü ve ölçüsü gösterilmektedir.

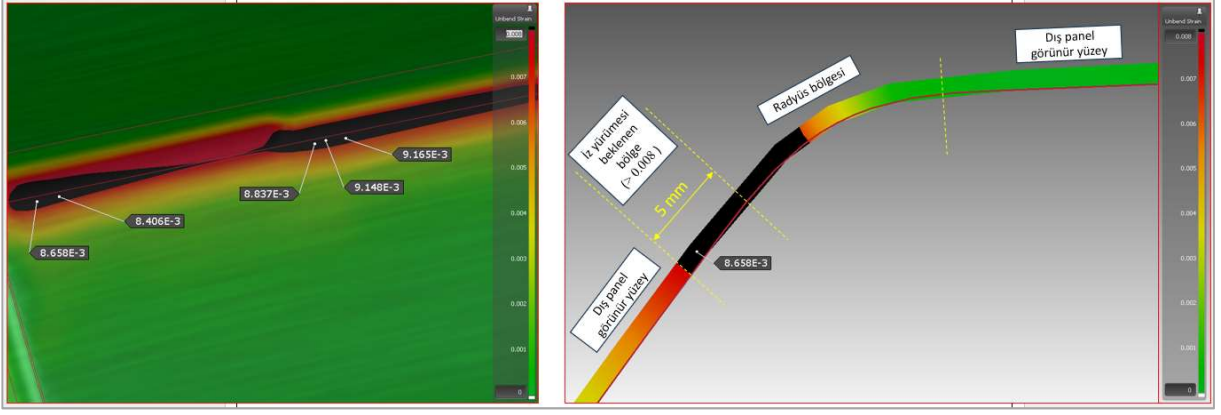


Şekil 2.5. SEA yazılımında iz yürümesinin görseli ve ölçümü

Tam bu noktada SEA programında tespit edilen iz yürümesinin, dış panelin üst yüzeyinde görülecek bir sorun mu yoksa sadece sacın altında kalacak bir sorun mu olduğunu tespit etmek için iz yürümesi çıktısı yeterli olmayacaktır. Otomotiv üreticilerinin üretimde karşılaşılma olasılığı yüksek olan bu problemin varsayımlardan arındırılarak net bir şekilde tespit edilmesine ihtiyacı vardır.

SEA programında iz yürümesi çıktısını destekleyici olarak unbending strain yani bükülmezlik deformasyonu çıktısına bakılmalıdır. Genellikle sac metal şekillendirmede bir metalin şekli değiştirildikten sonra orijinal şekline döndürülmesiyle ilgili deformasyon tipini ifade eder. Metalin bükülmüş bir şekilden düzeltilmesi işlemi sırasında ortaya çıkar. Sac parçası büküldüğünde, bükülme sırasında dış yüzeyde gerilmeler meydana gelirken, iç yüzeyde bası meydana gelir. Düzeltme işlemi bu deformasyonları tersine çevirme sürecidir.

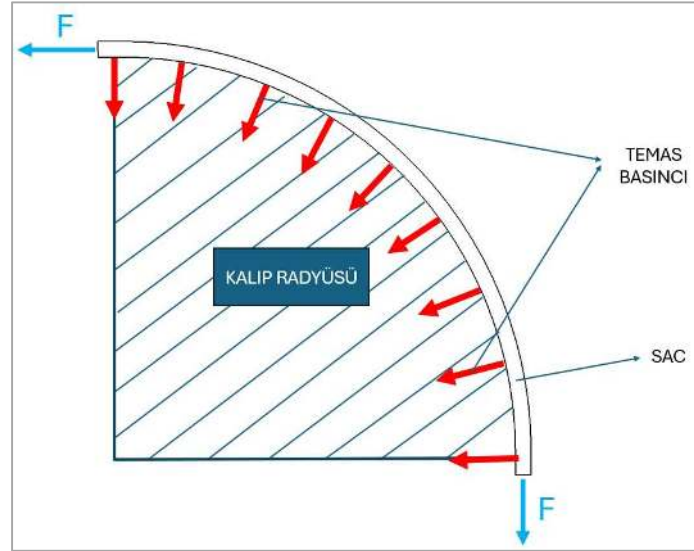
Bu çıktıda oluşacak deformasyonun analizi için SEA yazılımcıları şekil 2.6'dan da görüleceği üzere oluşan gerilimin > 0.008 'den büyük olduğu durumda panelin üst yüzeyinde gözle görülebilir bir deformasyon olma olasılığının yüksek olduğunu bildirmektedirler. Yani bu durumda panelin radyüsünün dışında > 0.008 'den büyük bir değer tespit edildiğinde sacın üstünde iz yürümesi tespit edilmesi beklenmektedir. Şekil 2.6'da SEA yazılımında bükülmezlik deformasyonu görüntüsü ve ölçümü yer almaktadır.



Şekil 2.6. SEA yazılımında bükülmezlik deformasyonu görüntüsü

Üstteki şekilden de görüleceği üzere 0.008'in üstünde olan bölge siyah alandır. Dış panelin radyüs bölgesini bükülmezlik deformasyonu yaklaşık 5 mm geçmiştir. Bu durumda dış panelin üst yüzeyinde boyandığında dahi belli olabilecek deformasyon meydana gelmesi beklenmektedir.

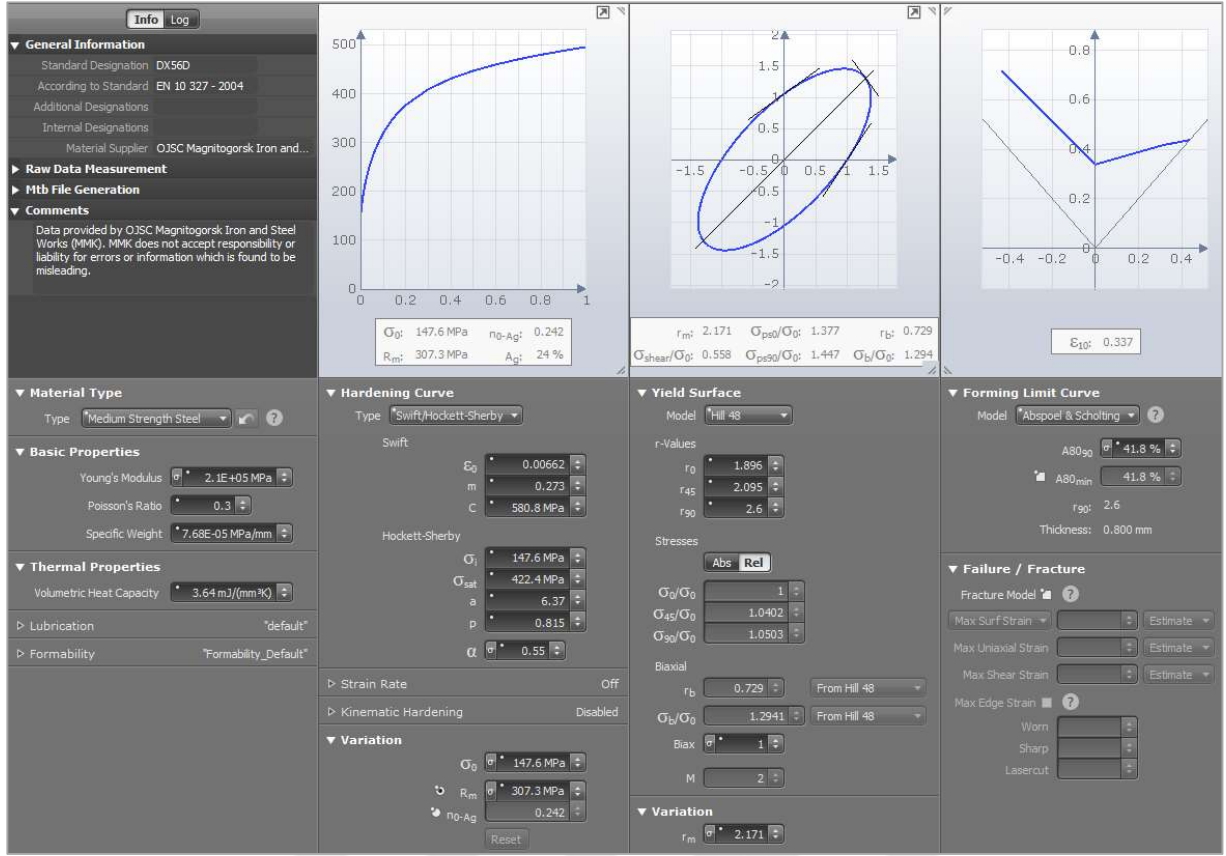
SEA analiz programında başka bir değerlendirme kriteri ise temas basıncı çıktısıdır. Kalıp radyüs ve yüzeylerindeki reaksiyon gerilimlerini inceleyerek, şekillendirme işlemi sırasında kalıp arızası tehlikesini değerlendirmek mümkündür. Ayrıca, kalıp radyüs ve yüzey gerilimleri sac yüzeyinin kalitesini etkiler, yani sac üzerindeki büyük gerilimler çatlaklara ve/veya istenmeyen yüzey izlerine neden olabilir; bu nedenle kalıp gerilimlerini izlemek önemlidir. Alt ve üst katman için temas basıncı, temas durumuna bağlıdır. Üst katmandaki sonuçlar, yukarıdaki takımların temas basıncına karşılık gelir; alt katmandaki temas basıncı ise alt takımın temas basıncına karşılık gelir. Üst katman temas basıncı (-) işaretine sahipken, alt katman temas basıncı (+) işaretine sahiptir. Orta katmanda Temas Basıncı sonucu yoktur (Autoform Service center). Şekil 2.7'de temas basıncı oluşumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.7. Temas basıncı şematik gösterimi

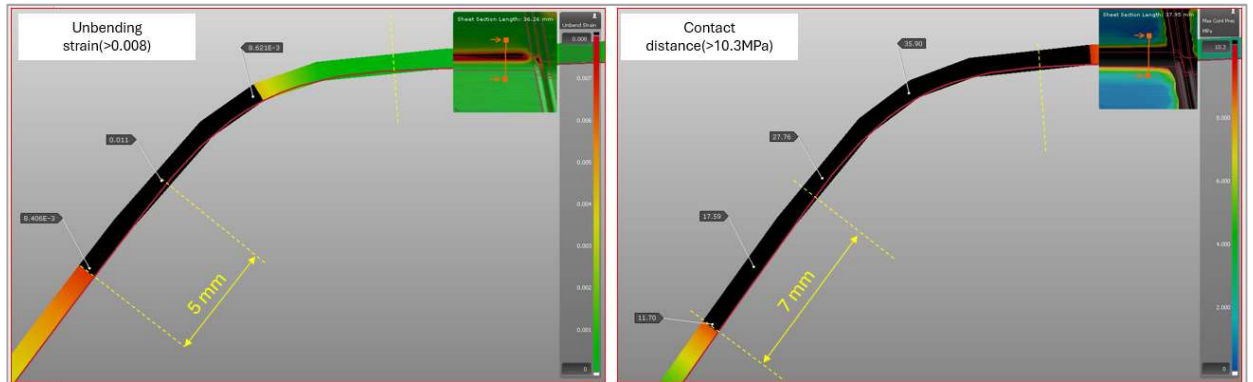
Li Feng-Xian'ın yayınında iz yürümesinin tespiti için contact pressure çıktısından yararlanmıştır. Bu çalışmaya göre iz yürümesi hattının belirlenmesi için sac akma dayanımının %7'sini referans değeri olarak kabul edilmiştir. Sınır olarak bu yüzdenin üstüne çıkan basınç değerlerini gösteren alanlar üst yüzeyde deformasyon olduğu anlamını taşımaktadır (Li, 2020).

Autoform programında panelin üst yüzeyinde iz yürümesi beklenen bir parçada, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktılarını karşılaştırmak bu çalışmalara ışık tutacaktır. Şekil 2.6'da ki karşılaştırmada, dış panellerde geleneksel çelikler kategorisinde düşünebileceğimiz 0.8 mm kalınlığında DX56D malzemesi seçilerek deformasyon boyları karşılaştırılmıştır. Kullanılan malzemenin çekme dayanımı 307.3 MPa, akma dayanımı 147.6 MPa'dır. Bu karşılaştırmada özellikle Hill48 modeli kullanılmıştır. Çünkü, Hill48 yüzeysel temas basıncı ve plastik deformasyonun etkileşimini hesaplarken daha detaylı bir yaklaşım sunar. Özellikle yüzeyler arasındaki basıncın, malzemenin akma sınırına ulaşma durumunu inceleyerek bu sınırdaki plastik deformasyonu daha doğru şekilde tahmin eder. Diğer modeller genellikle elastik deformasyon ile plastik deformasyon arasındaki geçişi basitleştirirken, Hill48 bu geçişin yüzeydeki mikro yapı ile nasıl etkileşimde bulunduğunu daha ayrıntılı olarak açıklar. Şekil 2.8'de Autoform ticari yazılımına ait bir malzeme kartı (DX56) dosyasının görüntüsü bulunmaktadır.



Şeki 2.8. Autoform programında malzeme kartı görseli

Autoform’da üst şekildeki görünen malzeme kartına göre contact distance çıktısı yani temas basıncı sınır değeri akma dayanımının %7’si alınarak 10.3 MPa olarak belirlenmiştir. Bükülmezlik deformasyonu üst sınırı ise daha önce anlatıldığı gibi 0.008 alınmıştır. Şekil 2.9’da Autoform ticari yazılımında bükülmezlik deformasyonu ile temas basıncı çıktıların ölçüsel farklılıkları gösterilmiştir.

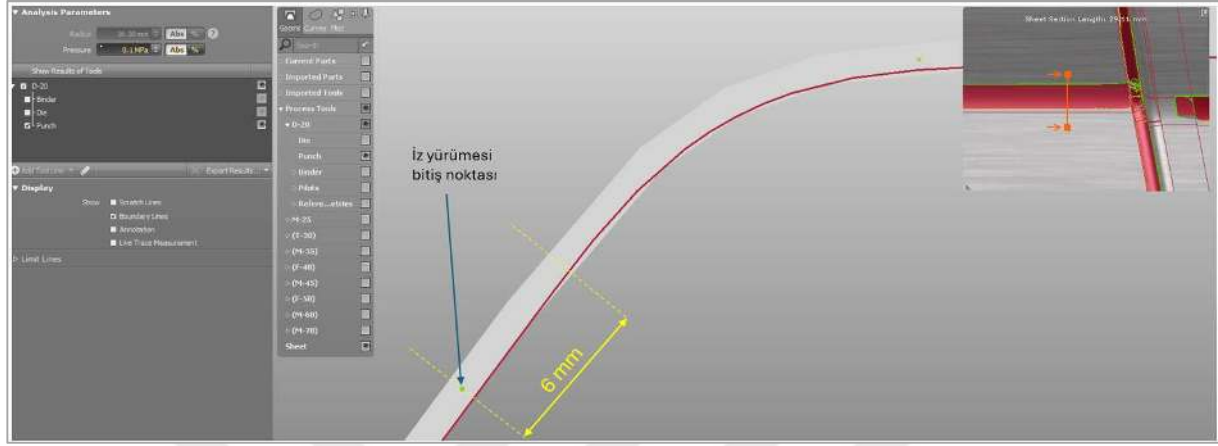


Şekil 2.9. Autoform’da bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktısının farkları

Şekil 2.9’da görüldüğü üzere Autoform bükülmezlik deformasyonu çıktısını değerlendirdiğimizde panel sacının üst yüzeyinde radyüsün 5 mm dışına çıkan bir deformasyon

tespit edilmiştir. Şekil b’de Autoform contact distance çıktısını incelediğimizde sınır değerimiz olan 10.3 MPa’ın üstünde 7 mm’lik bir alan tespit edilmiştir.

Şekil 2.10’deki aynı bölgeyi Autoform programında iz yürümesi çıktısında incelediğimizde radyüsün 6 mm dışında deformasyon tespit edilmiştir.



Şekil 2.10. Autoformda iz yürümesi çıktısının ölçümü

Sonuç olarak Autoform programında incelenen 3 çıktı arasındaki farklar bu deneme için mm 1-2 mm civarı olsa da yüzdelik olarak düşündüğümüzde %10-%20 arasında farklar bulunmaktadır. İz yürümesini çok daha fazla olduğu durumlarda bu farkların analizi tekrarlamak çok daha yararlı olacaktır.

Son yıllarda, bazı bilim insanları iz yürümesinin mekaniğini , etki yasasını gerek deneysel gerekse sonlu elemanlar analizi programlarında geleceğe ışık tutması için bazı teoriler ortaya koydular.

Smith ve diğerleri, deneysel bir cihaz tasarladılar. Bu cihaz, sacı tek bir yönden belli bir açıyla çekme suretiyle gerdi. Bu deneyle iz yürümesi sınır diyagramı oluşturdular. Çekme kuvvetini değiştirerek iz yürümesinin oluşum yasasını oluşturmaya çalıştılar (Lorenzo, vd., 2011).

Y.Kishigami, otomotiv dış panellerinde iz yürümesi oluşumunun ölçümüyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada pres şekillendirme sırasında sac profili ölçüm yöntemi lazer yer değiştirme ölçer takılı kalıp kullanılarak oluşturulmuştur. Pres şekillendirmenin ilk aşamasında radyüs kısmında bir sırt oluşumu, pres tam kapandığında düz alanda dalgalı bir şeklin oluşumunu incelemiştir (Kishigami, 2023).

P. Cyron ve M. Liewald sac metal bileşenlerin derin çekilmesi sırasında iz yürümesi oluşumunun deneysel ve SEA simülasyonu kullanılarak tahmini ve değerlendirilmesini

incelediler. Yapılan çalışmayı diğerlerinden ayıran faktör ise tek eksenli bir gerilim durumunu temsil etmez, tıpkı bir çekme kalıbındaki gibi çok eksenli bir gerilim durumunu göz önünde bulundurarak iz yürümesinin kalite ilişkisini ve konumunu doğru şekilde tahmin edip edemeyeceğini araştırdı (Cyron, vd., 2021; Eckert, vd., 2012).

Dewang Zhao çalışmasında AL6061-T6 U şeklinde kalıp kullanarak sac üzerindeki iz yürümesi parametreleri araştırmıştır. Bu çalışma kapsamında iz yürümesi, yüzey pürüzlülüğü, temas basıncı ve ters eğilme gerilmesi ilişkilerini incelemiştir (Dewang, vd., 2022, Ren, vd., 2011).

Yukarıda anlatılan ve araştırılan konular ışığında iz yürümesi sorunu otomotiv sac kalıpcılığı endüstrisinde önemli bir yer tutmaktadır. O yüzden bu sorunun önceden tespiti, analizi ve önceden önlem alınması elzem bir durumdur. Bu tez çalışması kapsamında iz yürümesi, aynı radyüs değeriyle, farklı kuvvet ve basınçlarla, numerik ve deneysel olarak analiz edilecektir. Yapılan çalışmalar neticesinde numerik ve deneysel yöntem karşılaştırılıp iz yürümesinin tespitine ışık tutacaktır.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Tüm bu sürecin etkinliği, hem tasarım hem de üretim aşamalarındaki doğruluk ve verimliliğe dayanır. Modern mühendislik uygulamalarında, bu süreçlerin simülasyonu ve optimizasyonu için geliştirilen bilgisayar destekli sonlu elemanlar yazılımları önemli bir yere sahiptir. Sac metal şekillendirme analiz programlarının tarihçesi, teknolojinin evrimiyle paralel olarak gelişmiş ve bu yazılımlar, endüstriyel üretim süreçlerini daha hızlı, daha doğru ve maliyet açısından daha verimli hale getirmiştir. Bu yazıda, sac metal şekillendirme analiz yazılımlarının tarihçesi, gelişimi ve endüstriyel önemine dair kapsamlı bir inceleme yapılacaktır.

Sac metal şekillendirme teknolojisinin temelleri, 20. yüzyılın başlarına kadar gitmektedir. Erken dönemde, sac metalin şekillendirilmesi büyük ölçüde fiziksel deneyler ve manuel hesaplamalarla gerçekleştiriliyordu. Tasarımcılar ve mühendisler, sac metali istenilen şekle sokarken, genellikle çeşitli deneysel yöntemlere ve testlere başvuruyorlardı. Ancak bu süreçler zaman alıcı ve maliyetliydi. Özellikle otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde, bu tür geleneksel yöntemlerin verimsizlikleri hızla fark edilmeye başlandı.

1960'lı yılların sonlarına doğru, bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi, mühendislik uygulamalarında devrim niteliğinde değişimlere yol açtı. Özellikle 1970'lerin ortalarına gelindiğinde, bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarının tasarıma entegrasyonu başladı ve sac metal şekillendirme süreci de bundan nasibini aldı. Bu dönemde, sac metal şekillendirme süreçleri için sayısal analiz teknikleri geliştirilmiş ve mühendisler bu yazılımlar sayesinde daha hızlı ve doğru sonuçlar elde etmeye başlamıştır (Sürmen, 2019).

Sac metal şekillendirme yazılımlarının endüstriyel üretim süreçlerindeki önemi, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde belirgin hale gelmiştir. Bu yazılımlar, tasarım aşamasında mühendislerin hataları minimize etmelerini ve yüksek kaliteli ürünler geliştirmelerini sağlar. Aynı zamanda, üretim sürecinde kullanılan kalıpların verimliliğini artırarak, üretim maliyetlerini düşürür ve süreçlerin hızını artırır.

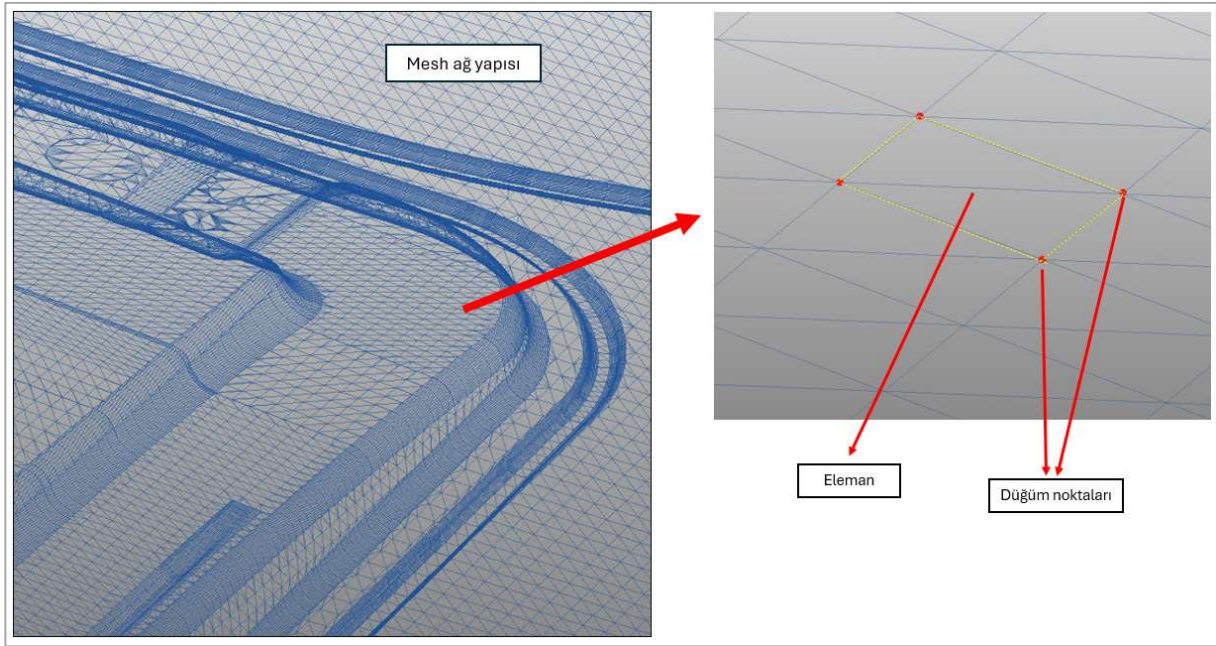
Bugün, sac metal şekillendirme yazılımları, çok daha gelişmiş simülasyon tekniklerine sahiptir. AutoForm, LS-DYNA ve Pam-Stamp gibi yazılımlar, sadece şekil değişimini değil, aynı zamanda gerilme, deformasyon, malzeme akışı ve kalıp tasarımı gibi faktörleri de analiz

edebilir. Bu yazılımlar, tasarımcıların ilk başta yapılan hataları erken aşamada tespit etmelerine olanak tanır, bu da prototip üretimi ve fiziksel test gereksinimlerini önemli ölçüde azaltır.

Geleneksel prototip üretimi ile karşılaştırıldığında, sac metal şekillendirme yazılımları, tasarım aşamasında yapılan hataların önceden tespit edilmesini sağlar. Bu sayede, gereksiz prototip üretimi ve test süreçlerinin önüne geçilir, böylece hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlanır. Modern analiz yazılımları, mühendislerin tasarım üzerinde daha hızlı değişiklikler yapabilmesine olanak tanır. Ayrıca, farklı malzeme özellikleri ve işleme koşulları dikkate alınarak tasarımlar optimize edilebilir, bu da daha az malzeme kullanımıyla daha verimli üretim anlamına gelir. Sac metal şekillendirme yazılımları, kalıp tasarımının her aşamasını simüle edebilir, böylece kalıp hataları ve potansiyel sorunlar önceden öngörülebilir. Bu durum, kalıp ömrünün uzamasına ve üretim verimliliğinin artmasına katkı sağlar. Bu yazılımlar, sac metal şekillendirme sürecinde kalitesiz malzeme kullanımını engelleyerek, üretimin kalitesini artırır. Üretim hataları daha erken tespit edilip düzeltilerek, son ürünün kalitesi garanti altına alınır. Malzeme kullanımını optimize eder ve atık oranlarını düşürür. Bu, üretim süreçlerinin daha çevre dostu hale gelmesini sağlar. Aynı zamanda, daha az malzeme israfı ve daha verimli üretim, şirketlere ekonomik anlamda uzun vadeli faydalar sağlar.

Bu durumda sonlu elemanlar analizi programlarının hangi hesaplama yöntemlerini, hangi sorunlara çözüm olduğunu ve hangi sonuçları verdiğine kabaca değinecek olursak, tüm sonlu elemanlar analizi programları mesh yapılarıyla hesaplama yapmak zorundadırlar. Özellikle mühendislik, fizik ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) alanlarında, karmaşık geometrileri sayısal çözüm yöntemleriyle modellemek için kullanılır. Bu yapılar, genellikle finite element (sonlu elemanlar) veya finite volume (sonlu hacimler) yöntemleri için gereklidir. Mesh yapıları, fiziksel alanları daha küçük, hesaplanabilir parçalara böler ve her bir parça üzerinde sayısal hesaplamalar yapılmasına olanak tanır.

Mesh geometrik bir bölgeyi, genellikle düzensiz küçük alt bölgelere (elemanlar) bölen bir yapıdır. Bu elemanlar genellikle üçgen, dörtgen, hexahedron (küp) ya da tetrahedron (piramit) şeklinde olabilir. Eleman, çözümde kullanılan matematiksel modelin yerini alır. Örneğin, bir üçgen elemanı, 2D bir bölgedeki çözümde, bir dörtgen elemanı ise 2D daha karmaşık bölgelerde kullanılır. Düğümner ise elemanların köşe noktalarıdır. Düğümner, elemanları birbirine bağlar ve genellikle çözümdeki bilinmeyenlerin yer aldığı noktalardır. Şekil 3.1’de Sonlu elemanlar yazılımındaki eleman ve düğüm yapısını gösteren bir görsel sunulmaktadır.



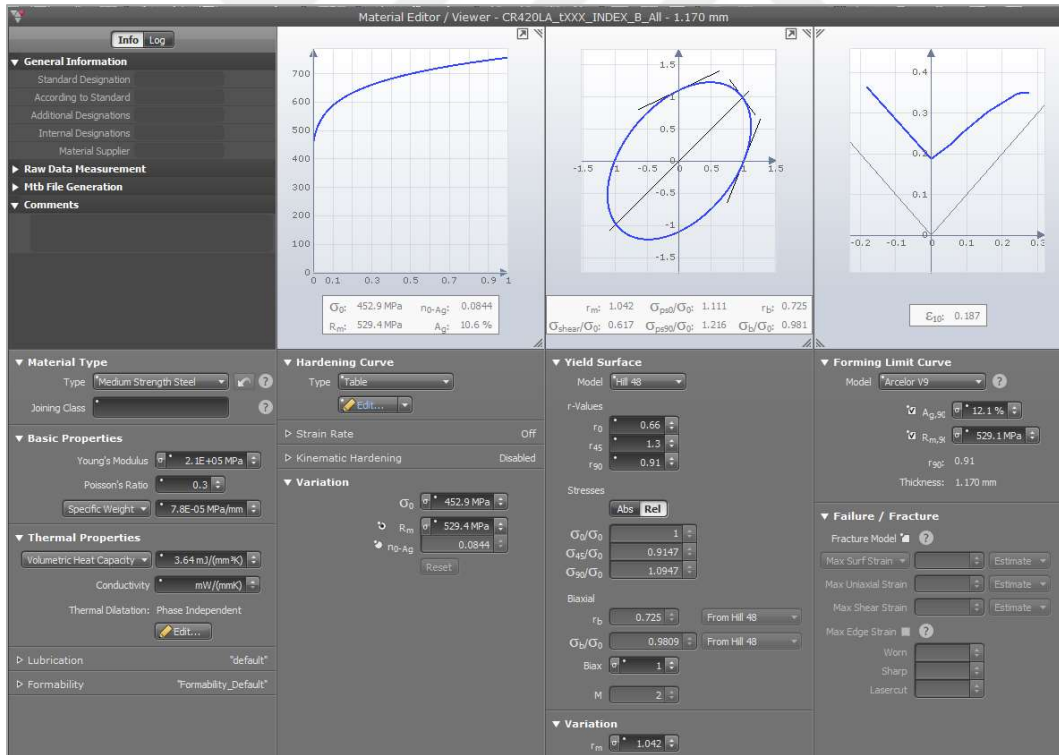
Şekil 3.1. Eleman ve düğüm noktaları

Otomatik mesh yapısı, mühendislik simülasyonlarında, özellikle yapı analizi, akışkanlar dinamiği (CFD), ısı transferi ve elektromanyetik alan çözümlemeleri gibi alanlarda kritik bir rol oynar. Mesh'in kalitesi doğrudan çözümün doğruluğunu ve çözüm süresini etkiler. Mesh yapısı, her zaman optimize edilmelidir, çünkü karmaşık bir geometri ile çalışırken bu, daha doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Bu yüzden, otomatik meshleme algoritmaları ve yazılımları, mühendislik tasarımı ve analizlerinde verimliliği artırır ve doğru sonuçlar elde etmeyi sağlar.

Sonlu elemanlar analizi programlarında bir fizibilite analizi hazırlığına başlamadan önce bir malzeme dosyasının olması gereklidir. Malzeme dosyası, simülasyon yapılan yapının veya elemanın malzeme özelliklerini tanımlayan bir dosyadır. Bu kart, malzemenin davranışını belirleyen fiziksel ve mekanik parametreleri içerir ve sonlu elemanlar modellemesinde doğru sonuçların elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Malzeme kartları, yapısal analizde kullanılan farklı malzeme türleri için farklı özellikler içerir. SEA programları her malzeme türü için farklı kart formatlarına sahip olabilir, ancak genel olarak çekme dayanımı, akma dayanımı, elastik modül, poisson oranı, çekme testi verileri, akma yüzeyi, anizotropi katsayıları gibi bilgileri içerir. Malzeme kartları malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modellerinin ticari sonlu elemanlar yazılımlarındaki kullanıcı arayüzleridir. Bu kartların içeriği, kullanımı tercih edilen plastisite modeline göre değişmektedir. Her bir plastisite modeli,

bünyesinde farklı kabuller barındırmaktadır. Örneğin malzemenin izotropik veya anizotropik oluşu, pekleşme davranışının izotropik veya kinematik oluşu bu duruma örnek olarak verilebilir. Malzeme kartları kullanıcıdan girdi olarak SEA’da gerçekleştirilecek malzemenin mekanik özelliklerini istemektedir. Bu mekanik özellikler temelde tek eksenli çekme deneyinden elde edilen özellikler olmakla birlikte kullanılan plastisite modeline göre de değişkenlik göstermektedir. Günümüzde en sık kullanılan plastisite modellerinden biri Hill48 modelidir.

Yukarıda anlatıldığı üzere bu plastisite modelleri malzeme kartlarıyla ifade edilmektedir. Hill48 akma kriteri, malzemelerin plastik davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir kriterdir. Rodney Hill tarafından 1948 yılında geliştirilen kriter, özellikle anizotropik (farklı yönlerde farklı özellikler gösteren) malzemeler için gerilme durumlarında akma (kalıcı şekil değişikliği, plastik deformasyon) başlangıcını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Hill, 1948; Benjamin, 2017) AF ticari yazılımı için Hill48 plastisite modeline ait malzeme kartı CR420LA malzemesi için Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Autoform’da Hill48 plastisite modeline sahip CR420LA malzemesi

Hill48 modelinin en temel özelliği, metal malzemelerin plastik deformasyonlarının sadece gerilme büyüklüğü ile değil, aynı zamanda gerilme yönelimi ile de ilişkilendirilmesidir.

Bu model, metal malzemelerin belirli bir gerilme düzlemindeki anizotropik akma davranışını daha doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla geliştirilmiştir. Temel amacı ise malzemenin plastik deformasyonunun gerçekleşeceği noktanın belirlenmesidir. Bu, özellikle yüksek deformasyon seviyelerinde doğru malzeme davranışını tahmin etmek için kritik bir adımdır.

Hill'in ikinci dereceden normal anizotropik verim kriteri ve düzlemsel gerilim koşuluna göre eşdeğer gerilim (σ_{eq}) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2r}{1+r}\sigma_1\sigma_2} \quad (3.1)$$

Benzer şekilde eşdeğer gerilim oranı (σ_{eq}) 2 denklemden hesaplanabilir.

$$d\epsilon_{eq} = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{d\epsilon_1^2 + d\epsilon_2^2 + \frac{2r}{1+r}d\epsilon_1d\epsilon_2} \quad (3.2)$$

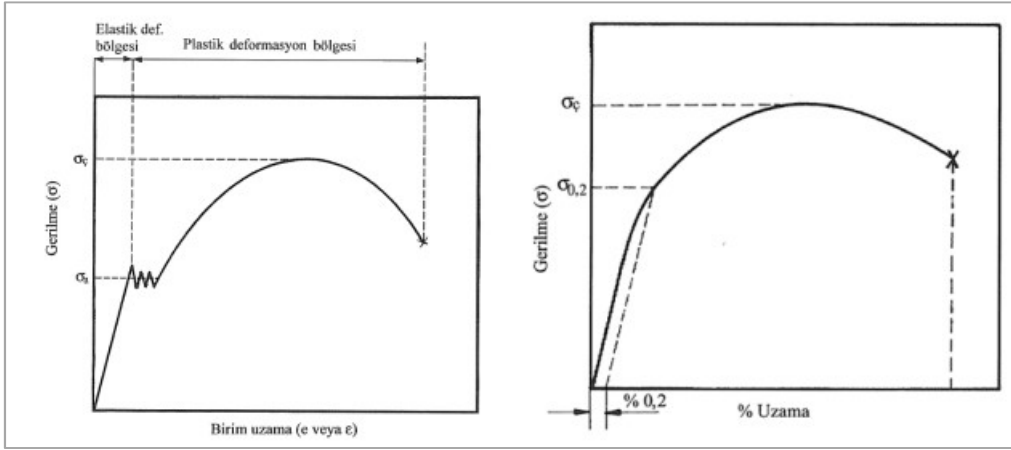
σ_1 , 3 denklemden hesaplanabilir .

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2r}{1+r}\alpha} \quad (3.3)$$

Buna uygun olarak, $d\epsilon_1$, 4 denklemden hesaplanabilir.

$$d\epsilon_{eq} = d\epsilon_1 \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{1 + \beta^2 + \frac{2r}{1+r}\beta} \quad (3.4)$$

Sonlu elemanlar analizi programlarında malzeme dosyaları oluştururken alınacak veriler öncelikle çekme testi yapılarak elde edilir. Tek eksenli çekme testinin mekanik deformasyon yapısı tek ekseninde gerçekleşmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için en yaygın yöntem çekme deneyidir. Bu deney, kuvvet (F) ve uzama (Δl) eğrilerini ortaya çıkarır. Bununla birlikte, Gerilme-Uzama eğrisi daha popülerdir. Sonuç olarak, uygulanan kuvvet numunenin ilk kesit alanına bölünür ($\sigma=F/A_0$). Ardından, kuvvet değerleri gerilme değerlerine dönüştürülür ve Gerilme-Uzama grafiği oluşturulur. Şekil 3.3’de örnek bir uzama-gerilme ve % uzama-gerilme grafikleri verilmiştir.

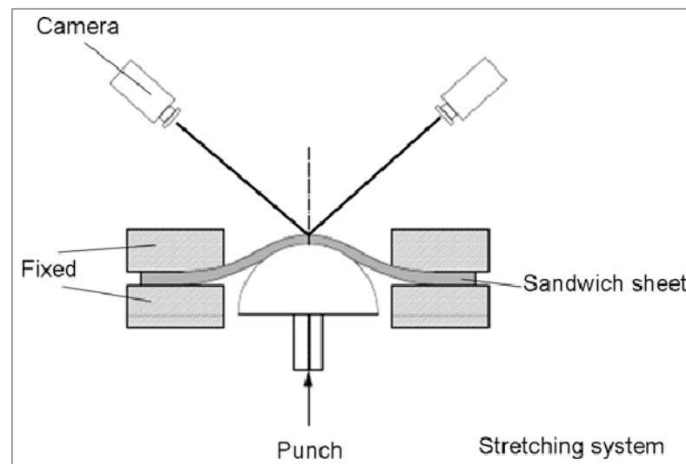


Şekil 3.3.. Örnek uzama-gerilme ve % uzama ve gerilme grafikleri

Kaynak: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi (2018)

Çekme deneyi, malzemenin elastik modülü, akma değeri, kopma dayanımı ve kopma uzaması, büzülmesi ve tokluk gibi mukavemet değerlerini belirler. Bu özellikler, malzemenin cinsine, kimyasal bileşimine ve metalografik yapısına bağlıdır (KSÜ, 2018).

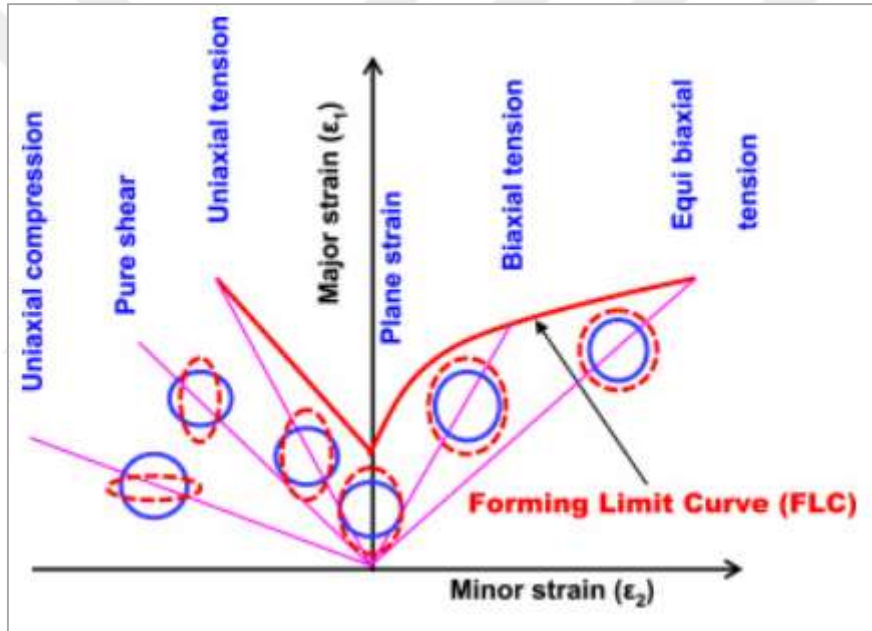
Fakat, sac metal şekillendirme prosesleri çok eksenli deformasyon yapısına sahiptir. Bu nedenle sac metal malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti yalnızca tek eksenli çekme deneyiyle tanımlanamamaktadır. Bu nedenle malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarını deneysel olarak tespit edebilen ve yarı küresel bir zımbayla malzemeyi yırtılma sınırına kadar deforme etme mantığıyla oluşturan Nakajima testi kullanılmaktadır. Şekil 3.4’de Nakajima testine ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Nakajima testi

Kaynak: (O.Sokolova, 2011)

Nakajima testi sırasında, levhanın deformasyon süreci sırasında oluşan plastik akışlar, incelemeye tabi tutulur. Testin sonucunda, levhanın en fazla hangi ölçüde şekillendirilebileceği belirlenir. Nakajima testi genellikle kopma noktası, elastik-plastik deformasyon bölgelerinin haritalanması ve şekillendirme sınır eğrisinin (FLC) tespit edilmesi için kullanılır. Şekillendirme sınır eğrisi, bir malzemenin plastik deformasyona uğrayıp kırılmadan veya yırtılmadan önce kabul edebileceği maksimum gerilme oranlarını gösteren bir grafiktir. Bu eğri, belirli bir malzeme için, farklı koşullarda (örneğin, farklı örnek şekil ve deformasyon yönlerinde) yapılan testlerle elde edilir. FLC genellikle bir gerilme (strain) ve gerilme oranı (strain rate) grafiği olarak çizilir. Bu eğri, malzemenin şekillendirme sınırlarını belirler ve bu sınır, şekillendirme işlemi sırasında malzemenin daha fazla deformasyona uğramadan önce dikkat edilmesi gereken kritik noktadır. Şekil 3.4’de FLC grafiği yer almaktadır.



Şekil 3.5. FLC grafiği

Kaynak: (Surajit, 2021)

Bütün testler, kopma (tam deformasyon) sırasında büyük ve küçük ana gerilmeleri tespit etme yeteneğine sahiptir. Uzama sınır eğrisi bu kopma noktalarını gösterir. Bütün bu testler sırasında lineer gerilme sürdürmek çok önemlidir.

$$\epsilon_1 = \text{const.} \cdot \epsilon_2 \quad (3.5)$$

Tanımlama, büyük gerilme değerinin 0'dan büyük olmasını gerektirir. Sonuç olarak, FLD üzerindeki noktaların absis (major gerilme ϵ_1). Y ekseninin pozitif kısmı onları sınırlar.

Tanımlama yapılmadan, büyük gerilme minör gerilmeden (ϵ_2) daha büyüktür. Şu bilgiler göz önüne alındığında, herhangi bir malzemenin uzama limit eğrisinin tam olarak belirlenmesinin imkansız olduğu unutulmamalıdır. Örneğin Nakajima testi için sürtünme testi. Büyük ve küçük gerilme ölçüm değerleri, özellikle deney numunesinin kıvrılmış bölgesinde bulunur (Gökalp, 2006; Fatih 2024).



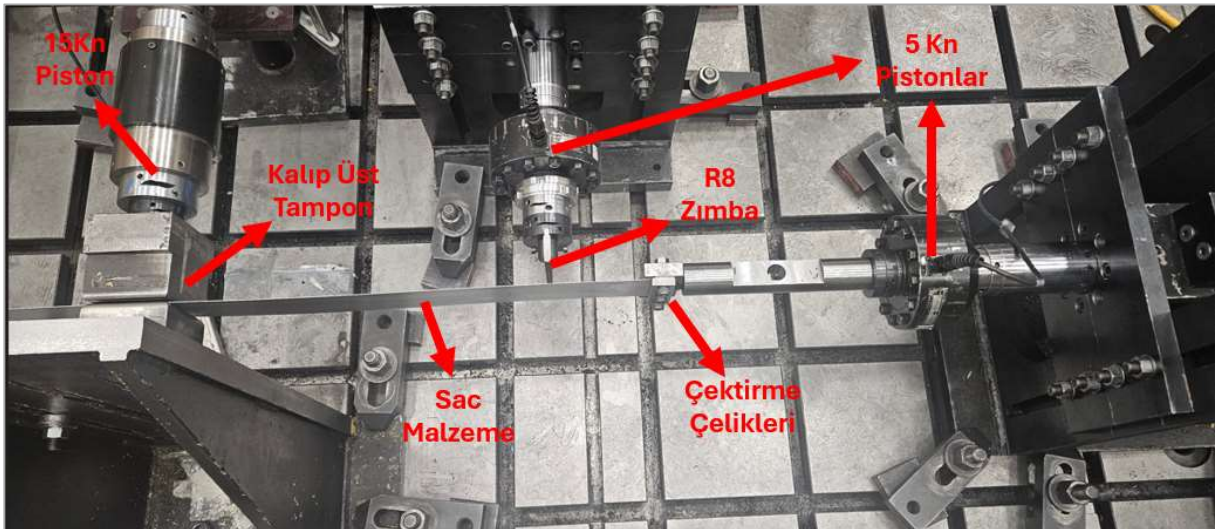
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasında, sac şekillendirme süreçlerindeki iz yürümesi etkilerinin, sacın yüzey özellikleri, deformasyon bölgeleri ve kalıp geometrisi ile olan ilişkisini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, üretim süreçlerinde karşılaşılan olası deformasyon ve kalite sorunlarına karşı çözüm önerileri geliştirilmesi beklenmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda sac kalıpcılığı prosesinde iz yürümesi fenomenini inceleyerek, sac şekillendirme işlemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik SEA programında ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma, sac kalınlığı 0.73 mm olan CR4 kalitesinde bir malzemenin, Hill48 malzeme modeli ile modellenerek Autoform yazılımı ile R3 ve R8 radyüs değerlerine ait 2 farklı çelik ile simülasyonunun gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalar için MTS cihazı kullanılarak iz yürümesi etkilerinin ölçülmesi, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

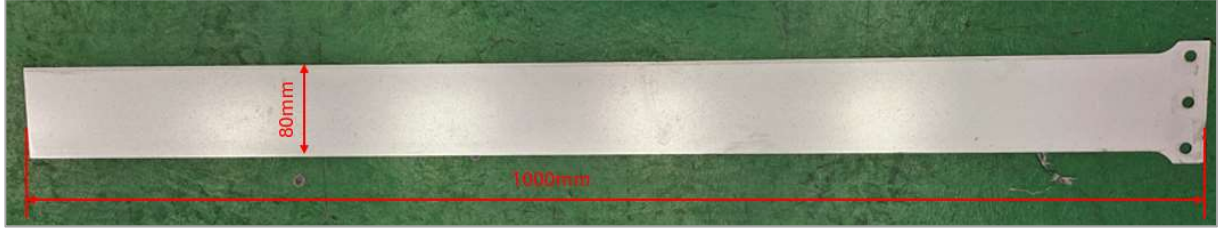
4.1 Deneysel Çalışmalar

Tezin bu bölümünde, sac şekillendirme süreçlerinde iz yürümesi fenomenini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaların yöntemleri ve sonuçları sunulmaktadır. Deneyler, sac malzemenin şekillendirilmesi sırasında iz yürümelerinin nasıl oluştuğunu ve bu izlerin malzeme akışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, bir hidrolik test cihazı olan MTS marka bir cihaz ile üç piston kullanarak yapılmıştır. Şekil4.1’de hidrolik test cihazında kurulan test düzeneği gösterilmektedir.



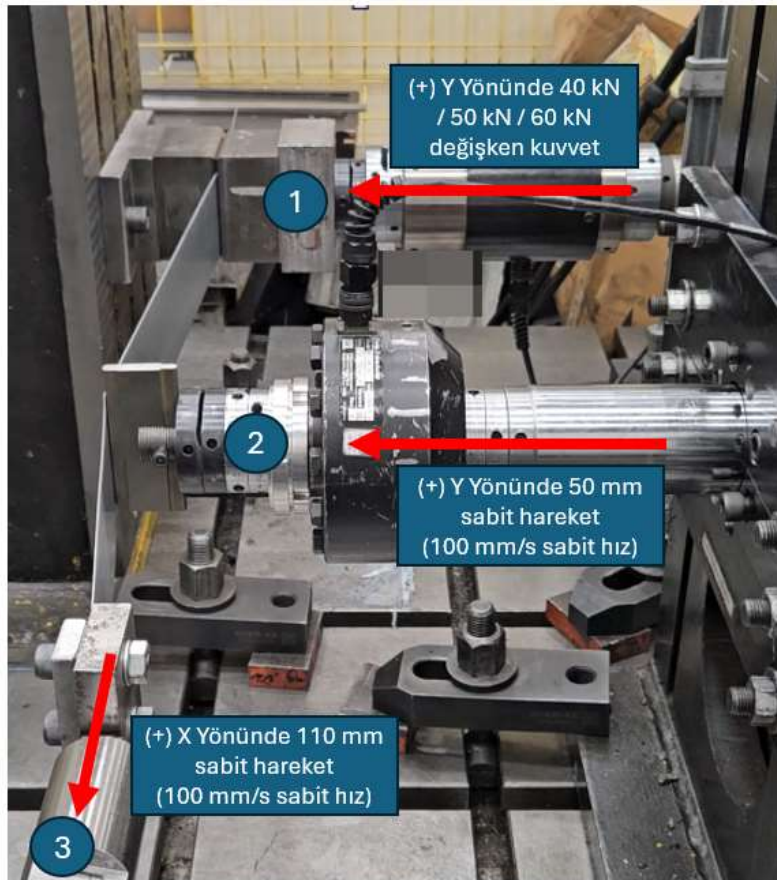
Şekil 4.1. Hidrolik test cihazında deney düzeneği

Deneylerde kullanılan CR4 malzeme Şekil 4.2’de gösterildiği gibi 0.73 mm x 80 mm x 1000 mm olarak seçilmiştir. Çektirme çeliklerinin sacı kaçırmaya riskinden kaynaklı Ø10 mm 3 adet delik delinmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan numune tipi ve ebatları

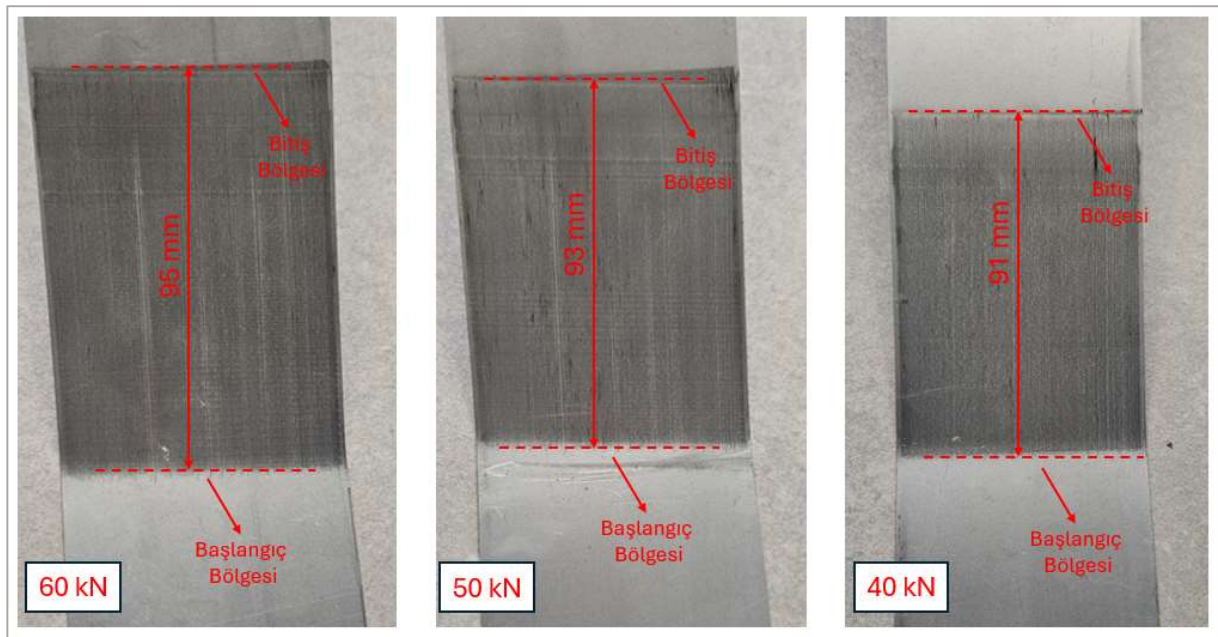
Deneyler sabit sac ebatları (0.73 mm x 80 mm x 1000 mm), sabit zımba radyüsü (R8), sabit çektirme kursu (110 mm), sabit çektirme hızı (100 mm/s), sabit zımba kursu (50 mm), sabit zımba hızı (100 mm/s) ve değişken üst tampon kuvvetiyle (40 kN / 50 kN / 60 kN) gerçekleştirilmiştir. Şelil 4.3’de deney düzeneği, değişkenleri ve deneye ilgili bilgiler yer almaktadır.



Şekil 4.3. Deney düzeneği ve değişkenleri

Deneyin çalışma prensibi; ilk olarak 1 no'lu piston sac parçaya değişken kuvvetler uyguluyor. Sonrasında 3 no'lu piston 100 mm/s hızla hareket etmeye başlıyor. 2 no'lu piston ise 3 no'lu piston 10 mm hareket ettikten sonra 100 mm/s hızla hareket etmeye başlıyor. Şekilxxx'den de görüleceği üzere 3 no'lu piston toplamda 110 mm ve 2 no'lu piston ise 50 mm hareket ederek deney gerçekleşiyor. Her bir üst tampon kuvveti (40 kN / 50 kN / 60 kN) için testler 2 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. 2 tekrar olarak yapılan deneylerin sonuçları birbirine yakın olduğu için 1 denemeyle devam edilmiştir.

Deney gerçekleştirildikten sonra ilk olarak sacın altındaki iz yürümleri incelenmiştir ve Şekil4.4'deki gibi oluşan izlerin başlangıç ve bitiş ölçüleri tespit edilmiştir.



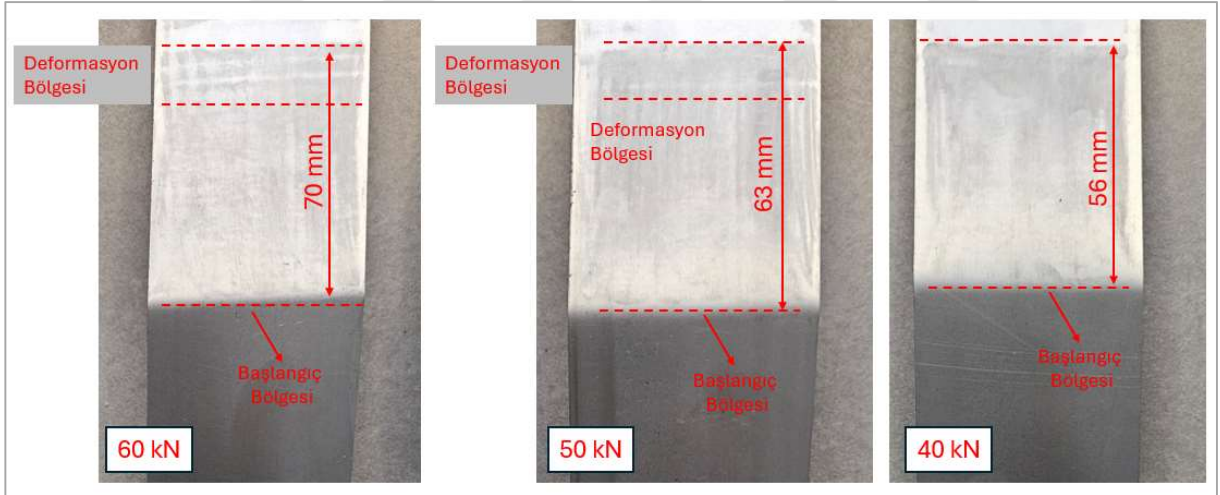
Şekil 4.4. Sacın altındaki iz yürümesi sonuçları

Deneyler gerçekleştirildikten sonra sacın üstündeki çıkan iz yürümesi sonuçlarını tespit edebilmek için görünür yüzey deformasyonlarını tespit etmekte kullanılan 150 mm x 25 mm özel bir taş yardımıyla çekme yönünde taş saca sürtme işi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu işlem Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



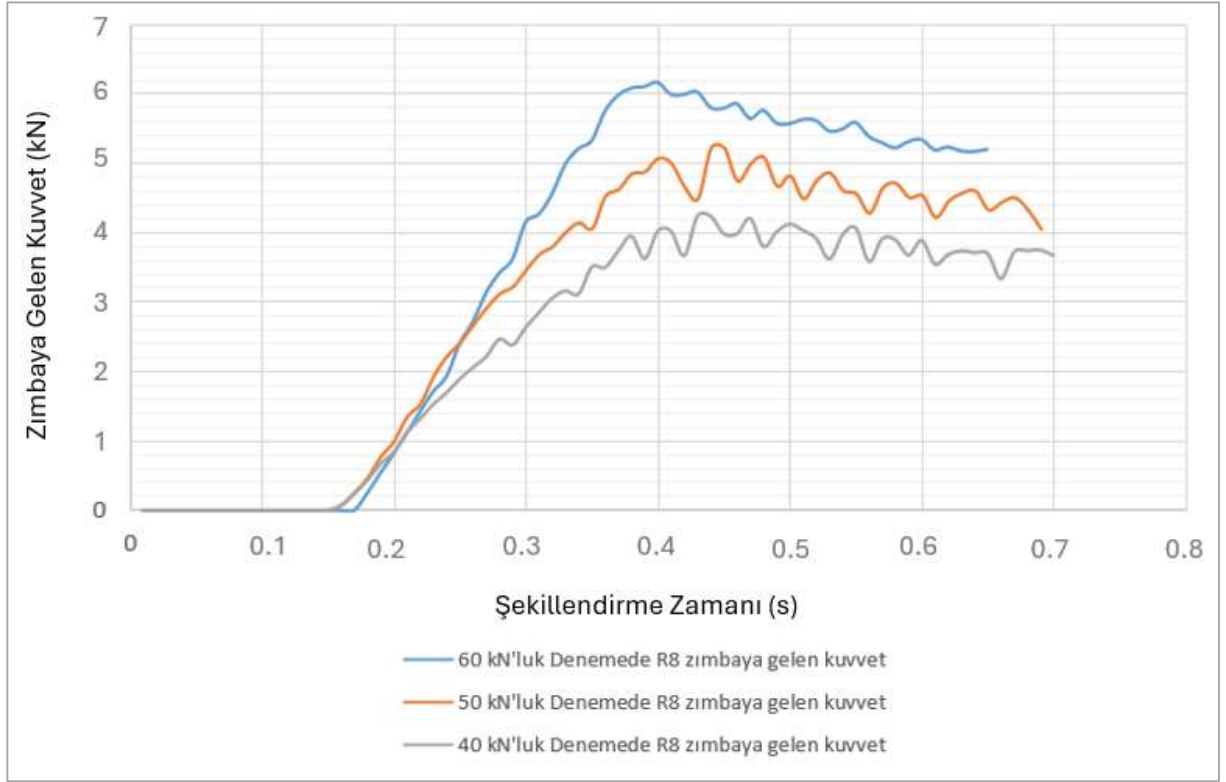
Şekil 4.5. Deformasyon tespiti için taş sürme işlemi

Deformasyon bölgesini tespit etmek için sacın üst yüzeyine taş sürtme işi bittikten sonra tüm tampon kuvvet denelemlerinin sonuçları Şekil 4.6’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6. Taş sürülmüş numunelerdeki deformasyon ölçümleri

Üst tampondaki kuvvet değişkenleri (60 kN / 50 kN / 40 kN) neticesinde çektirme işlemi esnasında R8 zımbaya gelen kuvvetler Şekil 4.7’de verilmiştir.

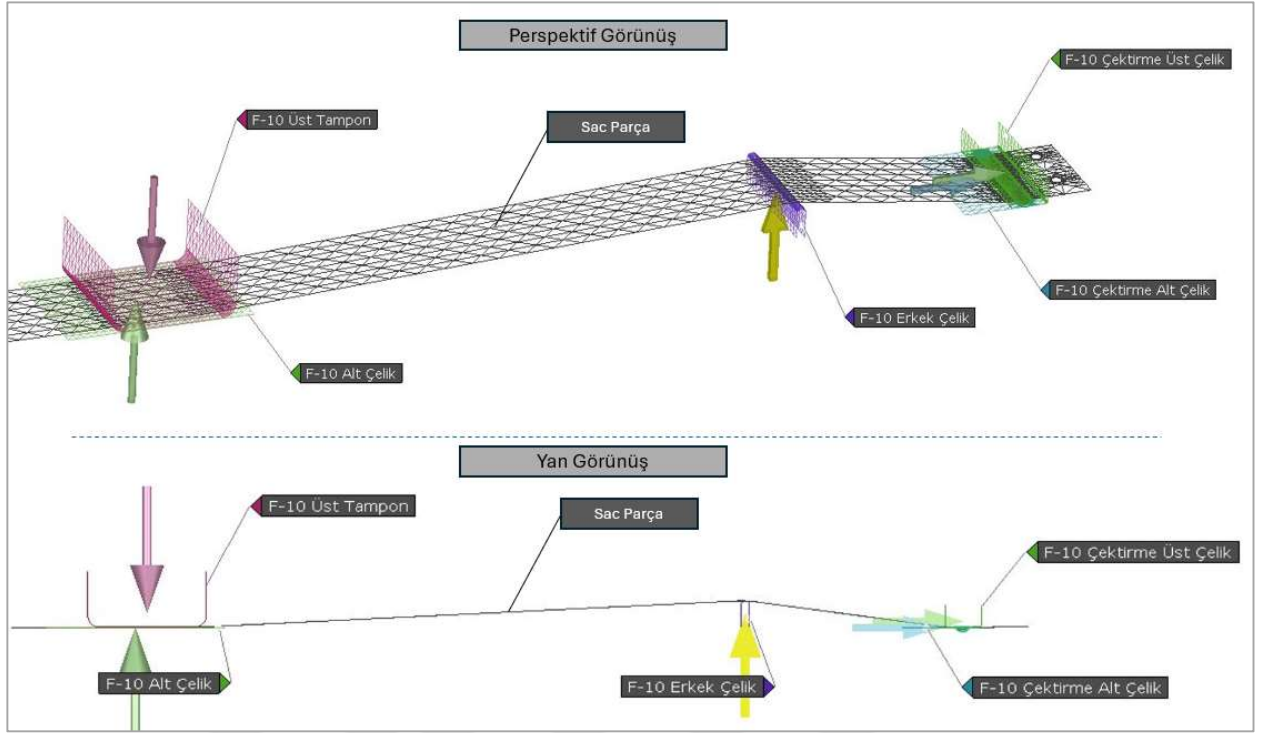


Şekil 4.7. R8 zimbaya gelen kuvvetlerin karşılaştırılması

Bu deneysel çalışmada hidrolik test düzeneğiyle değişken basınç altında saca sabit bir kuvvet verilerek bir yönde çekme işi gerçekleştirilmiştir . Bu işlemin neticesinde sacın altında ve üstünde oluşan deformasyonlar incelenmiş , zimba radyüsünde oluşan kuvvetler tespit edilmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Analizleri

Bu tez çalışmasında Bölüm 4.1’de anlatılan deneyler numerik olarak da modellenmiştir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi Autoform ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem geometrisi Catia CAD yazılımı ile yüzey olarak modellenmiştir. Bunun sebebi sac malzeme hariç kalıp geometrisinin rijit cisim olarak kabul edilmesidir. Elde edilen yüzeyler Autoform yazılımına aktarılarak ilk olarak ağ yapısı elde edilmiştir. Elde edilen ağ yapısı Şekil4.8 de verilmiştir.



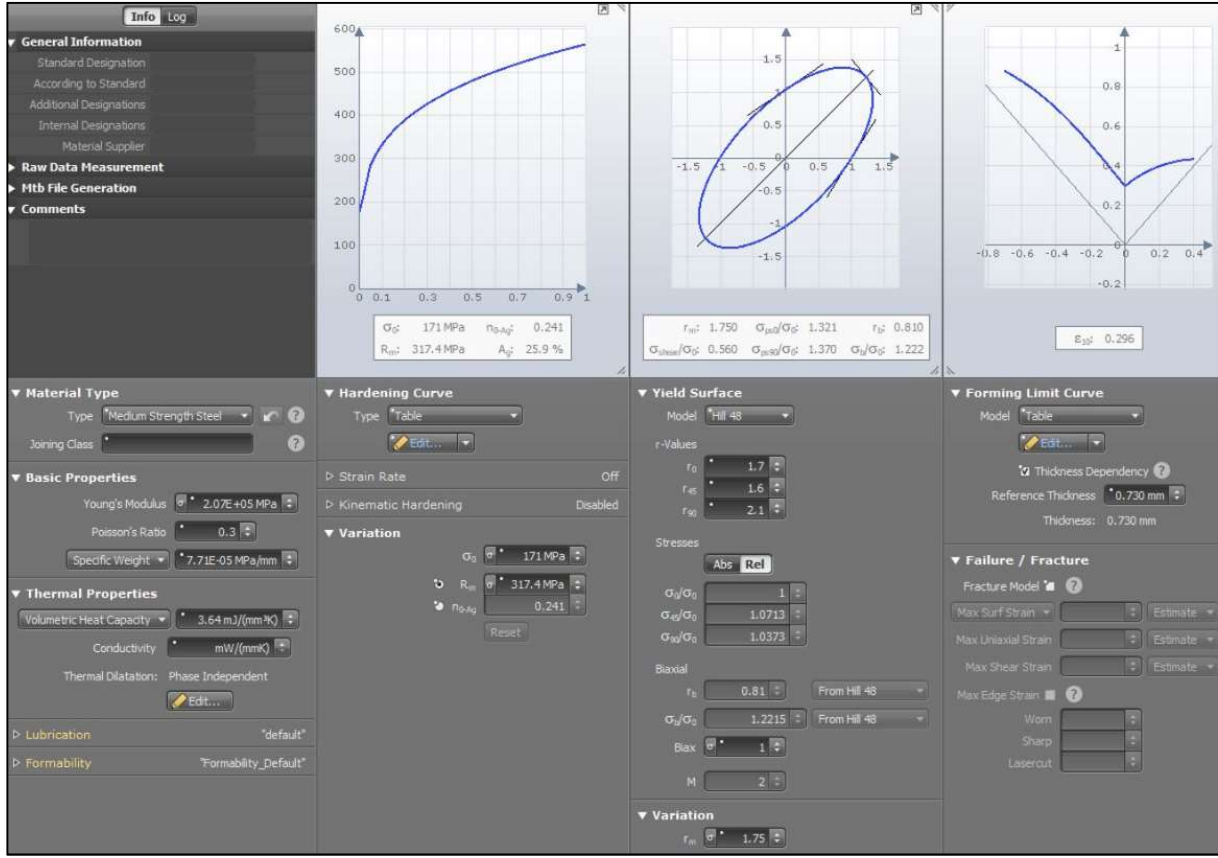
Şekil 4.8. Autoform'da kullanılan çeliklerin ağ yapıları

Şekil 4.8' de gösterilen ağ yapısını oluşturabilmek için SEA yazılımına alınan kalıp ve sac eleman ağ parametreleri tablo 4.1'de verilmiştir .

Tablo 4.1. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan eleman ve ağ yapısı parametreleri

	Parametre	Değer
Kalıp	Eleman Toleransı	0.04
	Eleman Maksimum Yan Uzunluk	10 mm
Sac	Sac Maksimum Eleman Açısı	22.5°
	Minimum Eleman Boyutu	0.31
	Ana Eleman Boyutu	40 mm
	Başlangıç Maksimum Eleman Boyutu	20 mm

Sonraki adım olarak CR4 malzemesinin tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Hill48 plastisite modeli kullanılmıştır. Malzemeye ait Autoform ticari yazılımı kütüphanesinden alınan malzeme kartı Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Autoform’da CR4 malzemesine ait malzeme kartı görseli

SEA yazılımında Autoform malzeme kartına ait mekanik özellikler, sac kalınlığı ve plastite modeli aşağıdaki tablo 4.2’de belirtilmiştir.

Tablo 4.2. CR4 malzemesine ait mekanik özellikler

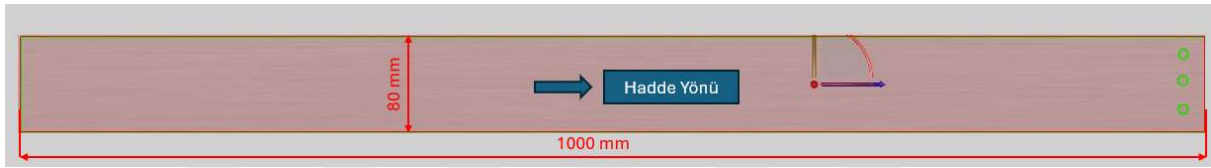
Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Poisson Oranı	Elastisite Modeli	$r_0/r_{45}/r_{90}$	Çekme Uzaması (%)	Sac Kalınlığı(mm)
171	317	0.3	Hill48	1.7 / 1.6 / 2.1	25.9	0.73

Bir sonraki adımda tanımlanan malzeme kartından sonra, SEA yazılımında çeliklere ait kullanılan değişkenler ve parametreler tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. SEA yazılımında kullanılan değişkenler

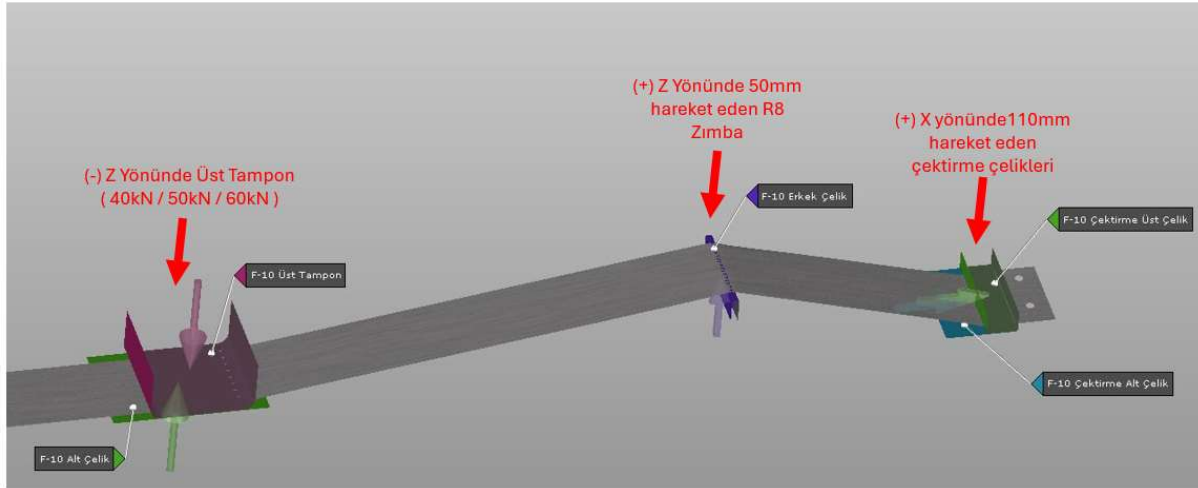
Tampon Kuvveti(kN)	Çekme Hızı(mm/s)	Erkek Çelik Vuruş Hızı(mm/s)	Sürtünme Katsayısı	Çekme mesafesi(mm)	Zımba Şekillendirme Mesafesi(mm)	Hesaplama Hassasiyeti
40/50/60	100	100	0.14	110	70	Son doğrulama hassasiyeti

SEA yazılımında kullanılan açınım ölçülerine ve hadde yönüne ait bilgiler Şekil 4.10'da s



Şekil 4.10. SEA yazılımında kullanılan açınım bilgileri

SEA yazılımında kullanılan kuvvet değişkenleri , kalıp hareketleri ve genel yapılar Şekil 4.11'de görülmektedir.



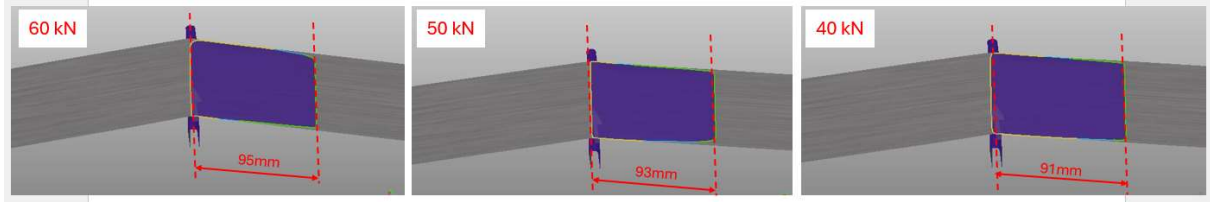
Şekil 4.11. SEA yazılımındaki genel değişkenler ve yapı

Son adım olarak da sonlu elemanlar modeli çözülmüştür. Sonuçlar iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken değerlendirme parametreleri tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Simülasyon değerlendirme kriterleri

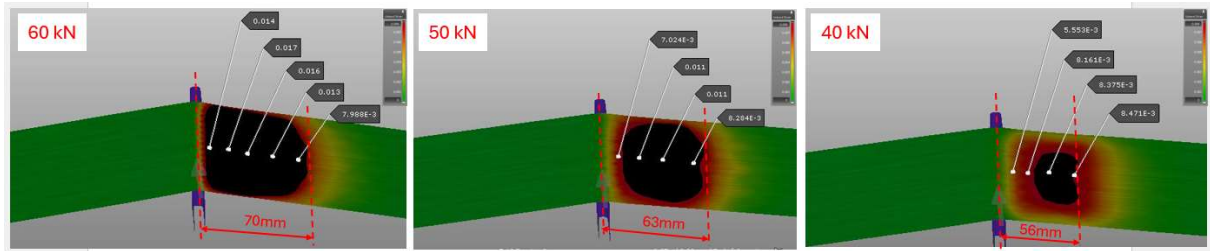
İz Yürümesi Radyüs (mm)	İz Yürümesi Basıncı (MPa)	Bükülmezlik Deformasyonu	Maksimum Temas Basıncı (MPa)
8	> 0.1	> 0.008	> 11.9

İlk olarak iz yürümesi tablo 4.4 de'ki parametrelerle kontrol edilmiştir. Bu kontrole göre üst tampon kuvvetine göre oluşan iz yürümesi sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



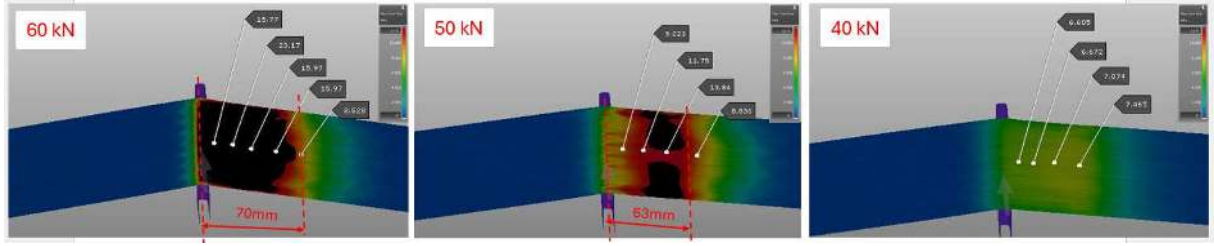
Şekil 4.12. İz yürümesi sonuçları

İkinci olarak bükülmezlik deformasyonu çıktısı incelenmiştir. 0.008'den büyük gelen alanlar siyah olarak Şekil 4.13'de belirtilmiştir.



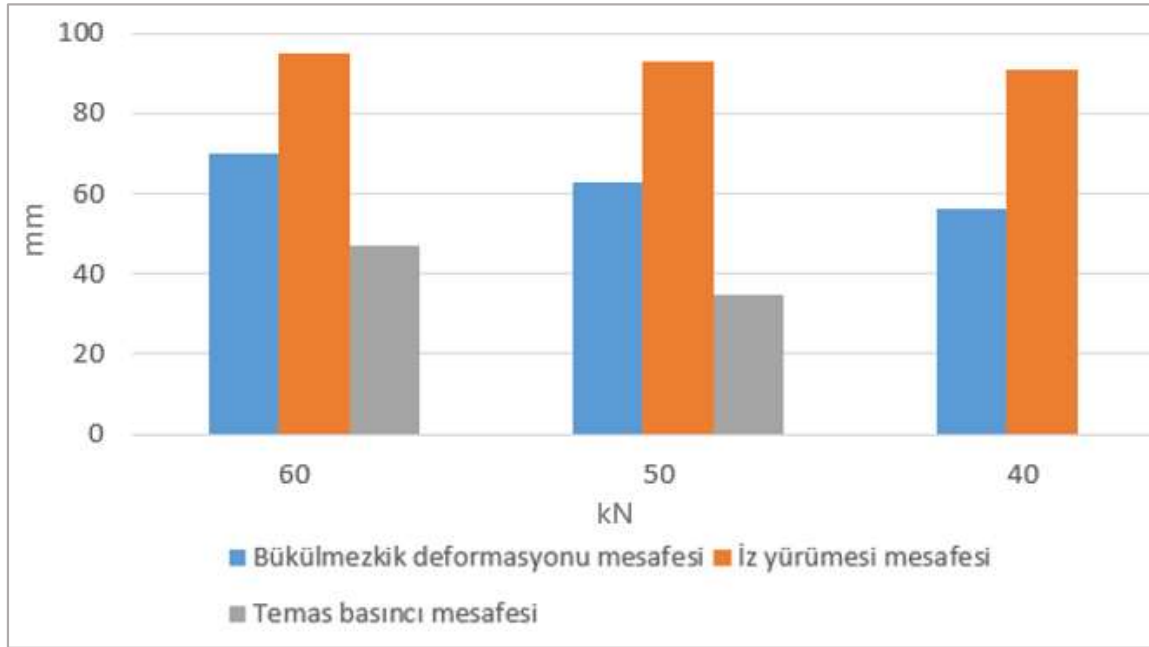
Şekil 4.13. Bükülmezlik deformasyonu sonuçları

Son olarak temas basıncı çıktısı incelenmiştir. Bu çıktıyı inceleme parametremiz CR4 malzemesinin akma dayanımının %7'si SEA yazılımına sınır olarak tanımlanmıştır. %7'nin üstünde temas basıncı olan bölgeler siyah olarak Şekil 4.14'de belirtilmiştir.



Şekil 4.14. Temas basıncı sonuçları

Böylece SEA yazılımına tanımlanan CR4 malzemeyle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İz yürümesi, temas basıncı ve bükülmezlik deformasyonu çıktılarının üst tampon kuvveti değişkeniyle gerçekleşen iz yürümesi sonuçları incelenmiştir. Bu kuvvetlere ait karşılaştırma Şekil 4.15’de verilmiştir.

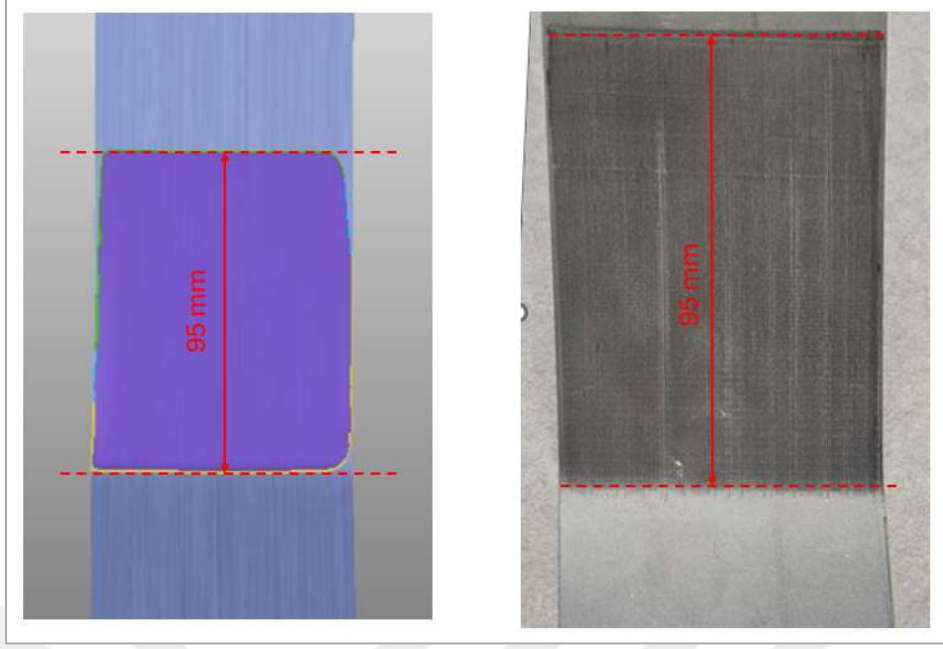


Şekil 4.15. Tampon kuvvetine bağlı deformasyon mesafeleri

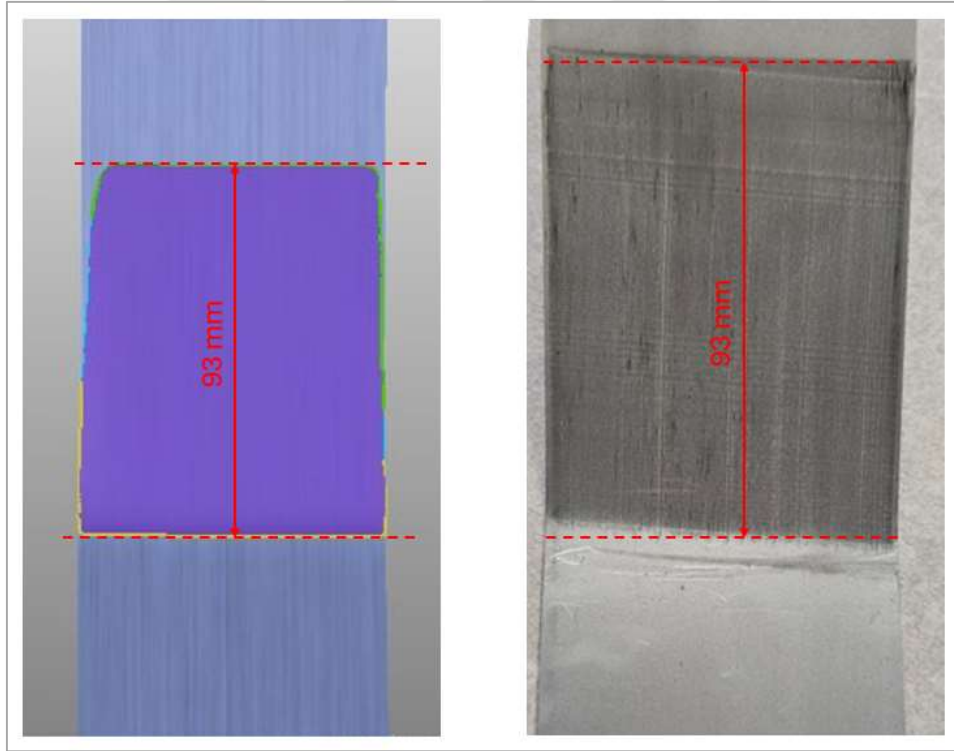
Bu SEA çalışmasında Autoform ticari yazılımı kullanılarak değişken basınç altında saca sabit bir kuvvet verilerek bir yönde çekme işi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin neticesinde iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve maksimum temas basıncı çıktısı incelenmiştir.

4.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

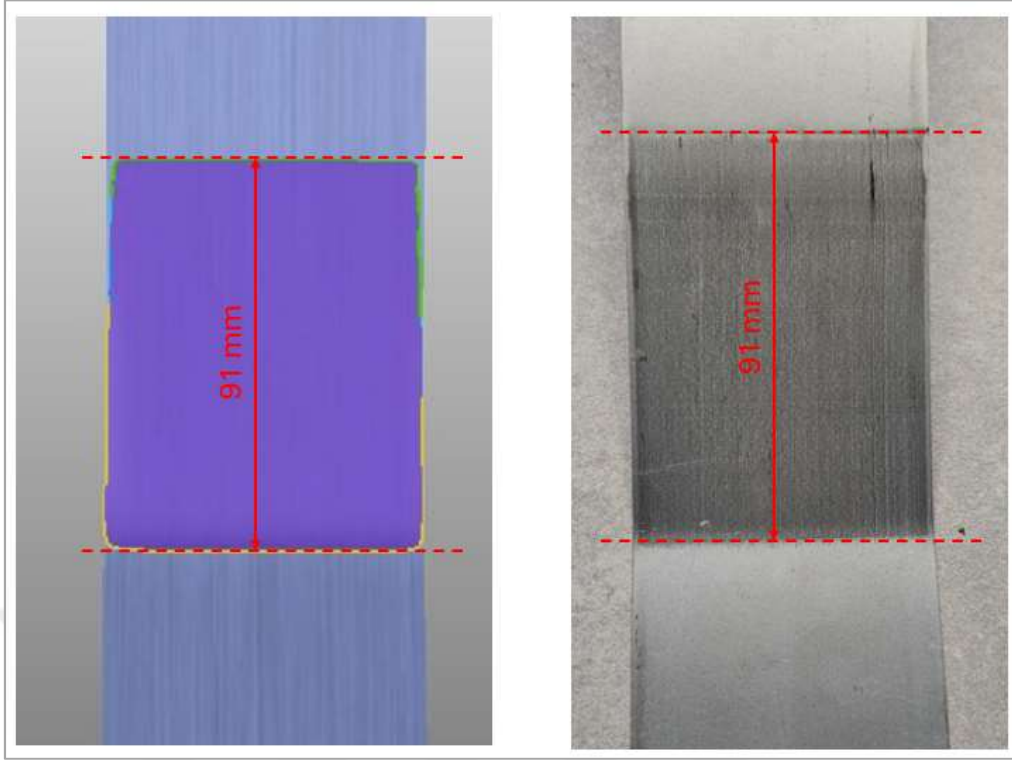
Deneysel olarak hidrolik test cihazında gerçekleştirilen testlerin numerik olarak aynı parametrelerle sonlu elemanlar analizi programında uygulaması yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde sacın altında meydana gelen iz yürümesi deformasyonu üst tampon kuvveti değişkenleri (60Kn / 50Kn / 40 Kn) ile deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması Şekil 4.16 -4.18’lerde de verilmiştir.



Şekil 4.16. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında sacın altında oluşan iz yürümesi mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

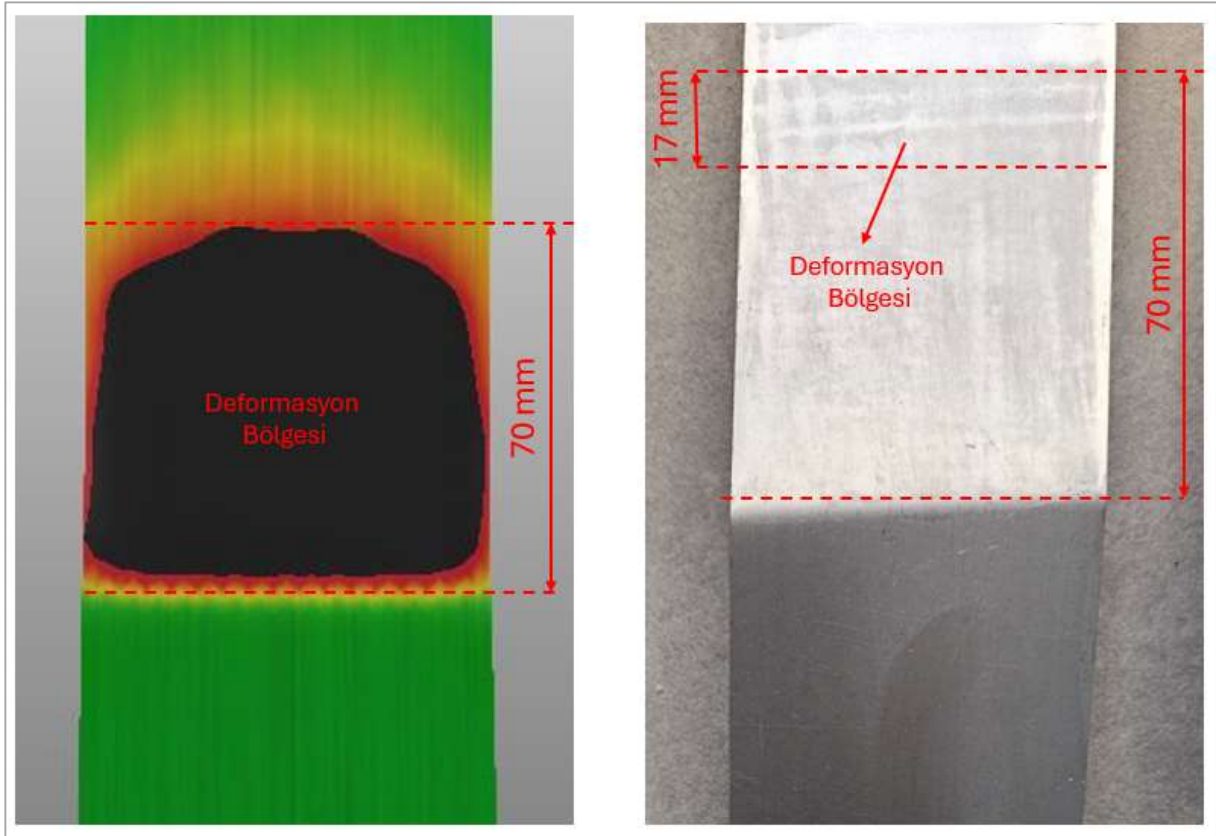


Şekil 4.17. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında sacın altında oluşan iz yürümesi mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

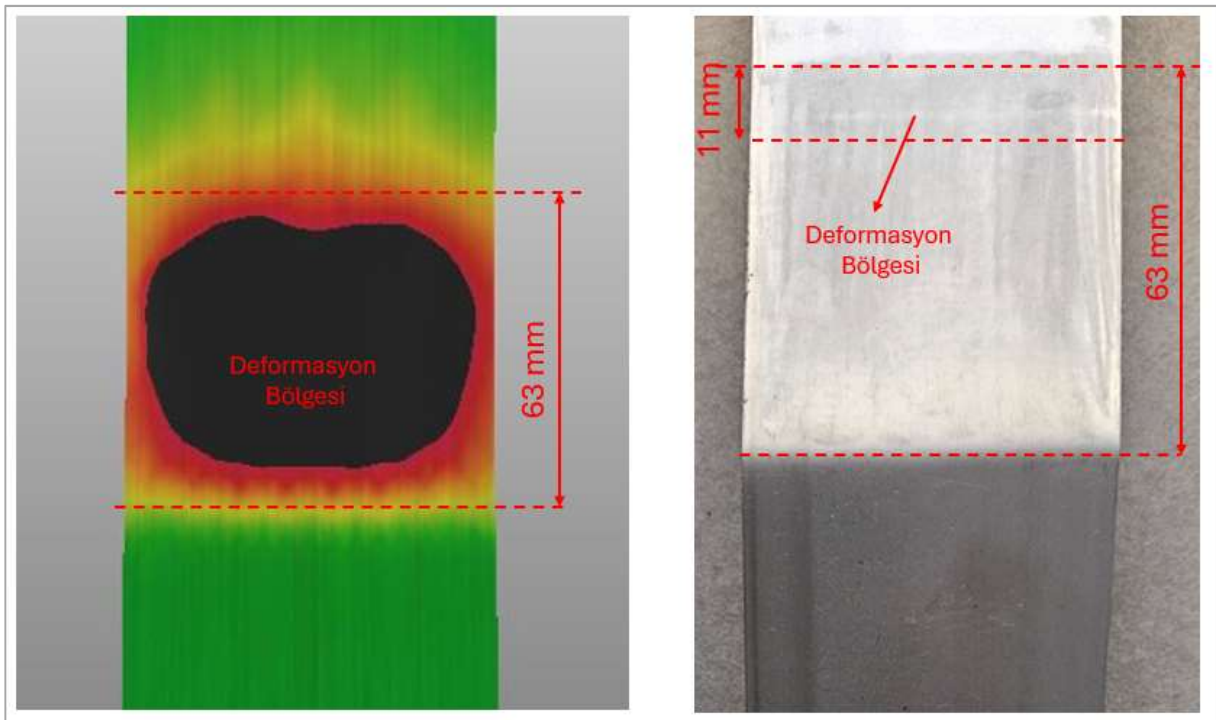


Şekil 4.18. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında sacın altında oluşan iz yürümesi mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

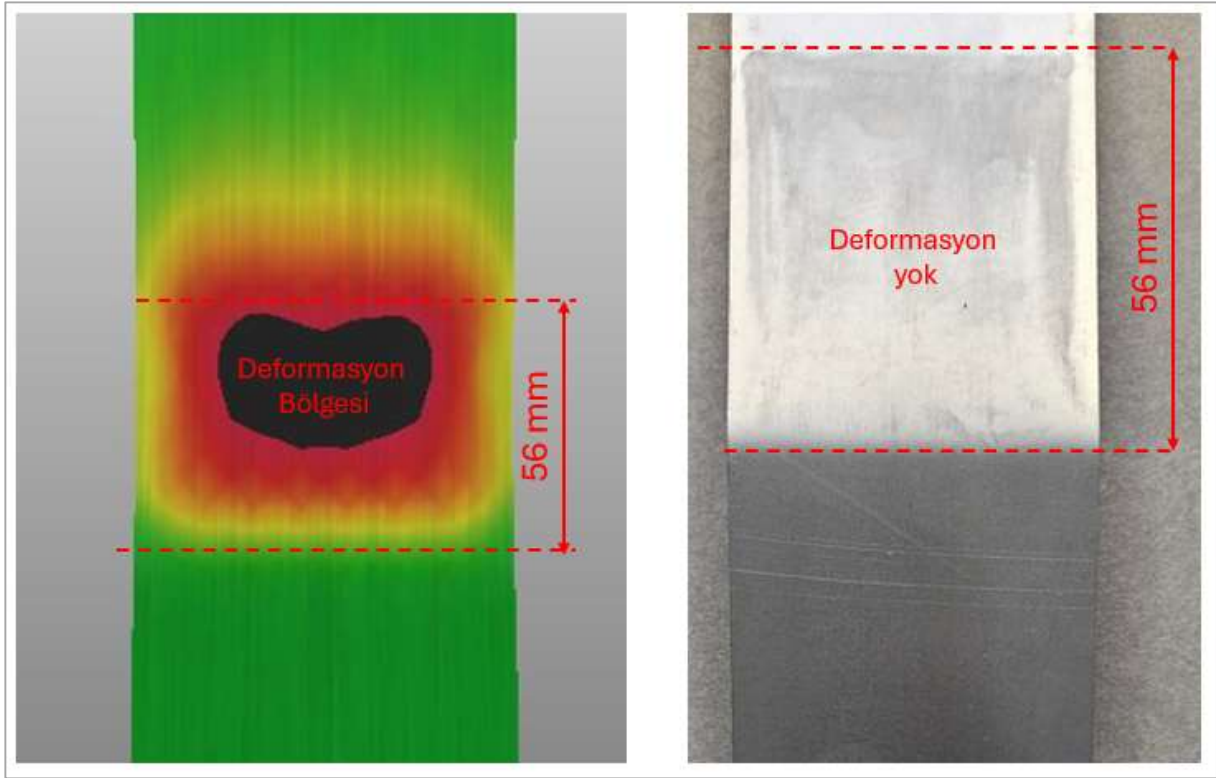
Bu bölümde sacın üstünde meydana gelen iz yürümesi deformasyonunun sonlu elemanlar analizi programındaki bükülmezlik deformasyonu çıktısıyla deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması Şekil 4.19-4.21’lerde de verilmiştir.



Şekil 4.19. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

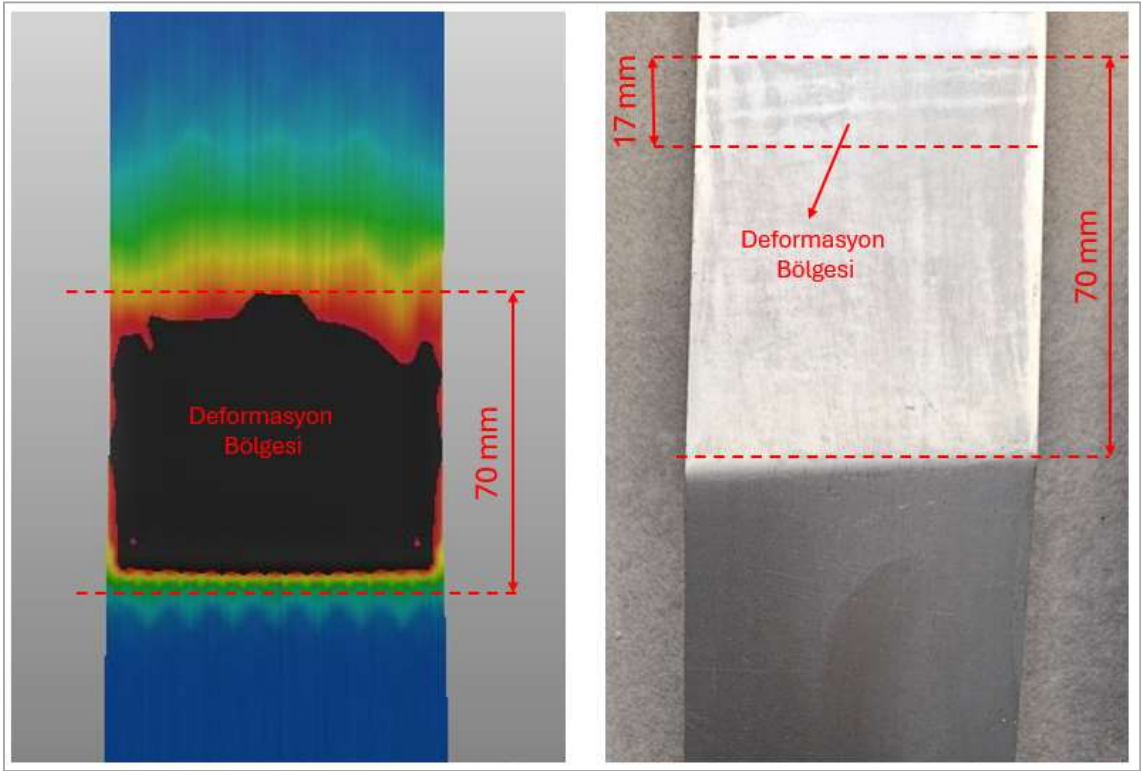


Şekil 4.20. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

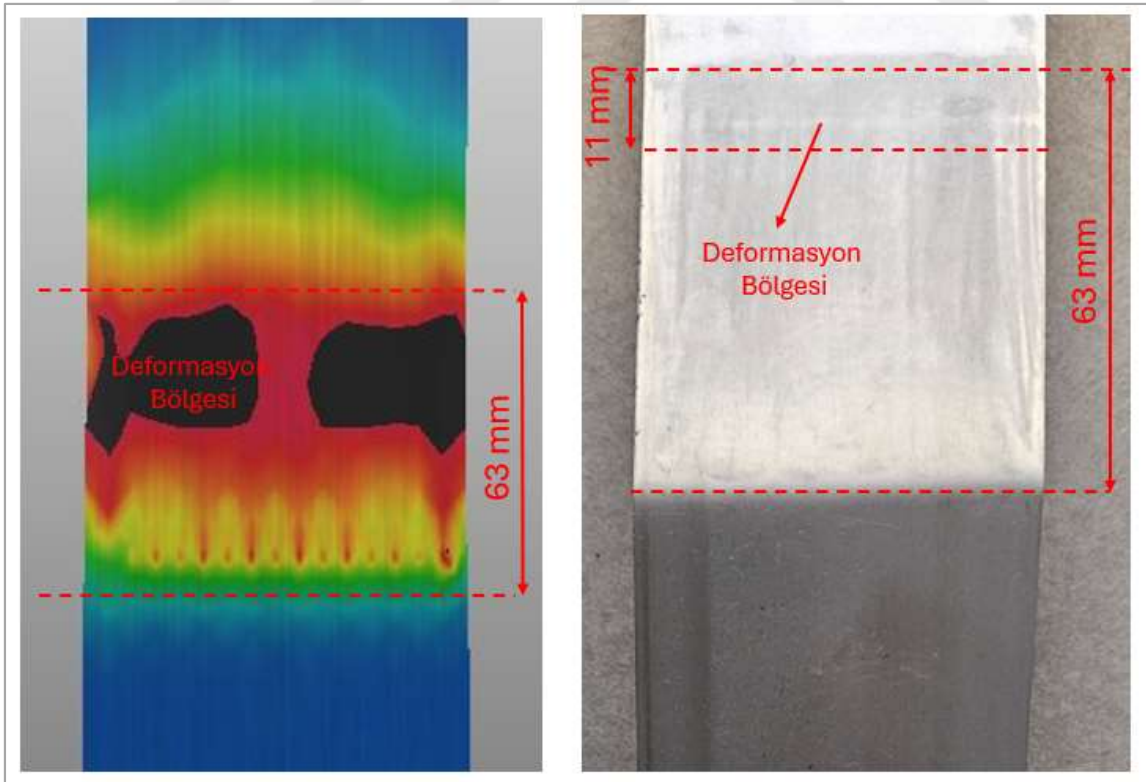


Şekil 4.21. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında oluşan bükülmezlik deformasyonu mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

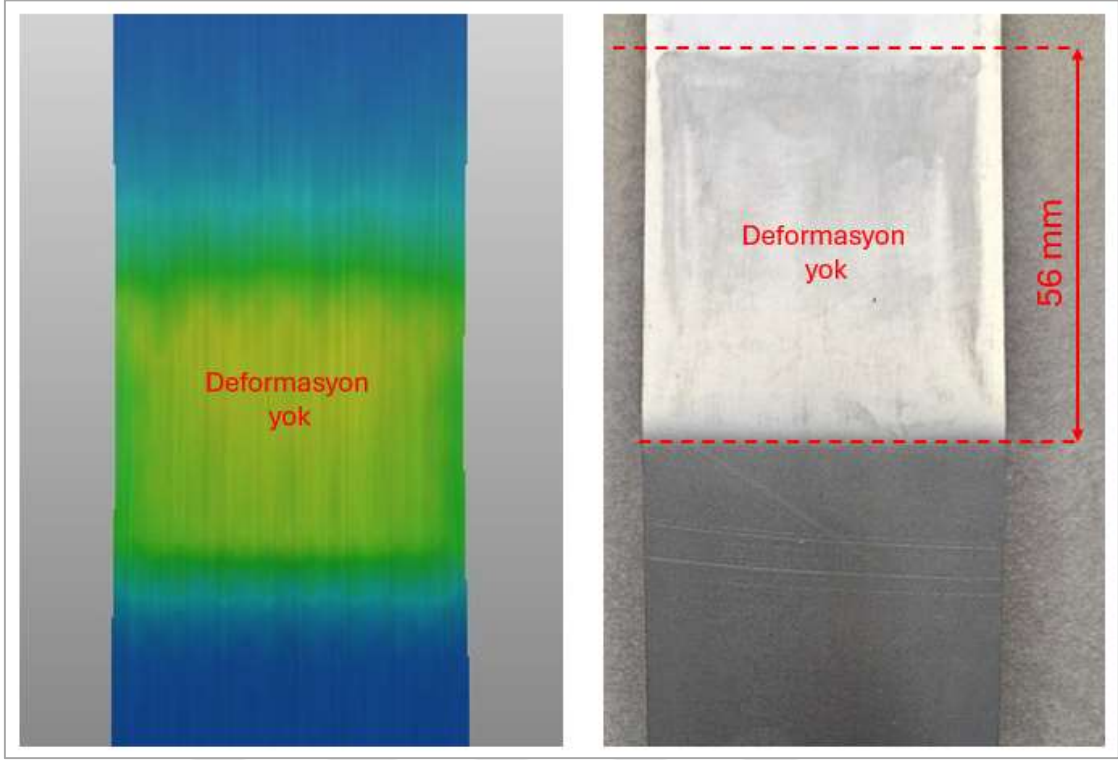
Bu bölümde sacın üstünde meydana gelen iz yürümesi deformasyonunun sonlu elemanlar analizi programındaki temas basıncı çıktısıyla deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması Şekil 4.22-4.23’lerde de verilmiştir.



Şekil 4.22. Üst tampon kuvveti 60 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması



Şekil 4.23. Üst tampon kuvveti 50 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması



Şekil 4.24. Üst tampon kuvveti 40 kN uygulandığında oluşan temas basıncı mesafesinin deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında araçların görünür yüzey sac metal parçalarında, şekillendirme esnasında gerçekleşen bir deformasyon olan iz yürümesi incelenmiştir. Kozmetik bir problem olan iz yürümesi, önceden tespit edilemediği durumlarda üretim faaliyetlerini doğrudan etkileyerek yüksek maliyetler ve çözümü zor sonuçlar doğurmaktadır. Son yıllarda otomotiv sektöründeki artan rekabetin getirisi olan keskin hatlı araç modelleri, bu problemin kalıp üretiminden önce çözümü noktasındaki önemini daha da artırmıştır. Bu problemi kozmetik kılan durum ise araç boyansa dahi sacın üzerinde oluşan deformasyon göze ve bazen elle hissedilir bir deformasyon olmasıdır.

İz yürümesinin önceden tespiti konusu, deneysel ve numerik yöntemlerle yıllardır incelenmektedir. Bu çalışmalar neticesinde sonlu elemanlar analizi programlarındaki çıktılarla deformasyonun tespiti için limitler belirlenmeye çalışılmıştır. Geline son noktada yapılan çalışmalar her ne kadar fayda sağlasada tam olarak sorunu tespit etmekte yeterli olmadığı görülmüştür. Bu durumda bir parça için kalıp proses ve fizibilite aşamasında bu sorunun tespitindeki bilinmezliklerden dolayı fazladan çalışmalar yapılmaktadır. Sonuçlardan emin olunmadan kalıp üretimine geçildiğinde ise daha büyük maliyetlerle karşılaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında bu soruna ışık tutmak için geleneksel saclardan biri olan 0.73 mm kalınlığında CR4 malzeme ile deneysel ve numerik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmada 0.73 mm X 80 mm X 1000 mm lik numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler daha önceden de bahsedildiği gibi hidrolik test cihazı yardımıyla 40 kN, 50 kN, 60 kN kuvvetlere maruz bırakılmıştır. Aynı zamanda çekirme çelikleri yardımıyla 100 mm/s hızla 110 mm mesafede sac bir yönde hareket ederken R8 zımbaya ait bir çelik de sacı şekillendirilmeye zorlanmıştır. Tekrarlı ve değişken şekillendirme işlemi gerçekleştirdikten sonra sacın altındaki deformasyonu ölçmek hedeflenmiştir. Aynı zamanda sacın üstündeki deformasyonu ölçmek için özel taşlar yardımıyla görünür hale getirilerek ölçmek hedeflenmiştir. Bu hedefler sonucunda testler gerçekleştirilmiş ve tüm tampon kuvvetlerine ait deformasyon miktarları belirlenmiştir. Bu testler neticesinde 60 kN ve 50 kN kuvvet uygulanan sacın üst yüzeyinde, panel boyandıktan sonra göze çarpacak miktarda deformasyon meydana gelmiştir. Sadece üst tampon kuvveti 40 kN olan denemede sacın üst yüzeyinde deformasyon tespit edilmemiştir.

Sonlu elemanlar analiziyle ilgili yapılan çalışmalarda Autoform ticari yazılımı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada Autoform sac kütüphanesinden CR4

malzemesi seçilmiştir. Bu malzemede Hill48 plastite modeli kullanılmış ve sac kalınlığı 0.73 mm olarak seçilmiştir. Aynı deneysel çalışmada olduğu gibi 0.73mm X 80mm X 1000mm ölçülerinde test numunesi seçilerek hadde yönü uzunluk yönünde seçilmiştir . Bu çalışmada iz yürümesi deformasyonunu, Autoform'un iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktılarını inceleyerek sacın üst yüzeyinde oluşacak deformasyonun tespit edilmesi hedeflenmiştir. Denelemer esnasında sac numuneye üst tampon yardımıyla değişken kuvvetler (40 kN, 50 kN, 60 kN) uygulanmıştır. Üst tampon tarafından uygulanan kuvvetle eş zamanlı olarak çekirme çelikleri sacı 100 mm/s hızla 110 mm çekmiş ve R8 zımba sacı 50 mm şekil vermeye zorlamıştır. Elde edilen sonuçlarda iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktıları incelenmiştir. Bu çıktılar incelendiğinde 60 kN ve 50 kN kuvvet uygulanan denemede iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncının kabul edilen sınırlar içerisinde olmadığı tespit edilmiştir. 40 kN kuvvet uygulanan çalışmada ise iz yürümesi ve bükülmezlik deformasyonu tespit edilmiş. Fakat, temas basıncı sonuçları CR4 malzemesinin akma dayanımının %7 sinden az görüldüğü için bu çıktıya göre sorun olmayacağı kanısına varılmıştır.

Sonuçlar özetlendiğinde, R8 zımba ile şekillendirme işlemi esnasında saca uygulanan tutma kuvvetinin, iz yürümesi deformasyonuna etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Numerik ve deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, sonlu elemanlar analizi programındaki çıktıların 60 kN ve 50 kN seçilerek yapılan denemelerde iz yürümesi bitiş noktasının ve sorunun varlığını tespit ettiği gözlemlenmiştir. Fakat, 40 kN ile yapılan denemelerde sonlu elemanlar analizinde bükülmezlik deformasyonu tespit edilmesine rağmen deneysel çalışmalarda deformasyona rastlanmamıştır. Bu durumda sonlu elemanlar analizi programında 40 kN'luk deneme göz önünde bulundurulduğunda, bükülmezlik deformasyonu yerine temas basıncı referans alındığında deneysel çalışmalarla birebir örtüşecektir. Bu çalışma neticesinde iz yürümesi deformasyonunun tespitinde temas basıncı çıktısının bükülmezlik deformasyonu çıktısından daha doğru veriler ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Böylece sac kalıpcılığında dış panel yüzeylerde bu sorunun tespiti için harcanan zaman ve maliyet gibi kayıpları ortadan kaldıracak veya iyileştirecektir.

KAYNAKÇA

- Civelek, F., Özdemir, A.** (2024) Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- Cyron, P., Liewald, M., Riedmüller, K., Le, T.,** (2021) Prediction and assessment of skid line formation during deep drawing of sheet metal components by using FEM simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1157. No. 1. IOP Publishing.
- Eckert A.,** (2012) Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosseriebau-teile. (Yüksek Lisans Tezi)
- Feng-Xian, L.,** [Erişim: 26.02.2020, <https://formingworld.com/china-shock-line-stamping/>]
- Hill, R.,** (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 193, 281-297.
- Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi,** [Erişim: 2018 [https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ks%C3%BC%20%C3%A7ekme%20\(1\)_1702221612397020.pdf](https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ks%C3%BC%20%C3%A7ekme%20(1)_1702221612397020.pdf)]
- Lim, Y.,**(2010) MIMO Adaptive Process Control in Stamping Using Punch Force.A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan.
- Paul, S.,** (2021) Controlling factors of forming limit curve: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2, 100033.
- Raffin, B.,** [Erişim: 25.08.2021, <https://formingworld.com/skid-lines-detection-stamping-simulation/>]
- Ren, X., Zhang, Z., Li, G.,** (2011) Prediction of slip line on automobile panel based on finite element simulation. *J. Plast. Eng.*, 11-15
- Schuler Metal Forming Hand Book,** (1998) Springer-Verlag Heidelberg, 55-60
- Smith, L., Zhou, D., Geng, L., Wanintradul, C.,** (2017) An experimental analysis device for obtaining skid line limit diagrams. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1383, No. 1, pp. 557-564). American Institute of Physics.
- Sokolova, O., Carrado, A., Palkowski, H.,** (2011) Metal–polymer–metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*, 94(1), 1-7.
- Sürmen, Y.** (2019). *Endüstri 4.0 ve otomotiv endüstrisi: Bursa ili Swot analizi ile değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa

Uysal, G., (2006) *Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi).Uludag University, Bursa

Y.Kishami et. al., (2023) Measurement of Skid Line Formation and Formation Mechanism of Automotive Outer Panel. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1284, No. 1, p. 012064). IOP Publishing

Zhao, D., Zhang, C., Zhao K., Xie Y., (2022) Experimental Study and Simulation-Based Criterion for Stamping Skid Line. *Machines*, (Yüksek Lisans Tezi). Anhui University of Science and Technology, China.

