



**6061-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIM SACIN ŞEKİLLENDİRME
ANALİZLERİNDE PEKLEŞME MODELLERİNİN TAHMİN
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Okan MERCANLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Okan MERCANLI

16/07/2025

6061-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIM SACIN ŞEKİLLENDİRME ANALİZLERİNDE
PEKLEŞME MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANSININ

DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Okan MERCANLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzemenin bükme işlemlerindeki pekleşme modellerinin farklı pekleşme modelleri ve akma kriterleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri aracılığıyla incelenmiştir. Öncelikle, ASTM-E8 standardına uygun çekme testleri yapılarak malzemenin elastik ve plastik deformasyon karakteristikleri belirlenmiş, anizotropi katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra üç nokta bükme deneyleri gerçekleştirilmiş ve farklı yarıçap ve ilerleme koşullarında şekillendirme kuvveti ile geri esneme miktarları ölçülmüştür. AutoForm R8 yazılımında Ghosh, Swift, Ludwik, Hockett-Sherby ve Swift-Hockett-Sherby pekleşme modelleri ile Hill48, Barlat89, BBC2005 ve Vegner2017 akma kriterleri kullanılarak malzeme kartları oluşturulmuştur ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle model sonuçları karşılaştırılarak şekillendirme kuvveti ve geri esneme tahmin performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, pekleşme modelleri arasında Hockett-Sherby modeli, hem ortalama mutlak yüzdelik hata hem de istatistiksel uyum katsayısı açısından en yüksek tahmin doğruluğunu sağlamıştır. Şekillendirme kuvveti tahminlerinde ise Swift-Hockett-Sherby kombine modeli özellikle düşük hata oranlarına sahip olduğu görülmüştür. Geri esneme tahminlerinde Hockett-Sherby modeli, Hill48 ve Barlat89 akma kriterleri altında en başarılı sonuçları vermiştir.

Bilim Kodu : 92917
Anahtar Kelimeler : Pekleşme modeli, akma eğrisi, sac metal şekillendirme, bükme, 6061-T6
Sayfa Adedi : 64
Danışman : Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

EVALUATION OF PREDICTION PERFORMANCE OF HARDENING MODELS IN
FORMING ANALYSIS OF 6061-T6 ALUMINUM ALLOY SHEET METAL

(M. Sc. Thesis)

Okan MERCANLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In this thesis study, the bending behavior of 6061-T6 aluminum alloy sheet material was investigated using different hardening models and yield criteria through finite element analyses. Initially, tensile tests in accordance with the ASTM-E8 standard were conducted to determine the material's elastic and plastic deformation characteristics, and anisotropy coefficients were calculated. Subsequently, three-point bending experiments were performed, and the forming forces and springback amounts were measured under different die radii and punch stroke conditions. Finite element analyses were carried out in AutoForm R8 software by creating material cards using the Ghosh, Swift, Ludwik, Hockett-Sherby, and Swift-Hockett-Sherby hardening models along with the Hill48, Barlat89, BBC2005, and Vegner2017 yield criteria. Experimental data and model results were compared to evaluate the prediction performances of forming force and springback. According to the results, among the hardening models, the Hockett-Sherby model provided the highest prediction accuracy in terms of both the mean absolute percentage error and the statistical coefficient of determination. In the prediction of forming forces, the Swift-Hockett-Sherby combined model exhibited notably low error rates. For springback predictions, the Hockett-Sherby model yielded the most successful results under the Hill48 and Barlat89 yield criteria.

Science Code : 92917

Key Words : Hardening model, flow curve, sheet metal forming, bending, 6061-T6

Page Number : 64

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve değerli katkılarıyla bana yol gösteren, her aşamada destek ve teşviklerini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Onur Çavuşoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ.....	3
2.1. Sac Metal Bükme İşlemleri.....	3
2.1.1. V bükme	3
2.1.2. U bükme	4
2.2. Geri Esneme Kavramı	4
2.3. Geri Esnemeye Etki Eden Faktörler	5
2.3.1. Malzeme özellikleri.....	5
2.3.2. Süreç değişkenleri	8
2.4. Pekleşme Modelleri.....	10
2.5. Alüminyum Alaşım Sac Malzemeler	12
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
4. MATERYAL VE YÖNTEM	17
4.1. Malzeme	17
4.2. Deneysel Yöntem	17
4.2.1. Malzeme karakterizasyonu.....	17
4.2.2. Bükme deneyleri	19

	Sayfa
4.3. Bükme Analizleri	21
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	25
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	61



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. 6061-T6 alüminyum alaşım sac kimyasal kompozisyonu.....	17
Çizelge 4.2. Malzeme kartı kombinasyonları	22
Çizelge 5.1. 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzeme mekanik özellikler	25
Çizelge 5.2. Pekleşme modelleri mutlak yüzdelik hata (MAPE) ve uyum katsayısı (R^2).....	26
Çizelge 5.3. Ludwik pekleşme kuralı parametreleri	31
Çizelge 5.4. Swift pekleşme kuralı parametreleri.....	32
Çizelge 5.5. Ghosh pekleşme kuralı parametreleri	32
Çizelge 5.6. Hockett-Sherby pekleşme kuralı parametreleri	32
Çizelge 5.7. Swift-Hockett-Sherby Kombinasyonu pekleşme kuralı parametreleri	32
Çizelge 5.7. Zimba radyüsü ve kurs mesafeleri.....	33

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. V bükme işlemi	3
Şekil 2.2. U bükme işlemi	4
Şekil 2.3. Bükme işlemi sonrası geri esneme	5
Şekil 4.1. ASTM-E8 çekme testi numune ölçüleri (mm)	17
Şekil 4.2. Bükme deneylerinde kullanılan zımbaların ölçüleri	20
Şekil 5.1. 6061-T6 gerçek şekil değiştirme – gerçek gerinim eğrileri	25
Şekil 5.2. Gerçek birim şekil değiştirme – gerçek gerilme ile pekleşme model tahminleri ilişkisi	27
Şekil 5.3. Ludwik pekleşme modeli tahmin sonucu	28
Şekil 5.4. Swift / Hockett-Sherby pekleşme modeli tahmin sonucu	28
Şekil 5.5. Ghosh pekleşme modeli tahmin sonucu	29
Şekil 5.6. Swift pekleşme modeli tahmin sonucu	29
Şekil 5.7. Hockett-Sherby pekleşme modeli tahmin sonucu	30
Şekil 5.8. Pekleşme modelleri tahmin performansları	31
Şekil 5.9. Zimba alt ölü nokta konumları	33
Şekil 5.10. 10 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	34
Şekil 5.11. 10 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	35
Şekil 5.12. 10 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	37
Şekil 5.13. 10 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	38
Şekil 5.14. 20 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	39
Şekil 5.15. 20 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	40

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. 20 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli tahmin performansı ilişkisi	42
Şekil 5.17. 20 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı	43
Şekil 5.18. 10 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı	44
Şekil 5.19. 10 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	45
Şekil 5.20. 10 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	46
Şekil 5.21. 10 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	47
Şekil 5.22. 20 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	49
Şekil 5.23. 20 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	50
Şekil 5.24. 20 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	51
Şekil 5.25. 20 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı.....	52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Bükme işlemine ait bir fotoğraf.....	20
Resim 4.2. Test düzeneğinin modellenmiş görüntüsü.....	21
Resim 4.3. Malzeme kartı oluşturulması	22
Resim 4.4. R5 zımba radyüsüne sahip analiz modeli25.....	23
Resim 4.5. R10 zımba radyüsüne sahip analiz modeli.....	23



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

K	Mukavemet katsayısı
ϵ	Birim şekil değiştirme
m	Deformasyon hızına duyarlılık katsayısı
r	Anizotropi katsayısı
w	Genişlik yönündeki şekil değişimi
t	Kalınlık
$\sigma_{müh}$	Mühendislik gerilmesi
σ_g	Gerçek gerilme
$\epsilon_{müh}$	Mühendislik şekil değiştirme
ϵ_g	Gerçek şekil değiştirme
F	Uygulanan yük (N)
ΔL	Uzama (mm)
L_0	Başlangıç uzunluğu (mm)
A_0	Başlangıç kesit alanı (mm ²)
ϵ_w	Genişlik yönü plastik şekil değişimi
ϵ_t	Kalınlık yönü plastik şekil değişimi
R	Bükme/zımba yarıçapı
n	Pekleşme üssü
σ_0	Başlangıç akma gerilmesi (MPa)
σ_i	Başlangıç akma gerilmesi (MPa)
σ_{sat}	Doygunluk gerilmesi (MPa)
b	Pekleşme hızı katsayısı
ϵ_0	Başlangıç plastik şekil değiştirme
α	Ağırlık katsayısı
ϵ_{pl}	Plastik şekil değiştirme

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA	Alüminyum alaşım
ASTM	Amerikan test ve malzeme derneği
BCC	Hacim merkezli kübik yapı
BSE	Geri saçılmış elektron
CP	Ticari saflık
DIC	Dijital görüntü korelasyonu
EDS	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FCC	Yüzey merkezli kübik yapı
HV	Vickers sertlik
OM	Optik mikroskop
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
T6	Çözeltiye alma + suni yaşlandırma ısıtma işlemi
UTS	Maksimum çekme dayanımı
YS	Akma dayanımı
σ	Standart sapma
μm	Mikrometre
MAPE	Mutlak yüzdelik hata oranı
R²	Uyum katsayısı

1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv ve havacılık sanayilerinde sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yapılan araştırmalar, yapısal bileşenlerde kullanılan malzemelerin hafifletilmesine yönelik çalışmaların önemini giderek artırmaktadır. Bu doğrultuda, taşıtlarda yakıt tüketimini azaltmak ve sera gazı salımını düşürmek amacıyla, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım sunan alternatif malzemelerin geliştirilmesi ve uygulamaya alınması temel hedeflerden biri haline gelmiştir. Bu hedefe hizmet eden malzeme gruplarının başında ise alüminyum esaslı alaşımlar gelmektedir [1-4].

Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinden sonra yüksek mekanik özelliklere ulaşabilen 6xxx serisi alüminyum alaşımları, hafiflik ve mukavemet dengesiyle dikkat çekmektedir. Otomotiv sektöründe yapısal gövde elemanları, enerji sönümleyici parçalar ve taşıyıcı sistemlerde; havacılık alanında ise uçak gövdeleri, destek profilleri ve montaj elemanlarında sıklıkla tercih edilmektedir [5–8]. Bu malzemelerin düşük yoğunlukları sayesinde ağırlık azaltılırken, performanstan ödün verilmeden tasarım kriterlerine uygunluk sağlanabilmektedir.

Bu tür alüminyum alaşım sacların endüstriyel şekillendirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bükme işlemleri, plastik deformasyon altında malzemenin akma ve geri esneme davranışlarını ön plana çıkarmaktadır. Özellikle hassasiyetin kritik olduğu otomotiv ve havacılık parçalarının üretiminde, işlem sonrası geometrik sapmaların önceden öngörülmesi, doğru kalıp tasarımı ve süreç optimizasyonu açısından önem arz etmektedir [9–10].

Bükme işleminde karşılaşılan yaygın problemlerden biri olan geri esneme, büyük ölçüde malzemenin pekleşme davranışına bağlıdır. Bu nedenle, malzemenin plastik deformasyon sürecindeki mekanik yanıtını temsil eden pekleşme modellerinin doğru seçilmesi ve bu modellerin sayısal analizlerde etkin biçimde kullanılması, üretim süreçlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmaktadır [11-14]. Özellikle, 6061-T6 gibi yaşlandırılmış alaşımlarda, pekleşmesi karakteristiğinin hassas şekilde modellenmesi, şekillendirme sonrası geometri tahminleri açısından belirleyici rol oynamaktadır [15–16].

Bu çalışma kapsamında, 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzemenin bükme işlemlerindeki davranışı çeşitli pekleşme modelleri ile analiz edilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bükme testlerinden elde edilen veriler ile sayısal simülasyon sonuçları karşılaştırılarak, her bir modelin tahmin performansı değerlendirilmiştir. Farklı modelleme yaklaşımlarının doğruluk seviyelerini belirlenmiş, 6061-T6 alüminyum alaşım sacın şekillendirme işlemlerinde güvenilir biçimde kullanılmasına yönelik katkı sunması hedeflenmiştir.



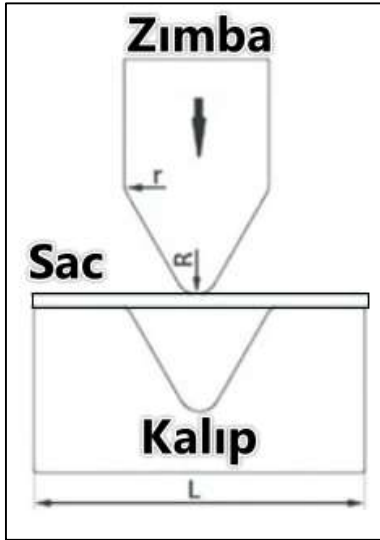
2. SAC METAL ŞEKİLENDİRME İŞLEMLERİ

Sac metal şekillendirme işlemleri düz sac metal levhaların kalıp takımları arasında plastik şekillendirme süreçleri ile yeni bir geometriye sahip sac parça üretim süreçleridir. Bu işlemler sac kesme, derin çekme ve bükme işlemleri olarak temel şekillendirme işlemlerinden oluşmaktadır.

2.1. Sac Metal Bükme İşlemleri

2.1.1. V Bükme

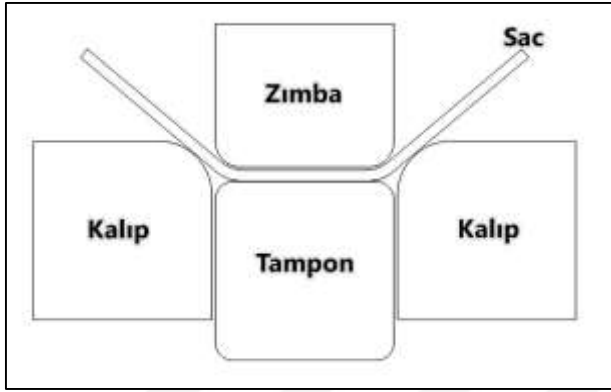
V bükme, sac metal şekillendirme işlemleri içerisinde en yaygın kullanılan bükme yöntemlerinden biri olup, adını kalıp ve zımba geometrisinin "V" şeklinde olmasından almaktadır. Bu yöntemde, sac, V şeklindeki alt kalıp üzerine yerleştirilir ve zımba ile aşağı doğru hareketi ile bükme işlemi gerçekleştirilir. V bükme, özellikle farklı bükme açlarına ihtiyaç duyulan üretim süreçlerinde tercih edilmektedir. V bükme işlemi üç ana evreden oluşmaktadır: elastik deformasyon, plastik deformasyon ve tam oturma. Eğer zımba sacı kalıbın tabanına kadar bastırmadan bükme yaparsa, bu durum "hava bükme" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de V bükme işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. V bükme işlemi

2.1.2. U bükme

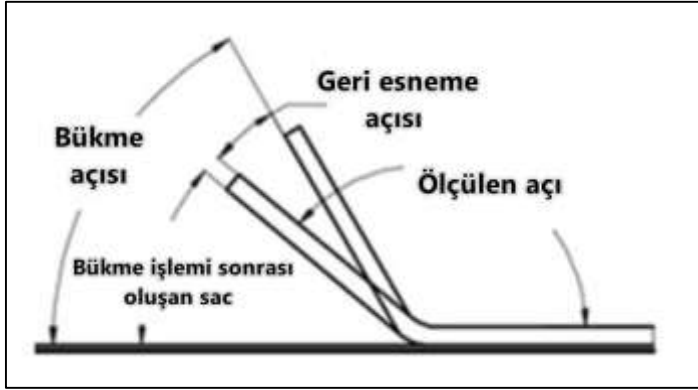
U bükme, sac metalin U şeklinde bir kesit oluşturacak şekilde bükülmesini sağlayan temel şekillendirme yöntemlerinden biridir. U bükmede, sac, kalıp ile zımba arasında plastik deformasyona uğratılır ve malzeme U formunu alacak şekilde kalıcı olarak şekillendirilir. U bükme işlemi, V bükmeye kıyasla daha farklı bir deformasyon sürecine sahiptir. Sac malzeme aynı anda iki eğri bölge ve bir taban bölge boyunca şekillendirilir. Bu nedenle, deformasyonun homojenliği ve geri esneme davranışı farklılık göstermektedir. Şekil 2.2’de U bükme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. U bükme işlemi

2.2. Geri Esneme Kavramı

Geri esneme plastik şekil verme işleminden sonra sac malzemeye uygulanan kalıplama kuvvetleri ortadan kalmasıyla elastik toparlanma nedeniyle sacın ilk haline dönme eğilimi olarak tanımlanmaktadır [17-19]. Geri esneme özellikle hassasiyetin yüksek olduğu şekillendirme işlemlerinde büyük önem taşımaktadır. Sac bükme işlemlerinde ise malzeme iç kısmı basma gerilmesine dış kısımları ise çekme gerilmesine oluşmaktadır. Zımbanın istenilen şekillendirme işlemi için hareketini tamamladıktan sonra geri hareketi ile bükülmüş parça içerisinde oluşan zıt gerilmeler sonucunda elastik enerjinin serbest kalmasıyla istenilen bükme açısından sapma meydana gelmektedir. Şekil 2.3’te bükme işlemi sonrası geri esneme durumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Bükme işlemi sonrası geri esneme

2.3. Geri Esnemeye Etki Eden Faktörler

Geri esnemeye etki eden faktörler değerlendirildiğinde malzeme özellikleri ve şekillendirme sürecindeki işlem değişkenleri olarak sınıflandırılmaktadır.

2.3.1. Malzeme özellikleri

Akma dayanımı

Akma dayanımı malzemenin plastik deformasyon sürecine başlamadan önce elastik bölgede ulaşabileceği maksimum dayanım miktarıdır. Geri esneme süreci sac şekillendirme işlemi sonrasında sac üzerinde oluşan elastik toparlanma ile ilişkilidir. Bu nedenle yüksek akma dayanımına sahip sac malzemelerin de elastik toparlanma daha yüksek olmaktadır [20-22]. Bu da şekillendirme işlemi sonrası daha yüksek geri esneme davranışı göstermesine neden olmaktadır.

Anizotropi

Sac malzemelerde anizotropik davranış genellikle haddeleme sırasında yönlenmeye bağlı olarak kristal yapının belirli bir doğrultuda yönlenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Anizotropinin miktarı Lankford katsayısı (r değeri) ile ifade edilmektedir. Bu katsayı, enine plastik şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmeye oranıdır [23-24] (Eşitlik 2.1). ϵ_w genişlikteki plastik şekil değişimi, ϵ_t ise kalınlıktaki plastik şekil değişimidir. Anizotropi miktarı şekillendirme işleminde yönsel akma dayanımı, uzama miktarları ile geri esneme gibi birçok

davranışı etkilemektedir. Özellikle sac şekillendirme analizlerinde anizotropi değerlerinin doğruluğu analiz sonuçlarını direk olarak etkilemektedir.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.1)$$

Bauschinger etkisi

Bauschinger etkisi sac metal malzenin şekil değişimine uğradıktan sonra ters yönlü bir yüklemeye maruz kaldığında daha düşük bir akma dayanımı göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Bauschinger etkisinin temelinde ilk şekil değişimi sırasında dislokasyonların belirli bir yönde birikmesi ve ters yükleme durumunda daha kolay hareket edebilmesi nedeniyle kaynaklanmaktadır [25]. Sac şekillendirme işleminde zımba hareketini tamamlaması sonrasında sac üzerinden geri çekilmesi sonrasında bauschinger etkisi ile beraber daha fazla elastik toparlanmaya neden olabilmekte bu durum da sacın şekillendirme işlemi sonrası daha yüksek miktarda geri esneme oluşmasına neden olabilmektedir. Sac şekillendirme analizlerinde bauschinger etkisini dikkate alan modellerin tahmin doğruluğunu arttırması açısından önem taşımaktadır.

Elastite modülü

Malzemenin elastik modülü, çekme testi sonucu elde edilen birim uzama – gerilme eğrisinin başlangıcı ile akma noktası arasında kalan ve Hooke kanuna göre tanımlanan doğrusal eğim elastite modülü vermektedir [26]. Geri esneme şekillendirme işlemi sonrası elastik toparlanma ile ilişkili olduğundan elastite modülü akma dayanımı ile beraber önemli bir rol oynamaktadır. Elastite modülünün yüksek olması aynı gerilme değeri altında malzemenin daha az elastik şekil değişimi gösterdiği ve bu nedenle de geri esneme miktarının da daha düşük olmasını beklenmektedir. Elastite modülünün düşük olduğu durumlarda ise aynı gerilme değerinden daha yüksek elastik şekil değişimine sahip olacağından geri esneme miktarının daha yüksek olması öngörülmektedir.

Pekleşme üsteli

Pekleşme sac malzemenin şekillendirme işlemi sırasında iç yapıda oluşan dislokasyon etkileşimleri sonucunda dislokasyon hareketinin kısıtlamaya çalışılmasıyla şekillendirmeye karşı direncin artması olarak ifade edilebilmektedir [27]. Şekil değişimi arttıkça malzeme içerisindeki dislokasyon yoğunluğu artmakta ve bu dislokasyonlar birbirlerinin hareketini zorlaştırarak, ilave şekil değişimi için için daha yüksek gerilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, malzemenin mukavemetinde artışa neden olmaktadır. Bu durumda şekillendirme sürecinin doğrudan etkilemektedir. Pekleşme davranışı malzemenin akma gerilmesi ile çekme gerilmesi arasında kalan plastik bölgenin Hollomon eşitliği ile ilişkilendirilmesi ile belirlenmektedir. Bu denklem literatürde Ludwik akma kuralı olarak da bilinmektedir. Hollomon eşitliği, plastik deformasyon bölgesinde bir malzemenin birim şekil değişimi - gerinim davranışını açıklamak için kullanılan ampirik bir ifadedir (Eşitlik 2.2). Burada; σ : Gerilme (MPa), ε : Plastik birim şekil değişimi, K : Mukavemet katsayısı (MPa), n : pekleşme üstelini ifade etmektedir.

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (2.2)$$

Sac metal şekillendirme işlemlerinde yüksek n değeri şekillendirme sürecinde gerilmenin daha hızlı arttığı anlamına gelmektedir. Yüksek pekleşme üsteline sahip sac malzemelerde daha homojen bir gerilme dağılımı sağlayarak boyun verme davranışını geciktirebilmektedir. Ayrıca, homojen gerilme dağılımı elastik toparlanmayı azaltıcı etki yaparak geri esneme miktarını azalmasına katkı sağlayabilmektedir.

Tane boyutu

Sac metal malzemelerin tane boyutu sacın şekillendirme özelliklerini doğrudan etkileyebilecek önemli bir malzeme parameteresidir. Tane boyutu küçüldükçe dislokasyon hareketi zorlaşacağından akma gerilmesi artmaktadır [28-29]. Bu durum Hall-Petch eşitliği ile ifade edilmektedir. Hall-Petch eşitliği Eşitlik 2.3'te verilmiştir. İnce taneli sac malzemelerin şekillendirmesi sırasında daha homojen bir plastik deformasyon oluşmasını sağlamakta böylelikle şekillendirilebilirliği geliştirici katkı sağlamaktadır. İnce taneli yapıların daha yüksek akma dayanımına sahip olması, elastik toparlanma miktarını artırarak geri esneme davranışını olumsuz yönde de etkileyebilmektedir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k * d^{-1/2} \quad (2.3)$$

σ_y : Akma dayanımı

σ_0 :Malzeme sabiti

k : Hall-Petch sabiti

d : Ortalama tane çapını ifade etmektedir.

2.3.2. Süreç değişkenleri

Bükme yarıçapı

Sac bükme işlemlerinde bükme sürecini etkileyen geometrik bir parametredir. Bükme esnasında zımbanın hareketi ile sacın şekillendirme yani bükme sınırlarını belirleyen önemli bir etkindir [30-31]. Bükme yarıçapının küçülmesi bükme bölgesinde plastik deformasyon yoğunluğunu arttırmakta ve çatlak riski oluşturabilmektedir. Bükme yarıçapının artması ise bükme işlemi sonrası geri esneme davranışını arttırabilmektedir. Ayrıca, bükme yarıçapı bükme esnasında oluşan sac şekillendirme kuvvetini de etkilemektedir. Bükme yarıçapının küçülmesi şekillendirme kuvvetinde artışa neden olmaktadır. Bu nedenler ile tasarım süreci esnasında sac malzemenin mekanik özellikleri, sac kalınlığı ve bükme parameterleri ile beraber bükme yarıçapının belirlenmesi gerekmektedir.

Bükme açısı

Bükme açısı, sac metal bükme işlemlerinde ürünün nihai geometrisini belirleyen etkenlerdendir. Bükme işlemi esnasında zımbanın hareketi ile sac parça bu açı etrafında elastik ve plastik deformasyona uğrar ve şekillendirme işlemi tamamlanır. Açının değeri geri esneme ve şekillendirme kuvvetini doğrudan etkilemektedir [32]. Bükme işleminde oluşabilecek geri esnemeyi telafisini sağlamak açısından bükme açısında dikkate alınmalıdır [33].

Saç kalınlığı

Saç kalınlığı bükülebilirlik ve geri esneme davranışını etkilemektedir [33]. Bükme yarı çapı (r) / sac kalınlığı (t) oranına bağlı olarak geri esneme davranışı değerlendirilmelidir. r/t oranının artması ile geri esneme davranışı artış göstermektedir. Ayrıca, sac kalınlığı artışı şekil alabilmeyi olumlu yönde etkilediğinden dolayı bükülebilirliği geliştirebilmektedir.

Pres hızı

Şekillendirme sürecinde pres hızı sacın deformasyona karşı mekanik özelliklerini değiştirdiğinden dolayı şekillendirme sürecini etkilenebilmektedir [35]. Düşük pres hızlarında yapılan bükme işlemlerinde şekillendirme süreci için yeterince zaman olduğundan malzeme üzerinde deformasyon homojen olarak dağılmaktadır. Bu durum şekillendirilebilirlik kabiliyeti sınırlı malzemeler için bükme işlemi esnasında çatlama riskini azaltabilmektedir. Ancak, yüksek pres hızında yapılan şekillendirme işlemlerinde ise kısa şekillendirme süresi sacda çatlama riskini arttırmaktadır.

Sıcaklık

Sıcaklık malzemenin mekanik özelliklerini etkileyerek şekillendirilebilirlik kabiliyetini doğrudan etkilemektedir [35]. Genellikle, sıcaklığın artması, malzemenin sünekliğini artırırken, elastik modülü, akma gerilmesi ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sıcaklık artışı, malzemenin pekleşme davranışını da etkileyerek pekleşme üstelinin (n) azalmasını neden olmaktadır. Sıcaklığın sac malzemedeki oluşturduğu etkilerde şekillendirme açısından değerlendirildiğinde ise sıcaklığın artması, kalıplama kuvveti gereksinimini azaltmakta ve deformasyon sırasında oluşan iç gerilmeleri düşürmektedir. Bu da hem kalıp aşınmasını azaltmakta hem de geri esneme miktarını azaltarak hedeflenen geometriye daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Yağlama

Saç metal şekillendirme işlemlerinde yağlama, iş parçası ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltarak malzeme akışını kolaylaştıran bir uygulamadır [36-37]. Yağlama, temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısını düşürerek şekillendirme sırasında gerekli

kuvvetin azaltılmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, hem şekillendirme kuvvetinin düşürülmesini sağlamakta hem de kalıp elemanlarının maruz kaldığı mekanik yükleri azaltarak kalıp aşınmasını önemli oranda azaltmaktadır.

Ütüleme süresi

Sac bükme işlemlerinde ütüleme işlemi ürünün geometrik hassasiyetini arttıran ek bir deformasyon süreci olarak değerlendirilebilmektedir. Bu işlemde bükme sonrası sac parçada lokal plastik deformasyonu arttırmak ve elastik gerilmeleri azaltarak geri esneme davranışını en aza indirmek amacıyla yapılmaktadır. Ütüleme işlemi genel olarak sacın mekanik kararlılığı arttırmakta geometrik olarak olumlu katkılar sağlamaktadır.

2.4. Pekleşme Modelleri

Pekleşme davranışını tanımlamak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan beş farklı pekşeme modeli verilmiştir [38]. Bu modeller çekme testi sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme ilişkisini matematiksel olarak ifade ederek, şekillendirme analizlerinde sac malzemenin davranışını doğru olarak tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Ludwik modeli

Ludwik modeli Eşitlik 2.4'te verilmiştir. Burada σ gerçek gerilmeyi (MPa), σ_0 başlangıç akma gerilmesini (MPa), K mukavemet katsayısını (MPa), ε gerçek plastik şekil değiştirmeyi ve n pekleşme üssünü temsil etmektedir.

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (2.4)$$

Swift modeli

Swift modeli, Ludwik modeline başlangıç plastik şekil değiştirme parametresini ekleyerek ön şekil değiştirme etkisini dikkate almaktadır. Eşitlik 2.5'te Swift modelinin matematiksel ifadesi verilmiştir. Burada ε_0 , malzemenin başlangıç plastik şekil değiştirmeyi temsil

etmektedir. C mukavemet katsayısı (MPa), ε_{pl} plastik şekil değiştirme ve n pekleşme üssü parametreleridir.

$$\sigma = C(\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^n \quad (2.5)$$

Ghosh modeli

Ghosh modelini matematiksel ifadesi Eşitlik 2.6'da sunulmaktadır. ε_0 başlangıç plastik şekil değiştirme değeri, C mukavemet katsayısı (MPa), ε_{pl} plastik şekil değiştirme ve n pekleşme üssü olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak, pekleşme eğrisinin yüksek plastik şekil değiştirme bölgelerinin daha doğru tahmin etmek için D düşürme katsayısını ifade etmektedir.

$$\sigma = C(\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^n - D \quad (2.6)$$

Hockett–Sherby modeli

Hockett–Sherby Modeli modelini matematiksel ifadesi Eşitlik 2.7'de verilmiştir. Bu modelde σ_{sat} doymunluk gerilmesini (MPa), σ_i başlangıç akma gerilmesini (MPa), k doymunluğa ulaşma katsayısını, ε_{pl} plastik şekil değiştirmeyi ve p ise yüksek şekil değiştirme değerlerinde eğri eğim parametresini ifade etmektedir.

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{-k\varepsilon_{pl}^p} \quad (2.7)$$

Swift / Hockett–Sherby kombine modeli

Bu model, Swift ve Hockett–Sherby modellerinin belirli oranlarda birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Eşitlik 2.8'de matematiksel ifadesi verilmiştir. Burada α ($0 \leq \alpha \leq 1$) iki modelin katkı oranını belirleyen ağırlık katsayısıdır. C mukavemet katsayısı (MPa), ε_0 başlangıç plastik şekil değiştirme, ε_{pl} plastik şekil değiştirme, n pekleşme üssü, σ_{sat} doymunluk gerilmesi (MPa), σ_i başlangıç akma gerilmesi (MPa) ve k doymunluğa ulaşma hız katsayısı ve p eğri şekil parametresi modelin tanımlayıcı parametreleridir.

$$\sigma = (1 - \alpha) \cdot C(\varepsilon_0 + \varepsilon_{pl})^n + \alpha(\sigma_{sat} + (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{-k\varepsilon_{pl}^p}) \quad (2.8)$$

2.5. Alüminyum Alaşım Sac Malzemeler

Alüminyum alaşım sac malzemeler, kullanım alanlarının gereklilikleri ve üretim yöntemlerinin özellikleri doğrultusunda, kimyasal bileşimleri ve üretim süreçlerine göre sistematik olarak sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel olarak kullanılan alüminyum alaşım türleri aşağıda verilmiştir [39-40].

1xxx Serisi – Ticari saf alüminyum

1xxx serisi alüminyum alaşımları, %99 ve üzeri saflıkta alüminyum içermekte olup, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, mükemmel korozyon direnci ve üstün şekillendirilebilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Isıl işlemle mukavemet kazanamayan bu alaşımlar, düşük dayanım seviyeleri nedeniyle yapısal uygulamalarda tercih edilmemektedir.

2xxx Serisi – Alüminyum-bakır alaşımları

2xxx serisi alaşımlar, bakır elementi ile güçlendirilmiş olup, yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri göstermektedir. Isıl işlemle mukavemeti artırılabilen bu alaşımlar, düşük korozyon direnci nedeniyle genellikle yüzey işlemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Şekillendirilebilirlikleri sınırlı olmakla birlikte, havacılık ve savunma sanayi gibi yüksek dayanım gerektiren alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

3xxx Serisi – Alüminyum-manganez alaşımları

Manganez alaşımı içeren 3xxx serisi alüminyumlar, orta düzey mekanik dayanım ve yüksek korozyon direnci ile karakterize edilmektedir. Isıl işlemle mukavemet artırılamamakta, ancak soğuk şekillendirme ile güçlendirilebilmektedir. Bu alaşımlar, otomotiv iç panelleri, mimari kaplamalar ve ev tipi eşyalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

4xxx Serisi – Alüminyum-silikon alaşımları

4xxx serisi alüminyum alaşımları, silisyum katkısı ile düşük genleşme katsayısı, iyi aşınma direnci ve yüksek ısı dayanımı gibi özellikler kazanmaktadır. Orta düzeyde mekanik

mukavemete sahip olan bu alaşımlar, genellikle otomotiv parçaları, kaynak telleri ve ısıya dayanıklı uygulamalarda tercih edilmektedir.

5xxx Serisi – Alüminyum-magnezyum alaşımları

Magnezyum katkılı 5xxx serisi alaşımlar, yüksek korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve üstün soğuk şekillendirme özellikleri bulunmaktadır. Isıl işleme mukavemet artırılamamaktadır. Gemi yapımı, otomotiv gövde parçaları ve basınçlı kaplar gibi uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

6xxx Serisi – Alüminyum-magnezyum-silikon alaşımları

6xxx serisi alaşımlar, dengeli mekanik özellikleri, iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi avantajları sayesinde çok yönlü kullanım imkânı sunmaktadır. Isıl işleme mukavemeti artırılabilen, korozyon direnci ile birlikte orta-yüksek dayanım elde edilebilmektedir. Otomotiv endüstrisinde gövde ve şasi parçaları, inşaat sektöründe ise profiller ve yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

7xxx Serisi – Alüminyum-çinko alaşımları

Çinko esaslı 7xxx serisi alaşımlar, alüminyum alaşımları arasında en yüksek mukavemet seviyesine sahip grup olarak bilinmektedir. Isıl işleme sertleştirilebilen bu alaşımlar, düşük korozyon dirençleri nedeniyle yüzey kaplama işlemleriyle birlikte kullanılmaktadır. Havacılık, uzay ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

8xxx Serisi – diğer özel alaşımlar

8xxx serisi alaşımlar, lityum, demir veya diğer özel elementlerle alaşımlandırılmış ve belirli fonksiyonel ihtiyaçlara göre tasarlanmış malzemeleri kapsamaktadır. Yüksek iletkenlik, düşük yoğunluk ve bariyer özellikleri gibi nitelikleri ile öne çıkan bu grup, genellikle alüminyum folyo, içecek kutuları ve batarya sistemlerinde kullanılmaktadır. Özelleştirilmiş yapısı nedeniyle belirli endüstriyel niş alanlarda önemli rol oynamaktadır.



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda sac metal şekillendirme süreçlerinde pekleşme modellerinin tahmin performansını arttırılamsı amacıyla farklı sac malzeme ve farklı pekleşme modelleri kullanılarak çeşitli araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Bu araştırmalarda farklı pekleşme modellerinin şekillendirme analizlerindeki etkilerini ortaya koymuş ve her modelin belirli şartlar altında tahmin doğruluğunda önemli etkileri olduğu görülmüştür.

Dizaji ve arkadaşları, İzotropik, Kinematik ve Kombine pekleşme modelleri kullanarak yaptıkları çalışmalarda, Swift tipi izotropik pekleşme ve klasik kinematik pekleşme kurallarını uygulamış ve uygun pekleşme modelinin kırılma tahmini doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [41-42]. Benzer şekilde, Butuc ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, fiziksel tabanlı Teodosiu-Hu pekleşme modelinin klasik Swift ve Voce modellerine göre daha doğru sonuçlar verdiği saptanmıştır [43-44].

Fu ve arkadaşları, Swift ve Hill lokalize instabilite teorilerini sentezleyerek, anizotropik ve distorsiyonlu pekleşme etkilerini de dikkate alan yeni modeller geliştirmiş ve klasik Swift ile Ludwik modellerine göre daha başarılı tahminler elde etmiştir [45]. Zhu ve arkadaşları tarafından geliştirilen HAH-2d modeli, ters ve çapraz yükleme yollarında klasik Voce ve Swift modellerine kıyasla daha başarılı tahminler sunmuştur [46].

Noman ve arkadaşları, klasik Ludwik, Swift ve Voce modellerinin sınırlarını aşarak çapraz pekleşme etkilerini de kapsayan bir model geliştirmiş ve bu modelin çarpışmaya maruz kalan deformasyon yollarında daha doğru tahminler yaptığını göstermiştir [47]. 304L paslanmaz çeliği üzerinde yapılan incelemelerde de kinematik pekleşme modelinin düşük deformasyon bölgelerinde klasik izotropik modellerden daha başarılı olduğu bulunmuştur [47].

Yoon ve Stoughton, klasik Swift ve Voce modellerinin eksikliklerini gidermek amacıyla doğrusal olmayan yük yollarını dikkate alan yeni bir model geliştirmiş ve geri esneme tahminlerinde hata oranlarını azaltmıştır [48]. Sanrutsadakorn ve arkadaşları ise, Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modeli ile Barlat89 akma kriterini birleştirerek ileri AHSS saclarının V-bükme analizlerinde en doğru geri esneme tahminlerini elde etmiştir [49-50].

Burello ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, pekleşme ve kalınlık değişimi gibi önemli parametrelerin sonlu elemanlar analizlerine entegrasyonu ile tahmin doğruluğu artırılmıştır [50]. Jasri, geliştirdiği deneysel düzenek ile Swift ve Voce modellerine dayalı pekleşme parametrelerinin iyileştirilmesine katkı sağlamıştır [52].

Chen ve arkadaşları, AZM120 çeliklerinde elasto-plastik doğrusal pekleşme modeli uygulamış, ayrıca Non-Saturating Kinematic Swift (NSK Swift) modelini kullanarak DP600 ve DP965 saclarında yaylanma ve kalınlık tahminlerini yüksek hassasiyetle gerçekleştirmiştir [53-54].

Rosenschon ve Merklein, İzotropik-Kinematik pekleşme modelleri ile Bauschinger etkisinin sac metaldeki yönelime bağlı etkilerini analiz ederek klasik modellerin eksikliklerini ortaya koymuştur [55]. Eggertsen, farklı pekleşme modellerini karşılaştırarak yaylanma tahmin hassasiyetini incelemiş ve en iyi sonuçları kinematik pekleşme modeli kullanımı ile elde etmiştir [56].

Dong Xiang-huai tarafından geliştirilen GTN hasar modeli, Ziegler doğrusal kinematik ve Lemaitre-Chaboche doğrusal olmayan pekleşme kuralları ile birlikte kullanılarak yaylanma tahmin doğruluğu iyileştirilmiştir [57]. Yue ve arkadaşları ise, kombine izotropik+kinematik pekleşme ile süek hasar etkilerini entegre ederek AA7055 alaşımında daha doğru geri esneme tahminleri yapmıştır [58].

Kılıç ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada TWIP çeliklerinde sekiz farklı pekleşme modeli kullanılmış; Ludwik modeli %4,99 hata oranı ile en başarılı, Swift modeli ise %9,18 hata oranı ile en düşük performanslı model olmuştur [59].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde sac metal şekillendirme analiz süreçlerinde kullanılacak pekleşme modelinin doğru şekilde seçilmesinin, tahmin başarısını çok önemli ölçüde etkilediğini görülmüştür.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar analizlerinde farklı pekleşme modellerinin bükme işleminde geri esneme ve kuvveti tahmin performansı incelenmiştir.

4.1. Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında 2 mm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzeme kullanılmıştır. 6061-T6 sac malzemenin kimyasal kompozisyon analizleri yapılmış ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.

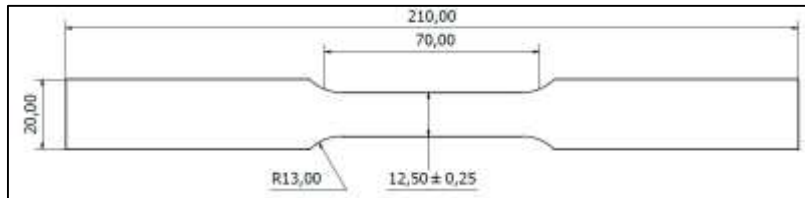
Çizelge 4.1. 6061-T6 alüminyum alaşım sac kimyasal kompozisyonu

Malzeme	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
6061-T6	0,5	0,65	0,15	0,11	0,9	0,15	0,16	0.11	Kalan

4.2. Deneysel Yöntem

4.2.1. Malzeme karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar analiz yazılımı için malzeme kartlarının hazırlanması ve malzeme karakterizasyonu yapılması için ASTM-E8 standartına uygun çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Çekme testi numunelerinin kesim sırasında oluşabilecek muhtemel ısı etkileri en az seviyede olması açısından su jeti yöntemi kullanarak hazırlanmıştır. Şekil 4.1’de ASTM-E8 standartı numune ölçüleri verilmiştir.



Şekil 4.1. ASTM-E8 çekme testi numune ölçüleri (mm).

Çekme testleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan 500kN kapasiteli Instron 8503 çekme basma test cihazında

gerçekleştirilmiştir. Hata oranını azaltmak için her test üçer defa tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır.

Çekme test cihazında çekme test numunesine tek eksenli yük uygulanarak yük (F) - uzama (ΔL) verileri elde edilmiştir. 6061-T6 alüminyum alaşımın önce mühendislik şekil değişimi – mühendislik gerinim eğrisi hesaplanmış daha sonra gerçek deformasyon gerçek gerilme eğrisini hesaplanmıştır. Deney numunesinin başlangıç uzunluğu (L_0) ve kesit alanı (A_0) kullanılarak mühendislik şekil değişimi ve mühendislik gerilmesi hesaplanmıştır.

Test sırasında ölçülen uzama (ΔL) kullanılarak mühendislik şekil değiştirme Eşitlik 4.1’de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_m = \Delta L / L_0 \quad (4.1)$$

ε_m mühendislik şekil değiştirmesi, L_0 numunenin başlangıç uzunluğu (mm), $\Delta L = L - L_0$ numunedeki anlık uzama (mm) olarak ifade edilmektedir.

Çekme testinde malzemeye uygulanan yük, başlangıç kesit alanına bölünerek mühendislik gerilme değeri belirlenmiştir (Eşitlik 4.2).

$$\sigma_m = F / A_0 \quad (4.2)$$

σ_m mühendislik gerilmesi (MPa), F uygulanan yük (N), A_0 numunenin başlangıç kesit alanı (mm^2) olarak ifade edilmiştir.

Plastik deformasyon sürecinde malzeme uzadıkça kesit alanı küçüldüğünden, gerçek şekil değiştirme miktarı ve gerçek gerilme hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Mühendislik şekil değiştirme ve mühendislik gerilme yerine, anlık kesit alanı ve uzunluğu dikkate alan gerçek şekil değiştirme ve gerçek gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Gerçek şekil değiştirme, sürekli deformasyonu dikkate alan logaritmik bir ifade ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.3).

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (4.3)$$

Burada; ε_g gerçek şekil değiştirme, ε_m mühendislik şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır.

Gerçek gerilme, kesit alanı ölçülemeyen durumlarda mühendislik gerilmesi üzerinden Eşitlik 4.4 kullanılmaktadır.

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + \varepsilon_m) \quad (4.4)$$

σ_g gerçek gerilmeyi, σ_m mühendislik şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

Sac metal şekillendirme analizler için belirlenmesi gereken bir başka malzeme parametresi ise anizotropi katsayısı ya da Lankford katsayısıdır. “r” olarak ifade edilmektedir. Sac metal malzemenin hadde yönüne bağlı deformasyon davranışının belirlenmesi için gerekli bir parametredir. r değeri sac metal bir malzemenin eni ve kalınlığındaki plastik şekil değişimlerinin oranı olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 4.5).

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t \quad (4.5)$$

Burada ε_w sac genişliği yönündeki plastik uzama, ε_t sac kalınlığı yönündeki plastik uzamayı ifade etmektedir.

Anizotropi numunelerine %5 uzama uygulayarak 5 farklı noktadan sac genişliği ve kalınlığındaki değişimleri ölçülmüş, ortalama değerler alınarak 6061-T6 sac malzeme için anizotropi değerleri belirlenmiştir.

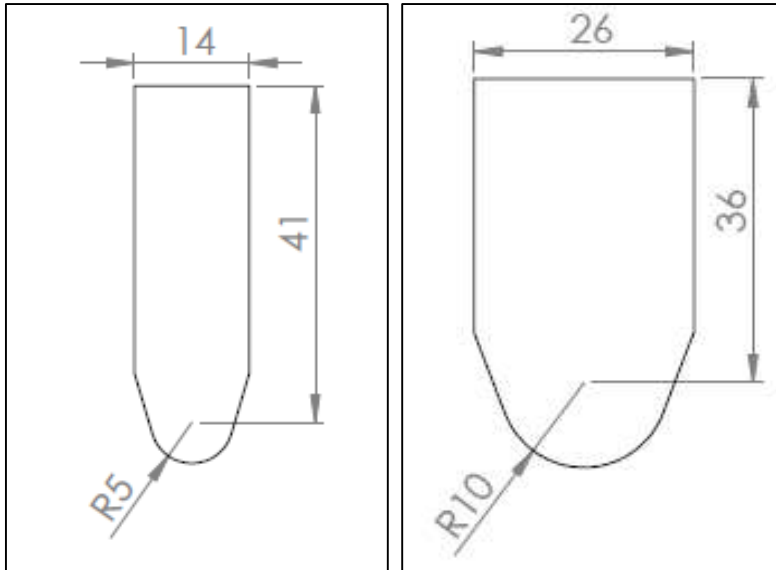
4.2.2. Bükme deneyleri

Bükme deneyleri yine Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan 500kN kapasiteli Instron 8503 çekme basma test cihazında üç nokta eğme aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Destekler arası açıklık mesafesi 40 mm olarak belirlenmiştir. Bükme işlemleri için R5 ve R10 olmak üzere iki farklı zımba kullanılmıştır. Resim 4.1’de bükme işlemine ait bir fotoğraf verilmiştir. Şekil 4.2’de ise bükme zımbalarının geometrik ölçüleri verilmiştir. Zımba ilerleme miktarı zımbanın saca

temas etmesinden sonra 10 mm ve 20 mm olmak üzere iki farklı ilerleme miktarına göre testler gerçekleştirilmiştir.



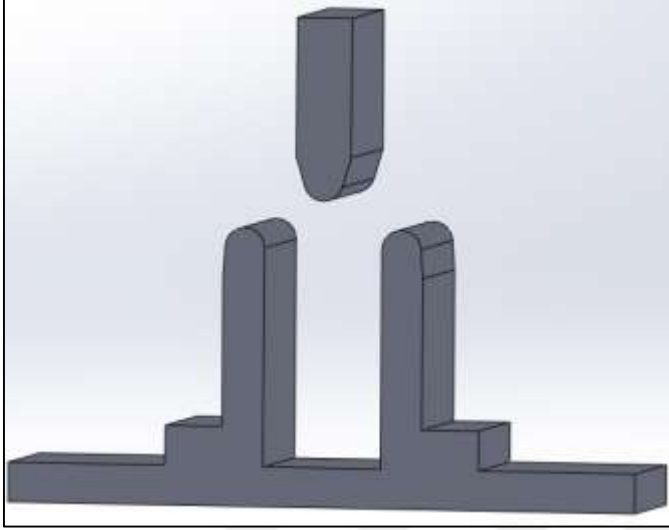
Resim 4.1. Bükme işlemine ait bir fotoğraf



Şekil 4.2. Bükme deneylerinde kullanılan zımbaların ölçüleri

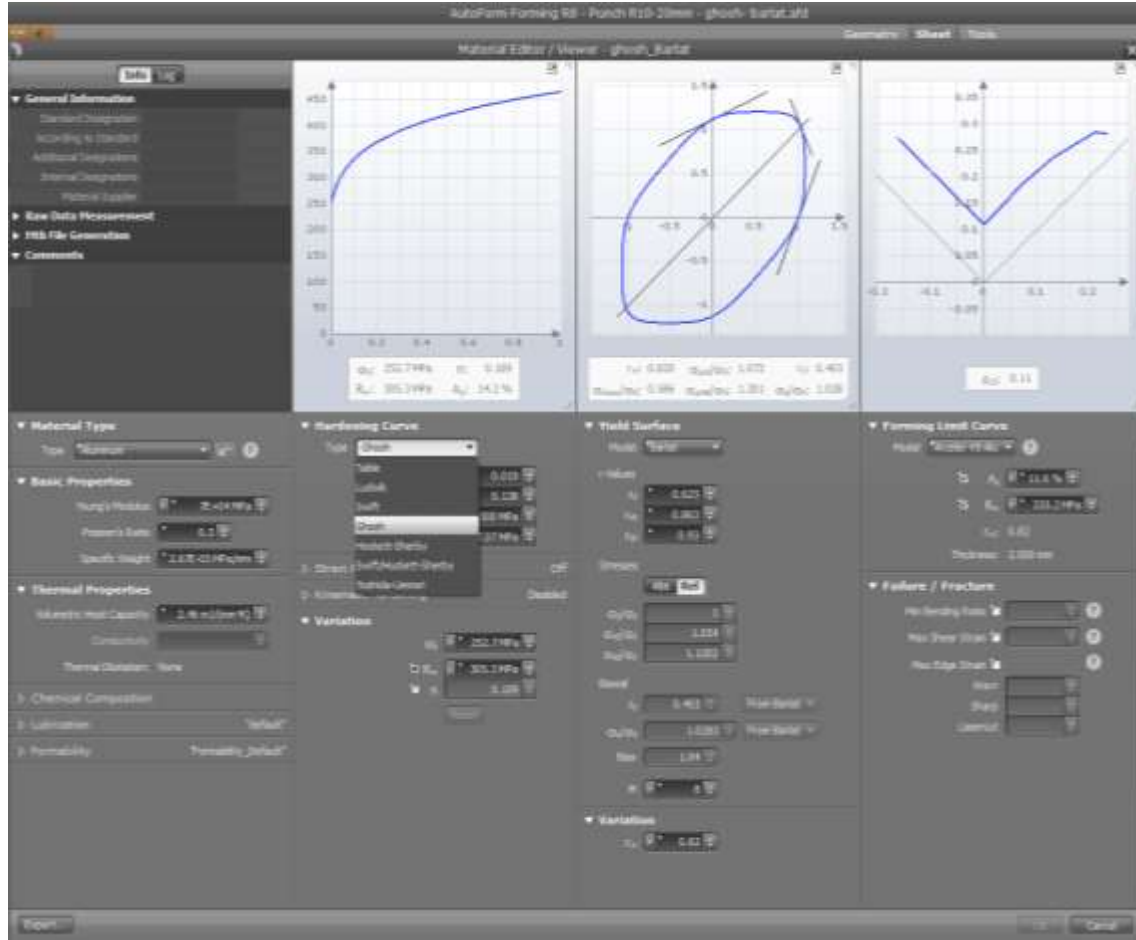
4.3. Bükme Analizleri

Bükme analizlerin gerçekleştirilebilmesi öncelikle için deneysel test düzeneği ve her zımba modellenerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Resim 4.2’de modellenen test düzeneğine ait bir görüntü verilmiştir.



Resim 4.2. Test düzeneğinin modellenmiş görüntüsü

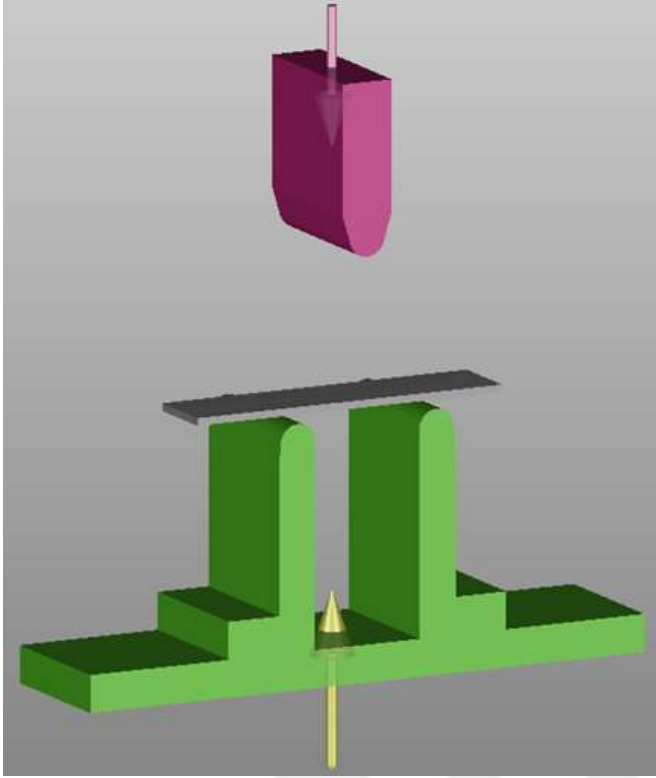
Analiz çalışmaları AutoForm R8 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yapılan malzeme karakterizasyonu testlerinden elde edilen veriler kullanılarak farklı pekleşme modeli ve akma kriterine göre malzeme kartları oluşturulmuştur. Resim 4.3’te malzeme kartı oluşturma ara yüzü verilmiştir. Toplamda 20 farklı malzeme kartı oluşturulmuştur. Çizelge 4.2’de oluşturulan malzeme kartlarının içerdiği pekleşme modeli ve akma kriteri kombinasyonları verilmiştir. Resim 4.4 ve 4.5’te bükme analizlerinde kullanılan modellenmiş kalıp görüntüleri sunulmuştur. Resim 4.4’de R5 zımba radyüsüne sahip model, Resim 4.5’de ise R10 zımba radyüsüne sahip model verilmiştir.



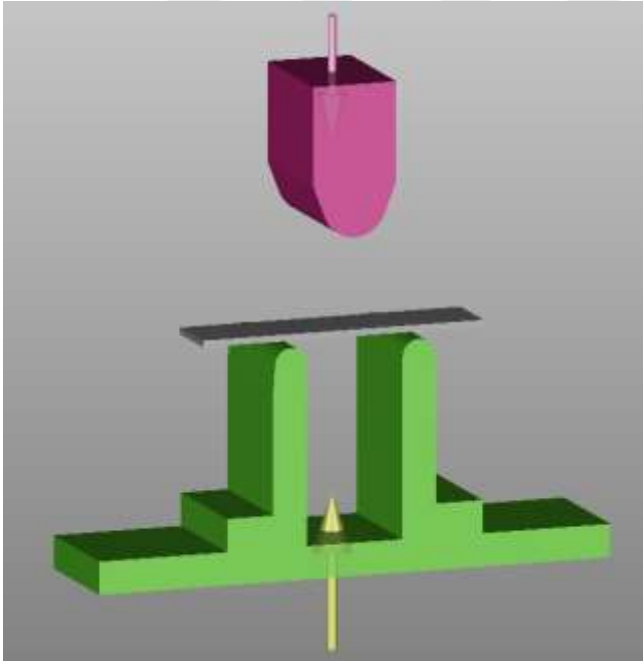
Resim 4.3. Malzeme kartı oluşturulması

Çizelge 4.2. Malzeme kartı kombinasyonları

Malzeme Kartı No	Pekleşme Modeli	Akma Kriteri
1	Ghosh	Barlat
2	Ghosh	BBC
3	Ghosh	Hill48
4	Ghosh	Vegner2017
5	Hockett-Sherby	Barlat
6	Hockett-Sherby	BBC
7	Hockett-Sherby	Hill48
8	Hockett-Sherby	Vegner2017
9	Ludwik	Barlat
10	Ludwik	BBC
11	Ludwik	Hill48
12	Ludwik	Vegner2017
13	Swift Hockett-Sherby	Barlat
14	Swift Hockett-Sherby	BBC
15	Swift Hockett-Sherby	Hill48
16	Swift Hockett-Sherby	Vegner2017
17	Swift	Barlat
18	Swift	BBC
19	Swift	Hill48
20	Swift	Vegner2017



Resim 4.4. R5 zımba radyüsüne sahip analiz modeli

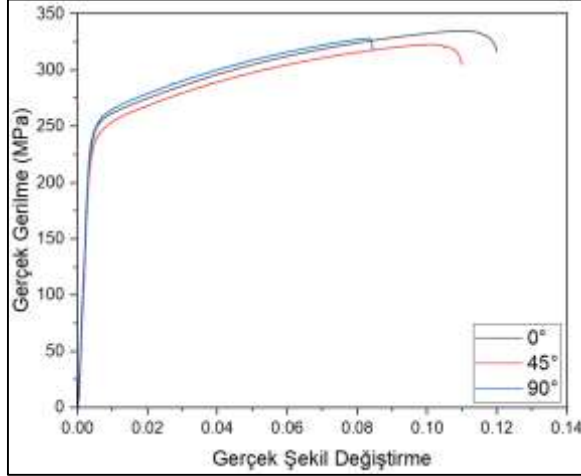


Resim 4.5. R10 zımba radyüsüne sahip analiz modeli



5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çekme testleri 0° , 45° ve 90° olmak üzere üç farklı hadde yönünde 5 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Her test üçer defa tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır. Şekil 5.1’de gerçek şekil değiştirme – gerçek gerilme eğrileri verilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde malzemenin hadde yönüne bağlı olarak farklı davranış sergilediği görülmektedir. Bu malzemenin anizotropik olduğunu göstermektedir. Sacın deformasyona başlangıcı aşamasından benzer davranış göstermekle beraber deformasyon sürecinin ilerlemesiyle en yüksek şekil değiştirme ve gerilme değerine beklenildiği gibi 0° hadde yönünde ulaşılmıştır. 90° hadde yönünde gerçekleştirilen test sonucunda ise gerilme değeri olarak 0° hadde yönüne yakın bir değer elde edilse de gerçek şekil değiştirme miktarında belirgin bir azalma meydana geldiği görülmüştür. 45° hadde yönünde yapılan test sonucunda ise en düşük gerilme değeri elde edilmiş, gerçek şekil değişimi ise 0° ile 90° hadde yönünde elde edilen sonuçların arasında meydana gelmiştir. Çizelge 5.1’te 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzemeye ait çekme testi ve anizotropi test sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.1. 6061-T6 gerçeşek şekil değıştirme – gerçeşek gerilme eğrileri

Çizelge 5.1. 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzeme mekanik özellikler

Hadde Yönü	Akma Dayanımı	Uzama (%)	Anizotropi (r)
0°	251,391	11,62	0,623
45	239,903	10,62	0,863
90°	252,257	8,63	0,932

Tez çalışması kapsamında yapılan bükme analizleri AutoForm R8 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsam bu yazılımın malzeme kartı oluşturma bölümünde kullanılan pekleşme kurallarının tahmin performansı incelenmiştir. Bu amaçla yazılımda da belirtildiği üzere hadde yönünde (0°) akma dayanımı ile çekme dayanımı arasında kalan bölgedeki veriler referans kabul edilerek pekleşme kurallarının tahminleri oluşturulmuş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, tutarlılık oranları belirlenmiştir.

Gerçek gerilme değerinin pekleşme modeli tahmin performansının tutarlılığı Eşitlik 5.1’de verilen ortalama mutlak yüzdelik hata yöntemi (MAPE) ve Eşitlik 5.2’de verilen ile istatistiksel model uyum katsayısı (R^2) yöntemi ile hesaplanmıştır. y_i gerçek gerilme değeri, $\hat{y}_i$ pekleşme modelin sonucu tahmin edilen gerilme değeri, n ise veri setindeki toplam örnek sayısını ve $\bar{y}$ gerçek değerlerin ortalamasıdır. Çizelge 5.2’te pekleşme modelleri mutlak yüzdelik hata (MAPE) ve uyum katsayısı (R^2) sonuçları verilmiştir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (5.1)$$

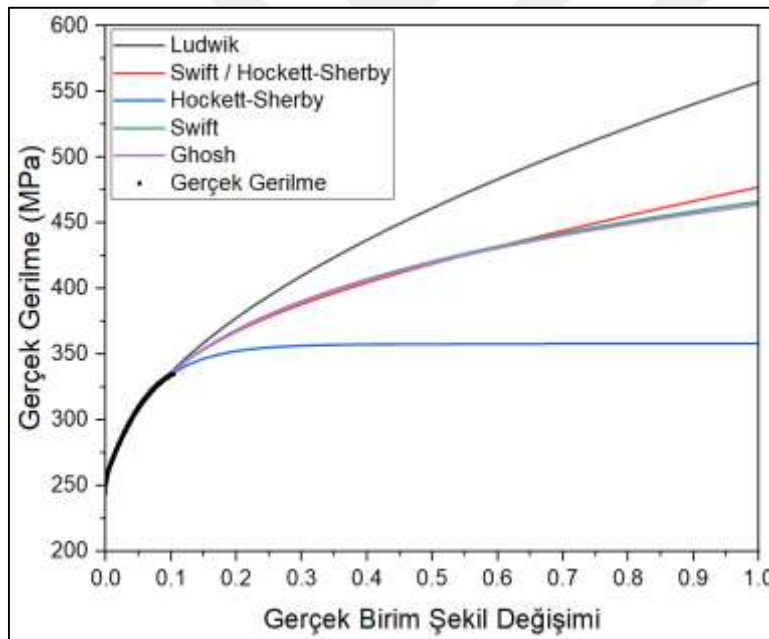
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.2)$$

Çizelge 5.2. Pekleşme modelleri mutlak yüzdelik hata (MAPE) ve uyum katsayısı (R^2)

Pekleşme Modeli	Mutlak Yüzdelik Hata (MAPE)	Uyum Katsayısı (R^2)
Ludwik	0.405%	0.996
Ghosh	0.239%	0.999
Swift	0.242%	0.999
Hockett-Sherby	0.102%	0.9996
Swift / Hockett-Sherby	0.237%	0.9985

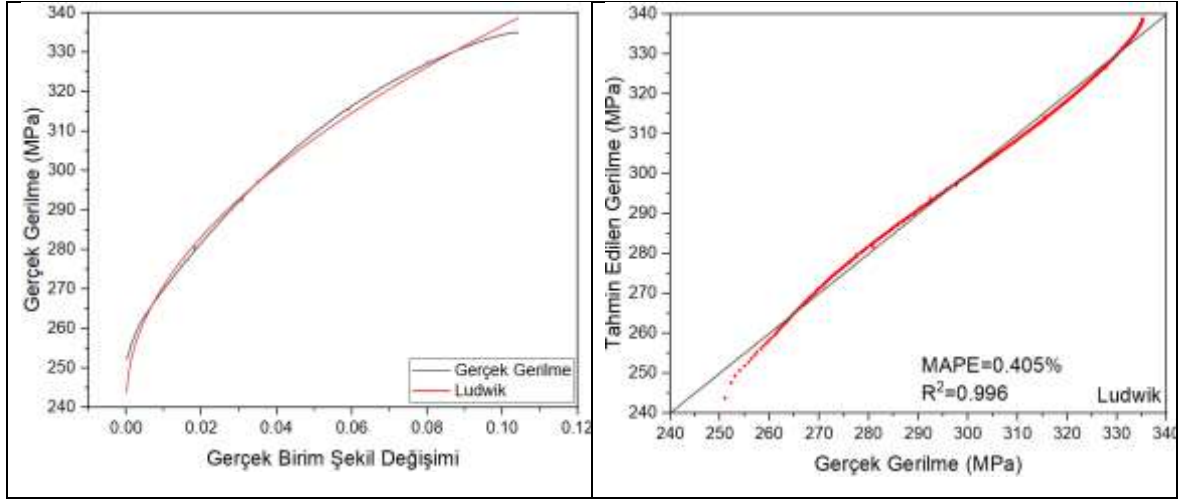
Şekil 5.2’de deneysel olarak elde edilen gerçek birim şekil değiştirme gerçek gerilme eğrisi ile pekleşme modelleri kullanarak elde edilen tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel eğri sonrası pekleşme modelleri 1 şekil değiştirme oranına kadar tahminleri grafiğe eklenmiştir. Öncelikle deneysel verileri temsil eden siyah noktalar incelendiğinde belirli bir birim şekil değiştirme miktarından sonra pekleşme davranışının azaldığı görülmüştür. Bu durum çoğu sac metal malzemede karşılaşılan bir davranıştır. Pekleşme modellerinin

tahminleri incelendiğinde Ludwik modeli en yüksek gerilme dayanımına ulaşmış ve diğer pekleşme modellerine göre daha yüksek bir eğime sahiptir. Bu durumda Ludwik modelinin daha yüksek pekleşme gösterdiği anlaşılmaktadır. Ghosh, Swift ve Swift / Hockett-Sherby modeli genellikle birbiri ile yakın tahmin sonuçları sunmuştur. Bu pekleşme modellerinde de birim şekil değiştirme miktarının artması ile gerilme miktarında artış gözlemlenmiştir. Ancak, Ludwik modeline göre daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca, eğimin daha az olması da daha düşük pekleşme davranışını sergilediklerini göstermiştir. Hockett-Sherby modeli tahmininde ise belirli bir birim şekil değiştirme miktarından sonra asimptotik bir davranış göstermektedir. Bu durumda pekleşme hızının önemli ölçüde azaldığı ve pekleşme doygunluğuna ulaştığını anlaşılmaktadır. Hockett-Sherby model tahmininde sac malzemenin artan birim şekil değiştirme miktarına rağmen gerilme miktarında daha dar bir aralıkta değişim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



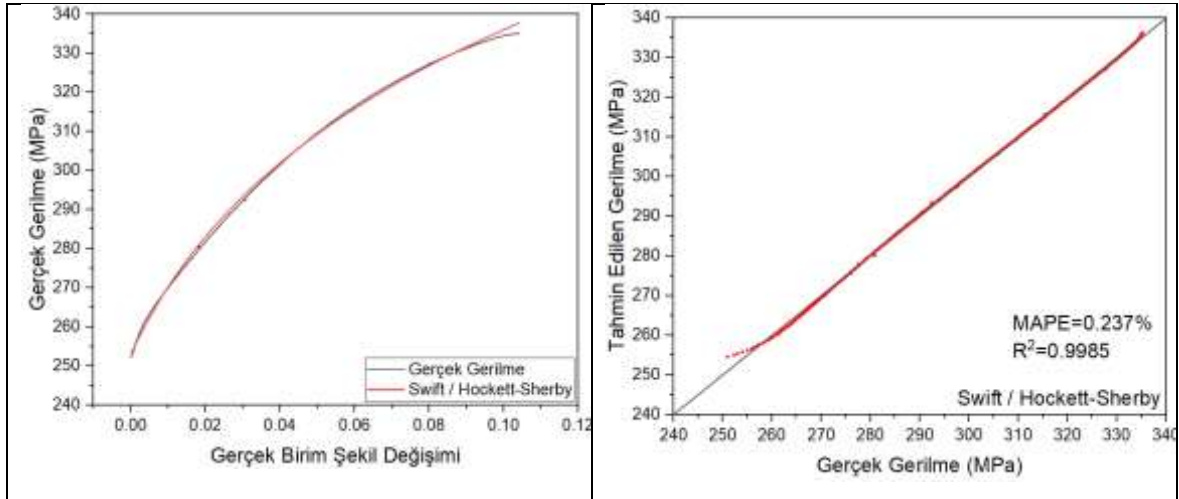
Şekil 5.2. Gerçek birim şekil değiştirme – gerçek gerilme ile pekleşme model tahminleri ilişkisi

Şekil 5.3-5.7'de gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme eğrisi ve pekleşme modelleri tahmin ilişkisi verilmiştir. Şekil 5.3'te Ludwik modeli tahmin sonuçları verilmiştir. Ludwik modeli genel olarak deneysel veriler yakın bir davranış sergilese de düşük birim şekil değiştirme seviyelerinde ve ileri birim şekil değiştirme miktarlarına belirgin sapmalar görülmektedir.



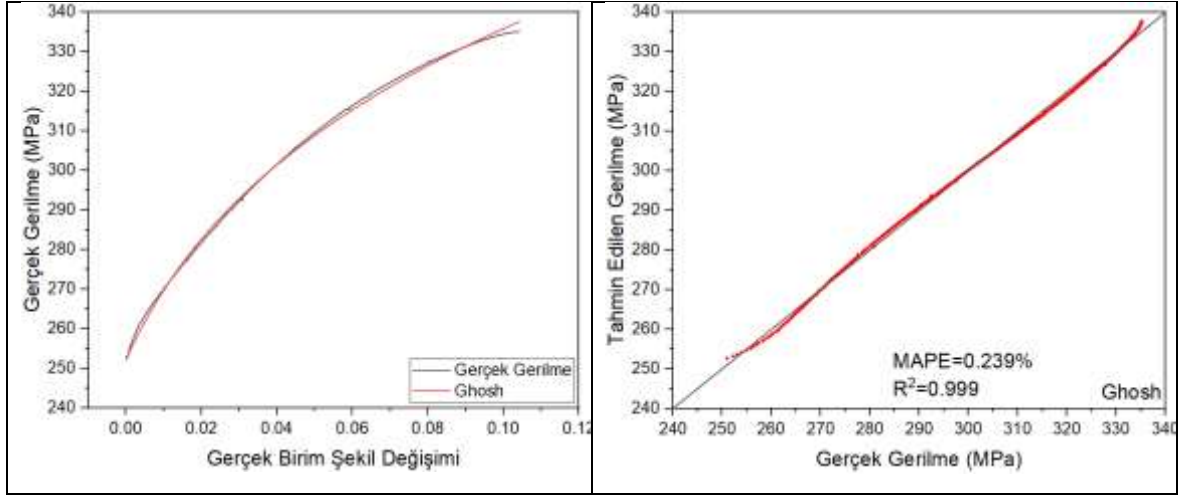
Şekil 5.3. Ludwik pekleşme modeli tahmin sonucu

Şekil 5.4’de verilen Swift / Hockett-Sherby modeli tahmin sonuçları değerlendirildiğinde düşük birim şekil değiştirme miktarlarında bir miktar sapmalar görülmüş olsa gene olarak deneysel veriler ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir. Bu durum Swift / Hockett-Sherby pekleşme modelinin plastik deformasyon sürecindeki pekleşme davranışını belirgin oranda başarılı tahmin ettiğini göstermiştir.



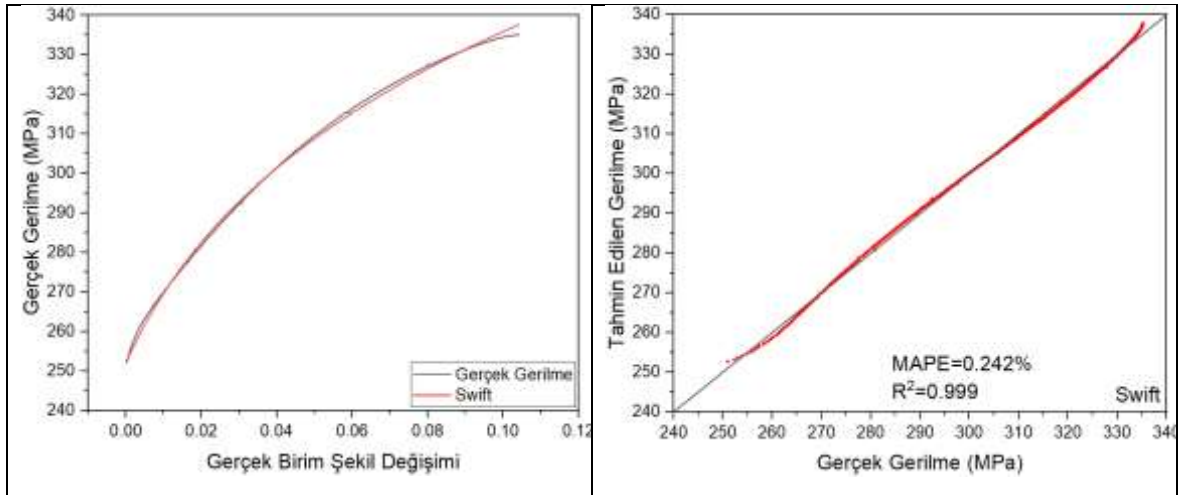
Şekil 5.4. Swift / Hockett-Sherby pekleşme modeli tahmin sonucu

Şekil 5.5’te Ghosh pekleşme modeli tahmin sonuçlarının deneysel veriler ile ilişkisi gösterilmektedir. Ghosh pekleşme modelinin genel olarak deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.



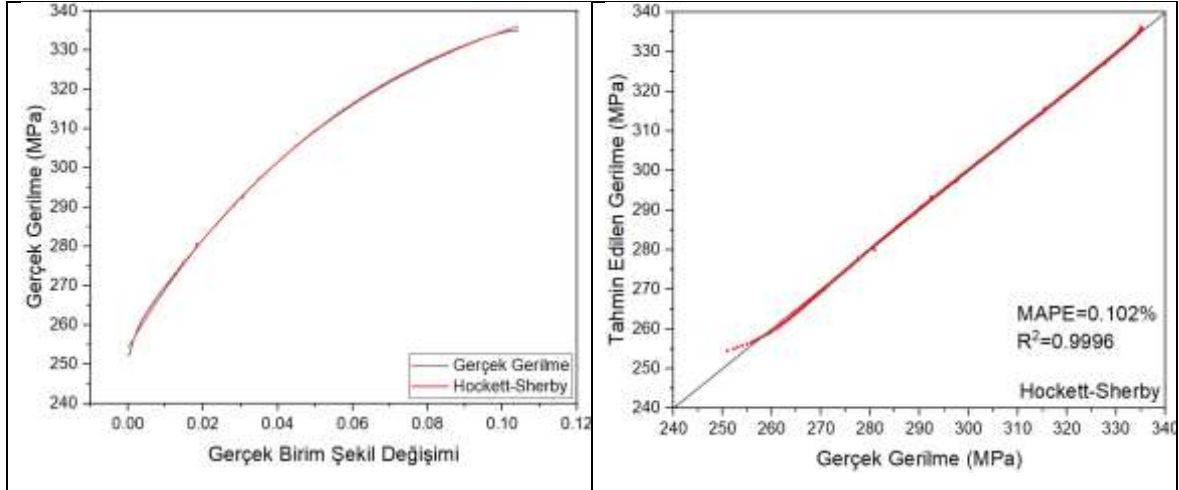
Şekil 5.5. Ghosh pekleşme modeli tahmin sonucu

Şekil 5.6’da Swift pekleşme modelinin tahmin sonuçları gösterilmektedir. Swift pekleşme modelinin tahminler genel olarak başarılı kabul edilebilir seviyededir. Düşük ve orta birim şekil değiştirme seviyelerinde modelin tahmin kabiliyeti oldukça yüksektir. Yüksek birim şekil değiştirme miktarlarında elde edilen gerilme değerlerinde küçük farklılıklar gözlenlenmiştir.



Şekil 5.6. Swift pekleşme modeli tahmin sonucu

Şekil 5.7’de Hockett-Sherby pekleşme modelinin tahmin sonuçları verilmiştir. Hockett-Sherby pekleşme modeli tahmin sonuçlar deneysel veriler ile son derece uyumlu olduğu belirlenmiştir. Özellikle, akma dayanımı sonrası artan birim şekil değiştirme miktarı ile gerilme değerlerini başarılı bir şekilde tahmin etmiştir.



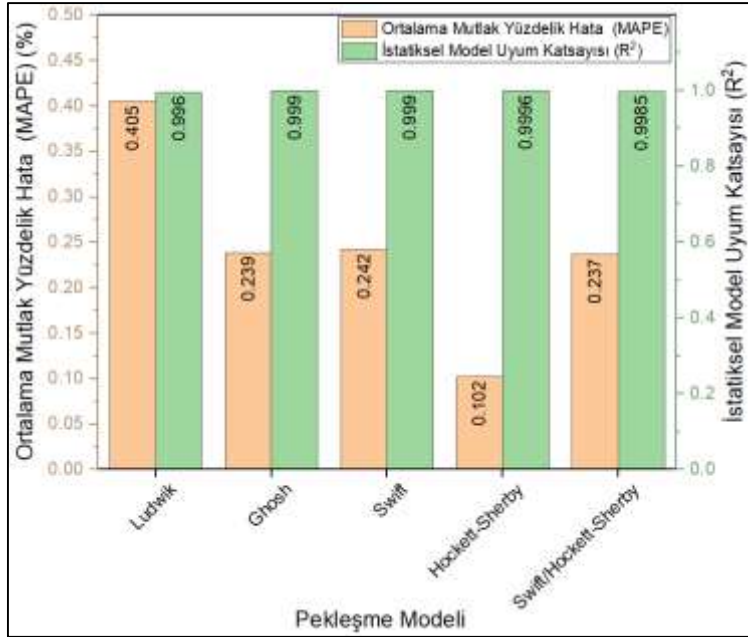
Şekil 5.7. Hockett-Sherby pekleşme modeli tahmin sonucu

Şekil 5.3-5.7’de verilen pekleşme model tahmin sonuçları değerlendirildiğinde Hockett-Sherby modelinin şekil değiştirme sürecinde pekleşme davranışı ve gerilme değerlerinin en çok yakınsayan model olduğu belirlenmiştir. Ghosh ve Swift / Hockett-Sherby pekleşme modellerinin de başarılı tahmin performansına sahip olduğu görülmüştür. Swift pekleşme modeli de deneysel verilere uyumlu olsa da bazı birim şekil değiştirme miktarlarında küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Ludwik pekleşme modeli tahminlerinde ise sapmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.8’de deneysel eğri ile pekleşme modellerinin tahmin sonuçlarının uyumunu değerlendirmek için ortalama mutlak yüzdelik hata (MAPE) ve istatistiksel model uyum katsayısı (R^2) değerleri verilmiştir. Ortalama mutlak yüzdelik hata (MAPE) modelin hata oranının ifade etmektedir ve düşük olması istenmektedir. İstatistiksel model uyum katsayısı (R^2) ise modelin deneysel veriler ile uyumunu göstermekte ve 1’e yaklaşması modelin uyumunun daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde, Hockett-Sherby modeli 0,102 % ile en düşük hata oranı ve 0,9996 R^2 değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç deneysel verilere oldukça yüksek uyum sağladığını göstermiş ve deneysel eğri en iyi temsil eden model olduğu anlaşılmıştır. Swift / Hockett-Sherby modeli de oldukça düşük hata oranı 0,237 % ve yüksek uyum katsayısı $R^2 = 0,9985$ ile başarılı bir tahmin performansı göstermiştir. Ghosh ve Swift modelleri sırasıyla 0,239 % ve 0,242 % değerleri ile benzer hata oranlarına ve $R^2 = 0,999$ seviyesinde yüksek bir uyum katsayısına sahiptirler. Bu modeller, deneysel verilere iyi bir uyum sağlamakla

birlikte, Hockett-Sherby modeline göre daha yüksek hata içermektedir. Ludwik modeli ise $R^2 = 0,996$ uyum katsayısına sahip olsa da en yüksek hata oranına sahip (0,405%) modeldir. Pekleşme modellerinin tahmin performansları değerlendirildiğinde Hockett-Sherby modelinin en düşük hata oranı ve en yüksek uyum katsayısı ile deneysel verileri en başarılı şekilde tahmin eden model olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8. Pekleşme modelleri tahmin performansları

Pekleşme modellerinin incelenmesinin ardından AutoForm R8 yazılımında malzeme kartı tanımlamalarına geçilmiştir. Bu kısımda pekleşme modeli ve akma kriteri tanımlamaları yapılmıştır. Öncelikle pekleşme model tanımlamaları için her pekleşme modelinin matematiksel eşitliğindeki parametreler belirlenmiştir. Pekleşme kurallarının parametrelerinin belirlenmesi için MS Excel yazılımında pekleşme kuralına ait matematiksel eşitlik girilmiş değişkenler için hücreler belirlenmiş ve data sekmesi altında bulunan çözücü uygulaması kullanılmıştır. Çizelge 5.3-5.7’de pekleşme model parametreleri verilmiştir. Bu pekleşme kuralı parametreleri AutoForm R8 yazılımında malzeme kartları oluşturulurken pekleşme sekmesi altında bulunan gerekli sayısal değerler girilmiştir.

Çizelge 5.3. Ludwik pekleşme kuralı parametreleri

Pekleşme Kuralı	σ_0	K	n
Ludwik	251	389,8	0,0751

Çizelge 5.4. Swift pekleşme kuralı parametreleri

Pekleşme Kuralı	C	ε_0	M
Swift	465,2	0,0182	0,152

Çizelge 5.4. Ghosh pekleşme kuralı parametreleri

Pekleşme Kuralı	C	ε_0	m	D
Ghosh	500	0,019	0,138	37,07

Çizelge 5.5. Hockett-Sherby pekleşme kuralı parametreleri

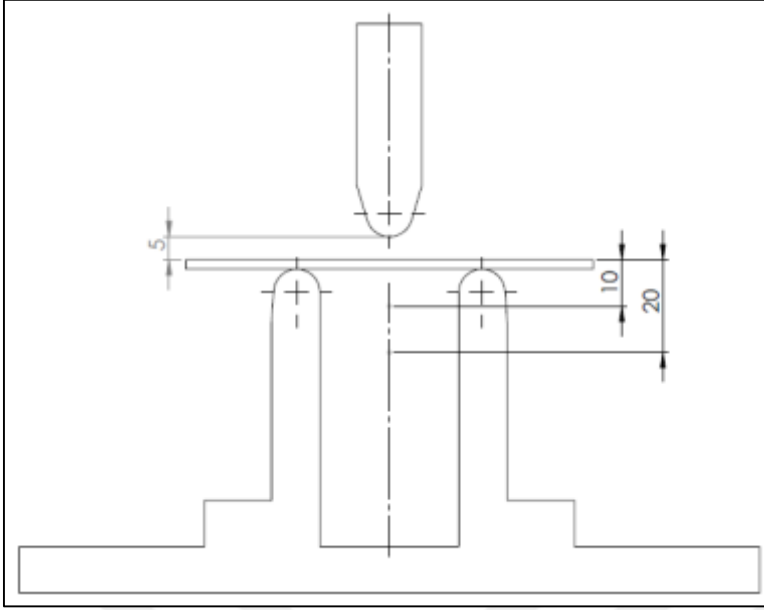
Pekleşme Kuralı	σ_i	σ_{sat}	a	p
Hockett-Sherby Modeli	254,6	358	14,4	0,981

Çizelge 5.6. Swift-Hockett-Sherby Kombinasyonu pekleşme kuralı parametreleri

Pekleşme Kuralı	ε_0	m	C	σ_i	σ_{sat}	a	p	α
Swift-Hockett-Sherby Kombinasyonu	0,0188	0,276	537,2	729,4	0,01049	1	2,3	0,134

Akma kriteri olarak ise AutoForm R8 yazılımı içerisinde bulunan Hill48, Barlat89, BBC2005 ve Vegner2017 akma kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterlerde 0° , 45° ve 90° hadde yönlerinde anizotropi ve akma dayanım değerleri dikkate alınmakta ve bu değerler ile sacın akışı matematiksel olarak modellenenilmektedir.

Bükme analizleri R5 ve R10 yarıçapa sahip zımbaları ile zımbanın saca temas etmesi sonrasında 10mm ve 20mm deformasyon miktarlarında gerçekleştirilmiştir. Zımba alt ölü noktaları Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Bükme analizlerinde kullanılan zımba tipi ve kurs boyu seviyeleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.9. Zımba alt ölü nokta konumları

Çizelge 5.7. Zımba radyüsü ve kurs mesafeleri

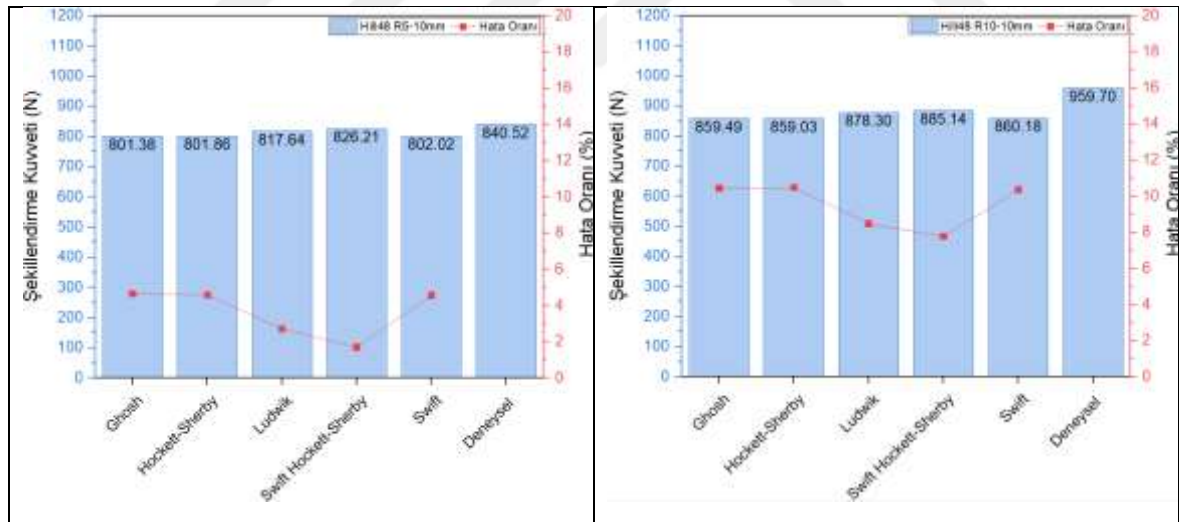
Zımba Radyüsü	Zımba Kurs Boyu
R5	10mm
R5	20mm
R10	10mm
R10	20mm

Şekil 5.10’da Hill48 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizlerinde, farklı pekleşme modelleri ile elde edilen şekillendirme kuvveti tahmin sonuçları deneysel olarak belirlenen şekillendirme kuvveti ile karşılaştırılmıştır. R5-10mm zımba için, en düşük şekillendirme kuvveti 801.38 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 826,21 N ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 840,52 N olup, pekleşme modellerinin tahmin sonuçlarından daha yüksek bir değere sahiptir. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en iyi tahmin performansı %1.70 hata oranı ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli olurken, en yüksek hata oranı %4.66 ile Ghosh modelinde olduğu görülmüştür. Hockett-Sherby, modelinin hata oranı %4,60 ile en yüksek hata oranına sahip Ghosh modeline oldukça yakındır. Ludwik ve Swift modelleri hata oranları orta seviyede olup, sırasıyla %2,72 ve %2,98 olarak hesaplanmıştır.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizinde, en düşük şekillendirme kuvveti 859,03 N ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 885,14 N ile Swift-Hockett-

Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 959.70 N olup, performansı incelenen tüm model tahminlerinden daha yüksek bir değere sahiptir. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en iyi tahmin performansına sahip model %7,77 hata oranı ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli olurken, en yüksek hata oranı %10,49 ile Hockett-Sherby modelinde kaydedilmiştir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından birbirine yakın değerlerde olup, hata oranları sırasıyla %10,44, %8,48 ve %9,35'tir.

Hill48 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonları sonucunda en uygun model, R5-10mm ve R10-10mm koşulları için Swift-Hockett-Sherby modeli olarak belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-10mm için, Hockett-Sherby modeli ise R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip pekleşme modelleri olarak belirlenmiştir. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri R5-10mm için, Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri ise R10-10mm için orta seviye tahmin performansı gösterdiği görülmüştür.



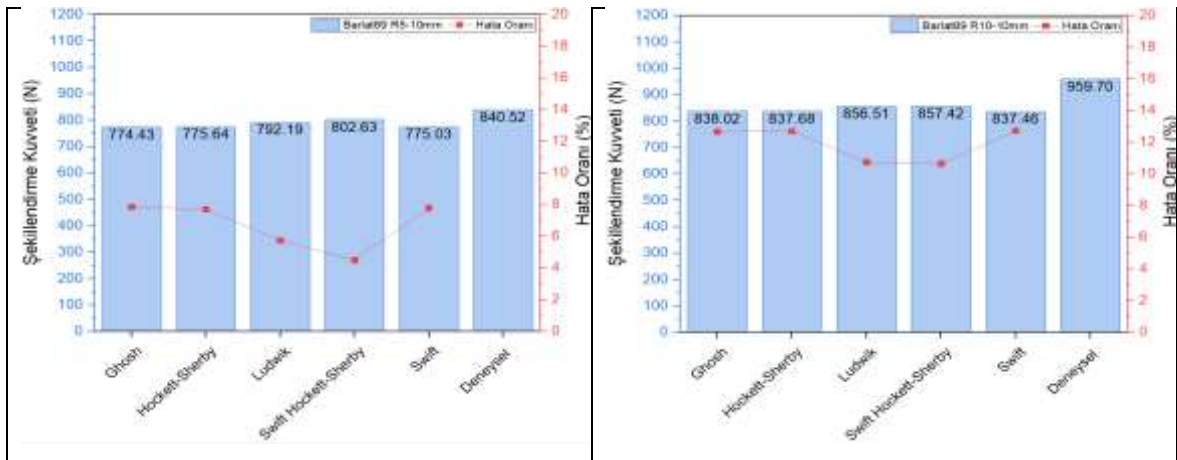
Şekil 5.10. 10 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Şekil 5.11'de Barlat89 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizlerinde, farklı pekleşme modelleri ile hesaplanan şekillendirme kuvvetleri deneysel verilerle kıyaslanmıştır. R5-10mm zımba ile yapılan analizlerde en düşük şekillendirme kuvveti 774,43 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 802,63 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ile tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti ise 840,52 N

olup, kullanılan tüm pekleşme modelleri bu değerden daha az seviyede olduğu görülmüştür. En düşük hata oranı ise %4,51 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde olduğu belirlenirken, en yüksek hata oranı %7.86 ile Ghosh modeli kullanılan analizde olduğu görülmüştür. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %7,72, %5,75 ve %7,78 olarak hesaplanmıştır.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde, en düşük şekillendirme kuvveti 837,46 N ile Swift modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 857,42 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ile tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 959,70 N olup, yine tüm pekleşme modellerinin tahminleri bu değer altında kalmıştır. Hata oranları açısından bakıldığında ise, en düşük hata oranı %10,65 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranı ise %12,71 ile Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından ara seviyelerde olup, hata oranları sırasıyla %12,68, %10,75 ve %11,69 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, pekleşme modellerinin hata oranlarının dar bir aralıkta değiştiği de belirlenmiştir.

Barlat89 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonları incelendiğinde, şekillendirme kuvveti tahmini açısından en başarılı modelin R5-10mm ve R10-10mm için Swift-Hockett-Sherby kombine modeli olduğu belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-10mm için, Hockett-Sherby modeli ise R10-10mm şekillendirme koşulları için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modeller olduğu görülmüştür.

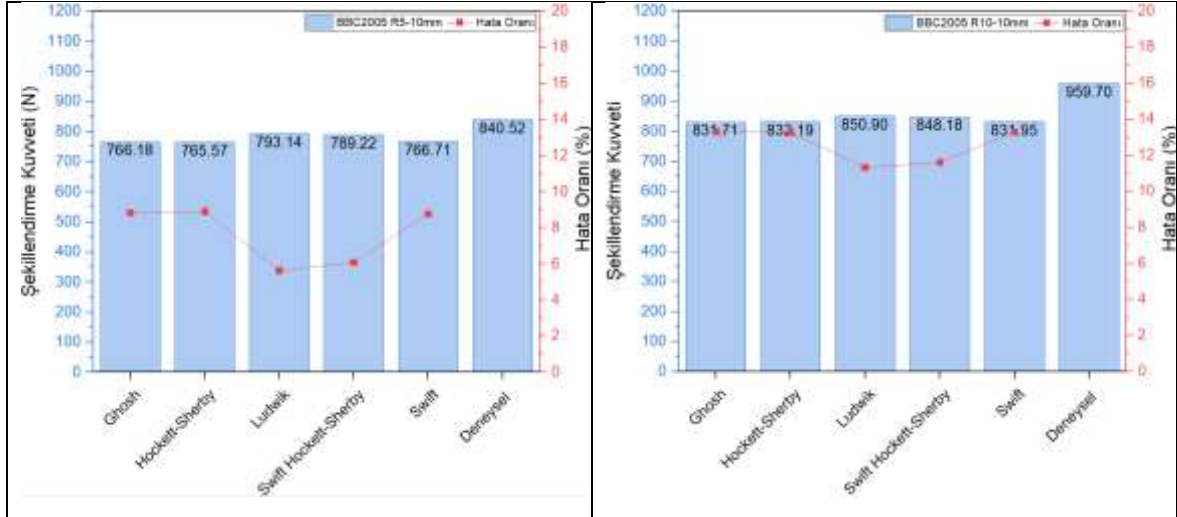


Şekil 5.11. 10 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

BBC2005 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizlerinde farklı pekleşme modelleri ile tahmin edilen şekillendirme kuvvetleri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve Şekil 5.12’de sunulmuştur. R5-10mm zımba ile yapılan analizler için, en düşük şekillendirme kuvveti 766,18 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 793,14 N ile Ludwik modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 840,52 N olup, tüm pekleşme modellerin tahminleri deneysel sonucun altındadır. Hata oranları incelendiğinde, en düşük hata oranına %5,64 ile Ludwik modelinde ulaşılırken, en yüksek hata oranı ise %8,92 ile Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Swift-Hockett-Sherby kombine modeli %6,10, Ghosh modeli ise %8,84 hata oranına sahip olup, orta seviyede tahmin performansı göstermiştir.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde, en düşük şekillendirme kuvveti 831,71 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 850,90 N ile Ludwik modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 959.70 N’dur ve pekleşme modellerinin tahminlerinden daha yüksektir. En düşük hata oranı %11,34 ile Ludwik modelinde, en yüksek hata oranı %13,34 ile Ghosh modelinde hesaplanmıştır. Swift-Hockett-Sherby kombine modeli hata oranı bakımından %11,62 ile en düşük hata oranına sahip ikinci modeldir. Hockett-Sherby, Swift ve modelleri sırasıyla %13,29, %13,19 oranına sahiptir. Bu değerlerin ise en yüksek hata oranına oldukça yakın olduğu görülmüştür.

BBC2005 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-10mm ve R10-10mm için Ludwik modeli olarak belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ise ikinci en iyi tahmin performansı gösteren model olarak değerlendirilmektedir. Hockett-Sherby modeli R5-10mm için, Ghosh modeli ise R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modellerdir.



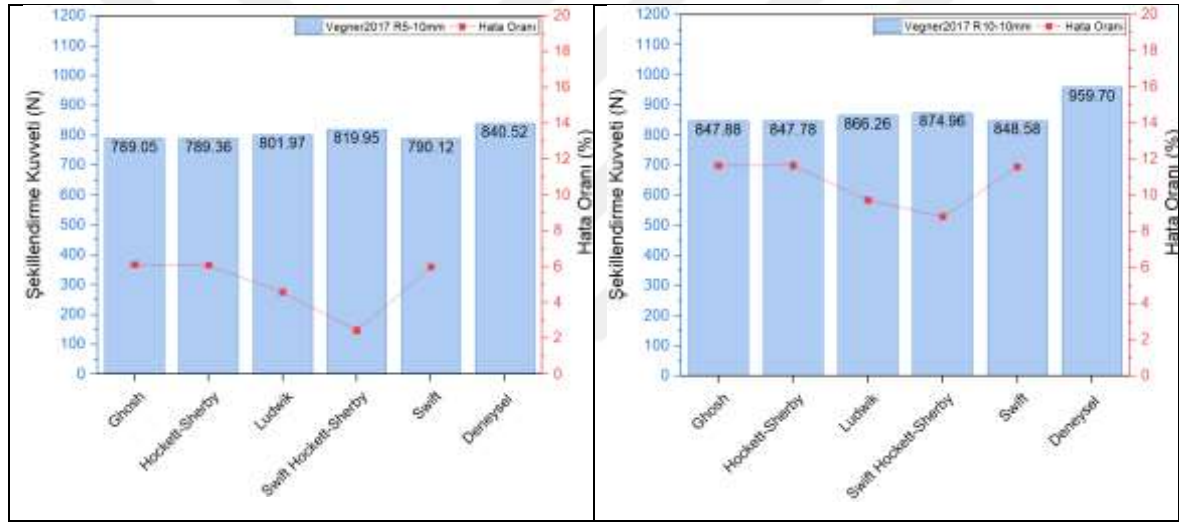
Şekil 5.12. 10 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Şekil 5.13'te Vegner2017 akma kriteri kullanılarak gerçekleştirilen bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleriyle tahmin edilen şekillendirme kuvvetleri ve deneysel veriler sunulmuştur. R5-10mm zımba ile yapılan analizlerde, en düşük şekillendirme kuvveti 789,05 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 819,95 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 840,52 N olup, tüm pekleşme modelleri için tahmin sonuçları deneysel değerlerin altında olduğu görülmektedir. Hata oranları açısından yapılan değerlendirmede, en düşük hata oranının %2,45 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranının ise %6,12 ile Ghosh modelinde olduğu görülmüştür. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modellerinin hata oranları orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %6,08, %4,58 ve %6,02 olarak belirlenmiştir.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizleri için, en düşük şekillendirme kuvveti 847,78 N ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 874,96 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 959,70 N olup, yine tüm pekleşme modellerinin tahmin sonuçları elde edilen deneysel değerlerin altında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, en düşük hata oranı %8,83 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranı ise %11,66 ile Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Ghosh modelinin hata oranı %11,65 ile en yüksek hata oranına sahip olan Hockett-Sherby modeli ile neredeyse aynı değerdedir. Ludwik ve Swift

modelleri hata oranları açısından orta seviyede konumlanmakta olup, hata oranları sırasıyla %9,73 ve %10,81 olarak belirlenmiştir.

Vegner2017 akma kriteri altında gerçekleştirilen bükme simülasyonları için en uygun pekleşme modeli, her iki durumda da Swift-Hockett-Sherby kombine modeli olarak belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-10mm için, Hockett-Sherby modeli ise R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip pekleşme modelleridir. Deneysel şekillendirme kuvvetleri, kullanılan bütün pekleşme modellerin tahminlerinden daha yüksektir. Bu durum, sac malzemenin gerçek şekillendirme sürecinde tahmin edilen kuvvetlerden daha yüksek bir dayanım gösterdiği anlaşılmaktadır.

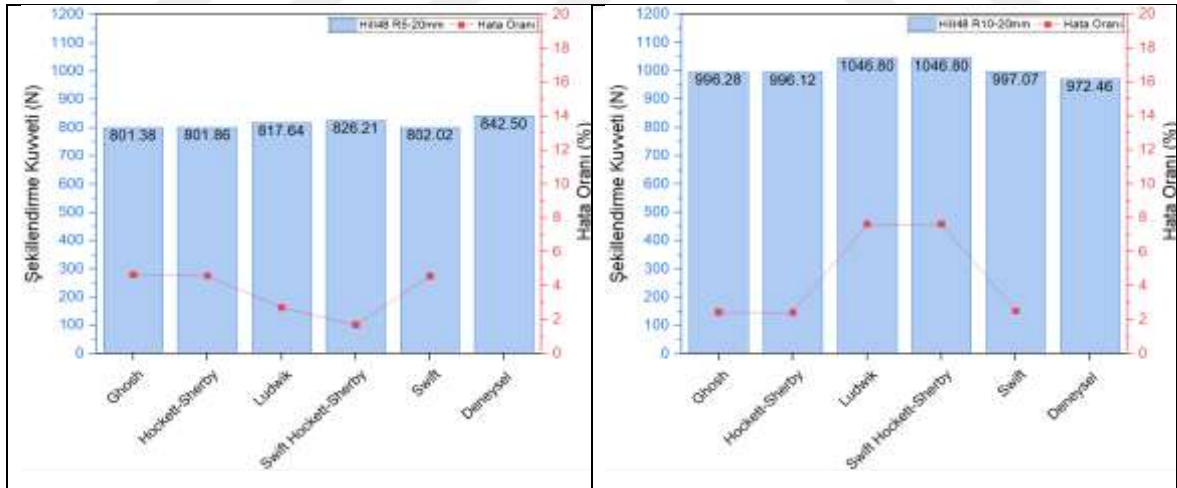


Şekil 5.13. 10 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Şekil 5.14'te Hill48 akma kriteri kullanılarak gerçekleştirilen bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleriyle tahmin edilen şekillendirme kuvvetleri ve deneysel veriler sunulmuştur. R5-20mm zımba ile yapılan bükme analizleri için, en düşük şekillendirme kuvveti 801,38 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 826,21 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 842,50 N olup, tüm tahmin edilen değerlerin bu deneysel değer altında kaldığı görülmektedir. En düşük hata oranı %1,70 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranı ise %4,66 ile Ghosh modelinde hesaplandığı görülmüştür. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede olup, hata oranları sırasıyla %4,60, %2,72 ve %4,59 olarak belirlenmiştir.

R10-20mm zımba ile yapılan şekillendirme için en düşük şekillendirme kuvveti 996,12 N ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 1046.80 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli kullanılarak yapılan analiz sonucunda belirlenmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 972,46 N olup, tahmin edilen bazı değerlerin deneysel verinin üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %2,43 ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek hata oranı ise %7,64 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ve Ludwik modeli olduğu görülmüştür. Ghosh ve Swift modelleri ise tahmin performansı bakımında en iyi tahmin performansını gösteren Hockett-Sherby modeline son derece yakın bir performans göstermiştir.

Bu analizler sonucunda, Hill48 akma kriteri altında gerçekleştirilen bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-20mm için Swift-Hockett-Sherby kombine modeli, R10-20mm için ise Hockett-Sherby modeli olarak belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-20mm için, Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ve Ludwik modeli ise R10-20mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modellerdir.



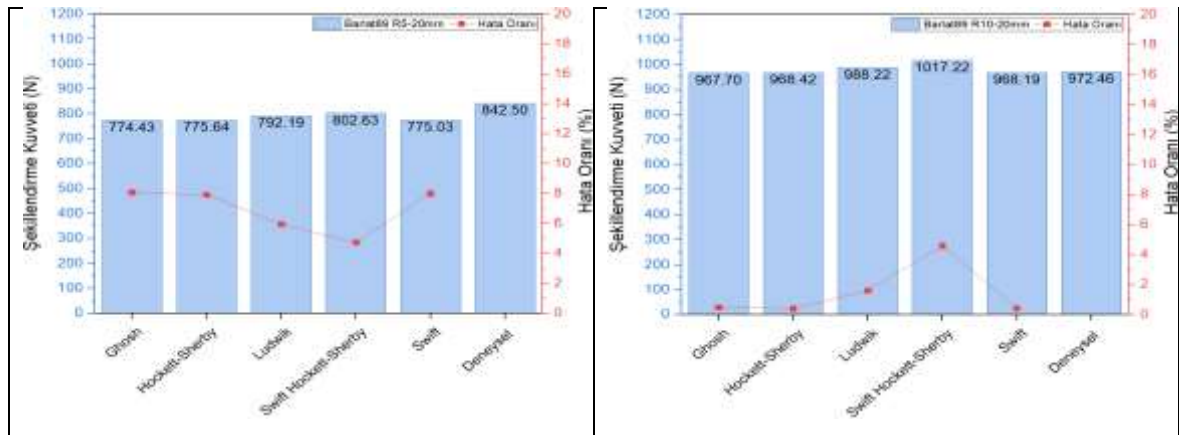
Şekil 5.14. 20 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Barlat89 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizlerinde farklı pekleşme modelleri ile elde edilen bükme kuvveti tahminleri Şekil 5.15'te verilmiştir. R5-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 774,43 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 802,63 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 842,50 N olup, tüm modellerin tahminleri

deneysel değerin altında kalmıştır. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde ise en düşük hata oranı %4,73 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranı ise %8,08 ile Ghosh modelinde hesaplanmıştır. Ayrıca, Hockett-Sherby ve Swift modelleri hata oranları açısından da Ghosh modeli tahmin performansına oldukça yakındır. Hata oranları sırasıyla %7,94, %7,93 olarak belirlenmiştir. Ludwik modeli ise %5,97 ile hata oranı bakımında orta seviyede olduğu söylenebilir.

R10-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 967,7 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 1017,22 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 972,46 N olup, bazı modellerin tahminleri deneysel değerin üzerinde kalmıştır. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %0,41 ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek hata oranı ise %4,6 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Ghosh ve Swift modelleri hata oranları açısından orta kabul edilebilir seviyededir. Hata oranları sırasıyla %0.49 %0.48 olarak hesaplanmıştır. Ludwik modelinin ise hata oranı %1,62 olup yine orta seviyede olduğu görülmüştür.

Bu analizlere göre, Barlat89 akma kriteri altında gerçekleştirilen bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-20mm için Swift-Hockett-Sherby kombine modeli, R10-20mm için ise Hockett-Sherby modeli olarak belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-20mm için, Swift-Hockett-Sherby modeli ise R10-20mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modellerdir.

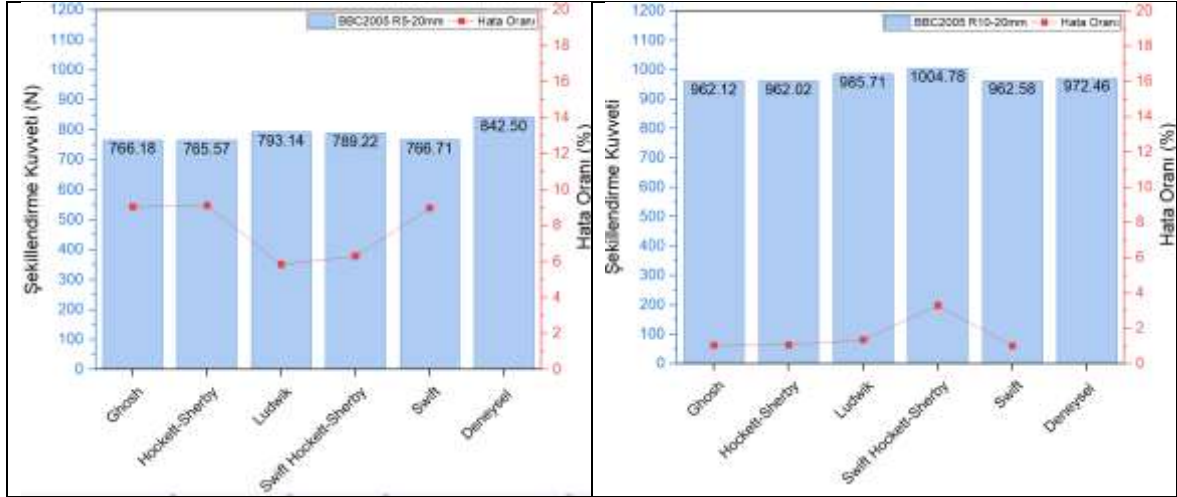


Şekil 5.15. 20 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Şekil 5.16’da BBC2005 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleriyle tahmin edilen şekillendirme kuvvetleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. R5-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 765,57 N ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 793,14 N ile Ludwik modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 842,50 N olup, tüm tahmin edilen değerlerin bu deneysel değerin altında kaldığı görülmektedir. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %5,85 ile Ludwik modelinde, en yüksek hata oranı ise %9,13 ile Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Ayrıca, Ghosh ve Swift modellerinin hata oranları sırasıyla %9,06, %9,07 olduğu görülmüştür. Bu oranlarda son derece yüksek hata oranları olarak dikkat çekmiştir. Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde ise hata oranı %6,32 olarak belirlenmiştir.

R10-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 962,02 N ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 1004,78 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 972,46 N olup, bazı modellerin tahminleri deneysel verinin üzerinde kalmıştır. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %1,06 ile Ghosh modelinde, en yüksek hata oranı ise %3,32 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde hesaplanmıştır. Hockett-Sherby modelinin tahmin performansı oldukça yüksektir. Bu modelin hata oranı %1,07’dir. Ludwik ve Swift modelleri hata oranları ise sırasıyla %1,36 ve %1,28 olarak hesaplanmıştır.

Bu analizler sonucunda, BBC2005 akma kriteri altında gerçekleştirilen bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-20mm için Ludwik modeli, R10-20mm için ise Ghosh modeli olarak belirlenmiştir. Hockett-Sherby modeli R5-20mm için, Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ise R10-20mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük performans gösterdiği görülmüştür.

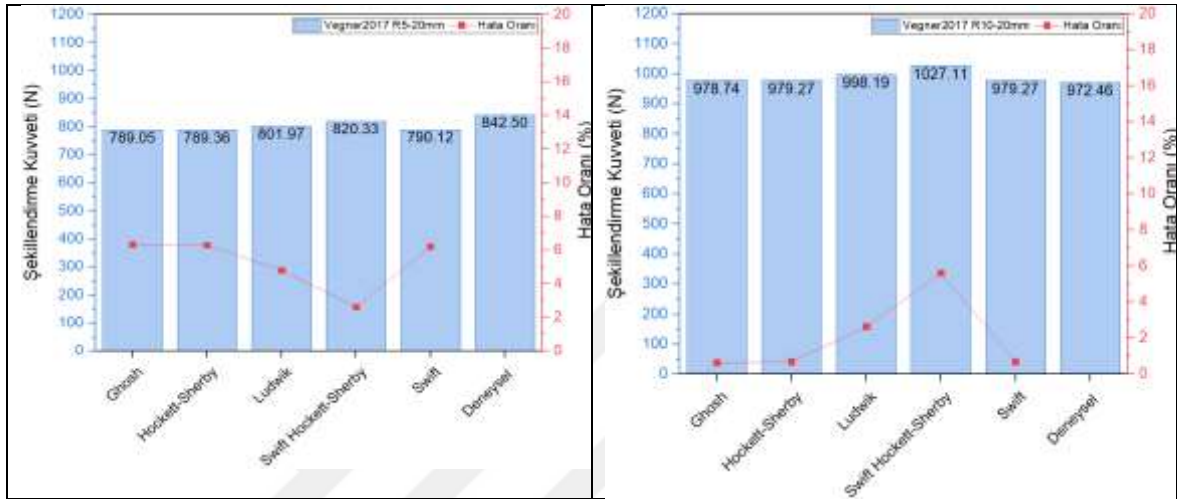


Şekil 5.16. 20 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli tahmin performansı ilişkisi

Vegner2017 akma kriteri kullanılarak gerçekleştirilen bükme analizlerinde, farklı pekleşme modelleri ile hesaplanan şekillendirme kuvvetleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 5.17). R5-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 789,05 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 820,33 N ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 842,50 N olup, tüm tahmin edilen değerler deneysel verinin altında kalmıştır. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %2,63 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde, en yüksek hata oranı ise %6,35 ile Ghosh modelinde hesaplanmıştır. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %6,30, %4,81 ve %6,32 olarak belirlenmiştir.

R10-20mm zımba ilerleme miktarı için, en düşük şekillendirme kuvveti 978,74 N ile Ghosh modeli, en yüksek şekillendirme kuvveti ise 1027,11 N ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel şekillendirme kuvveti 972,46 N olup, bazı modellerin tahminleri deneysel verinin üzerinde kalmıştır. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %0,65 ile Ghosh modelinde, en yüksek hata oranı ise %5,62 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde hesaplanmıştır. Hockett-Sherby ve Swift modelleri %0,7 hata oranı ile oldukça başarılı bir tahmin performansı göstermiştir. Ludwik modeli hata oranları açısından orta seviyede olup, hata oranları sırasıyla %2,64 olarak hesaplanmıştır.

Vegner2017 akma kriteri altında gerçekleştirilen bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-20mm için Swift-Hockett-Sherby kombine modeli, R10-20mm için ise Ghosh modeli olarak belirlenmiştir. Ghosh modeli R5-20mm için, Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ise R10-20mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modellerdir.



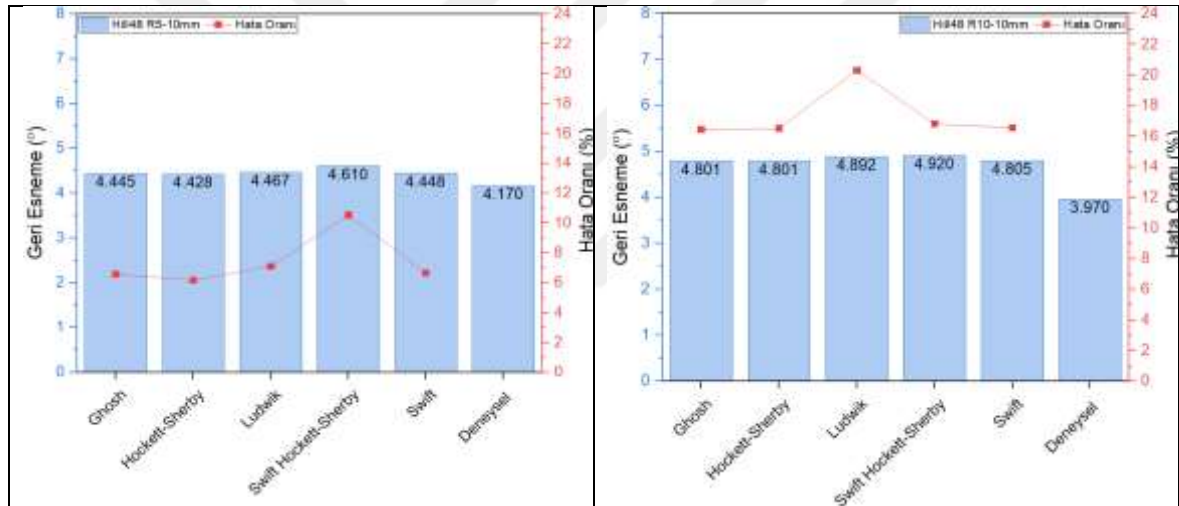
Şekil 5.17. 20 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli şekillendirme kuvveti tahmin performansı

Şekil 5.18'te 10 mm zımba ilerlemesi ile yapılan bükme analizlerinde Hill48 akma kriteri ile farklı pekleşme modelleri ile elde edilen geri esneme değerleri ve hata oranları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. R5-10mm zımba için, en düşük geri esneme değeri $4,428^\circ$ ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise $4,61^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri $4,17^\circ$ 'dir. En iyi tahmin performansına sahip model %6,19 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olurken, en yüksek hata oranı %10,55 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde görülmüştür. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %6,59, %7,12 ve %7,32 olarak hesaplanmıştır.

R10-10mm zımba için, en düşük geri esneme değeri $4,801^\circ$ ile Ghosh ve Hockett-Sherby modelleri, en yüksek geri esneme değeri ise $4,92^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri ise $3,97^\circ$ olarak ölçülmüştür. Hata oranları açısından değerlendirme yapıldığında en iyi tahmin performansına sahip model %16,46 hata oranı ile Ghosh modeli olurken, en yüksek hata oranı %20,32 ile Ludwik modelinde kaydedilmiştir. Hockett-Sherby, Swift ve Swift-Hockett-Sherby modelleri hata

oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %16,51, %16,83 ve %18,71 olarak hesaplanmıştır. %16,51 hata oranıyla Hockett-Sherby modelinin Ghosh modeline çok yakın bir tahmin performansı gösterdiği görülmüştür.

Hill48 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-10mm için Hockett-Sherby modeli, R10-10mm için Ghosh modeli olarak belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby kombine modeli R5-10mm için, Ludwik modeli ise R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip modeller olmuştur. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri R5-10mm için, Hockett-Sherby, Swift ve Swift-Hockett-Sherby modelleri ise R10-10mm için orta seviye tahmin performansı göstermiştir.

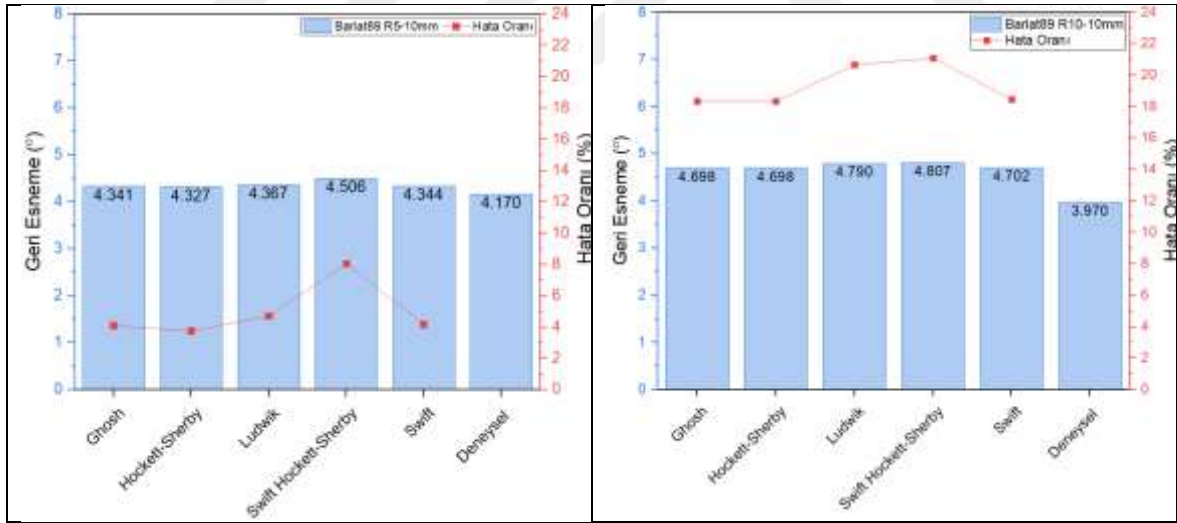


Şekil 5.18. 10 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Barlat89 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleri ile elde edilen geri esneme değerleri ve hata oranları Şekil 5.19’te sunulmuştur. R5-10mm zımba yapılan bükme analizleri için, en düşük geri esneme değeri 4,327° ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise 4.506° ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri 4.170°’dir. Hata oranları karşılaştırıldığında, en iyi tahmin performansına sahip model %3.76 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olurken, en yüksek hata oranı %8.06 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde olduğu görülmüştür. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %4,10, %4,72 ve %5,01 olarak hesaplanmıştır.

R10-10mm zımba için yapılan analizler sonucunda, en düşük geri esneme değeri $4,698^\circ$ ile Ghosh ve Hockett-Sherby modelleri, en yüksek geri esneme değeri ise $4,807^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri $3,97^\circ$ dir. En iyi tahmin performansına sahip model %18,34 hata oranı ile Ghosh ve Hockett-Sherby modelleri olurken, en yüksek hata oranı %21,08 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde kaydedilmiştir. Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede olduğu görülmüş ve hata oranları sırasıyla %20,65 ve %19,72 olarak hesaplanmıştır.

Bu analizler sonuçlarına göre, Barlat89 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-10mm için Hockett-Sherby modeli, R10-10mm için Ghosh ve Hockett-Sherby modelleri olarak belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby kombine modeli R5-10mm ve R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip model olmuştur. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri R5-10mm için, Ludwik ve Swift modelleri ise R10-10mm için orta seviye tahmin performansı göstermiştir.



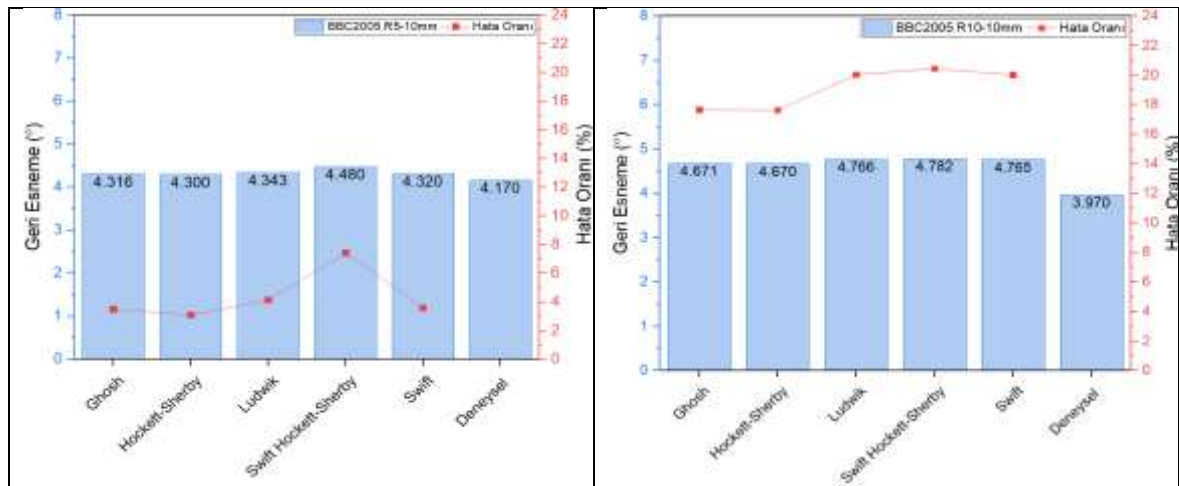
Şekil 5.19. 10 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

BBC2005 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleri ile elde edilen geri esneme değerleri ve hata oranları deneysel sonuçlarla Şekil 5.20'de karşılaştırılmıştır. R5-10mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde, en düşük geri esneme değeri $4,3^\circ$ ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise $4,48^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde olduğu görülmüştür. Deneysel geri esneme

değeri $4,17^\circ$ 'dir. Hata oranları açısından ise en iyi tahmin performansına sahip model %3,12 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek hata oranı %7,43 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde hesaplanmıştır. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyededir. Hata oranları sırasıyla %3,50, %4,15 ve %4,69 olarak hesaplanmıştır.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizleri için, en düşük geri esneme değeri $4,67^\circ$ ile yine Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise $4,782^\circ$ ile yine Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde olduğu görülmektedir. Deneysel geri esneme değeri $3,97^\circ$ 'dir. Hata oranları incelendiğinde, en iyi tahmin performansına sahip model %17,63 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek hata oranı %20,45 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelindedir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyededir ve hata oranları sırasıyla %17,66, %20,05 ve %19,83 olarak hesaplanmıştır.

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, BBC2005 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-10mm ve R10-10mm için Hockett-Sherby modeli olarak belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby modeli R5-10mm ve R10-10mm için en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip model olduğu belirlenmiştir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri R5-10mm ve R10-10mm için orta seviye tahmin performansı göstermiştir.



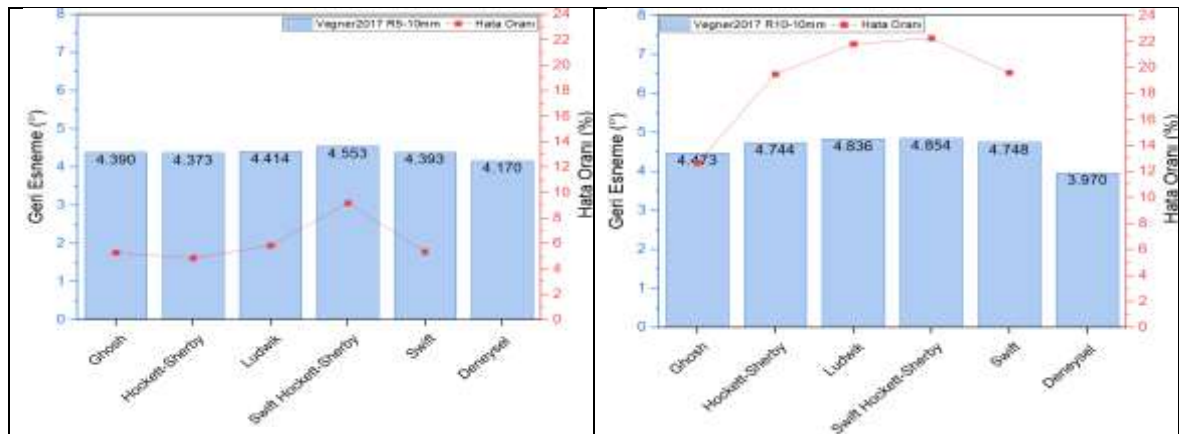
Şekil 5.20. 10 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Şekil 5.21'de Vegner2017 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleri tahmin performansları gösterilememektedir. R5-10mm zımba ile

yapılan bükme analizleri için en düşük geri esneme değerinin $4,373^\circ$ ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek geri esneme değerinin ise $4,553^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edildiği görülmektedir. Deneysel geri esneme değeri $4,17^\circ$ 'dir. Pekleşme modelleri hata oranları açısından karşılaştırıldığında, en iyi tahmin performansına sahip model %4,87 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olduğu, en yüksek hata oranı %9,18 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelinde olduğu belirlenmiştir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede olup, hata oranları sırasıyla %5,28, %5,85 ve %6,02 olarak verilmiştir.

R10-10mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde, en düşük geri esneme değeri $4,473^\circ$ ile Ghosh modeli, en yüksek geri esneme değeri ise $4,854^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby kombine modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri $3,97^\circ$ 'dir. Hata oranları açısından yapılan değerlendirme neticesinde en iyi tahmin performansı %12,67 hata oranı ile Ghosh modeli olurken, en yüksek hata oranı %22,27 ile Swift-Hockett-Sherby kombine modelindedir. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları sırasıyla %19,50, %21,81 ve %20,67 olarak hesaplanmıştır.

Vegner2017 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonların için en uygun model, R5-10mm için Hockett-Sherby modeli, R10-10mm için Ghosh modeli olarak belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby modeli R5-10mm ve R10-10mm zımba ile yapılan bükme işlemleri için en yüksek hata oranı nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip model olduğu belirlenmiştir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri R5-10mm için, Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri ise R10-10mm için orta seviye tahmin performansı göstermektedir.



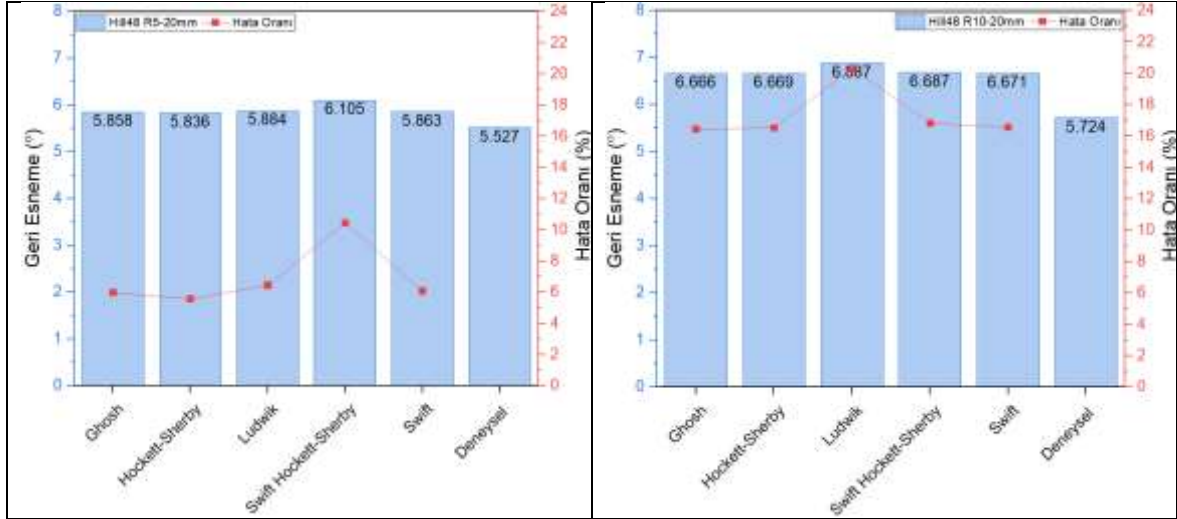
Şekil 5.21. 10 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Şekil 5.22-5.25’de 20 mm zımba hareketi ile yapılan bükme işlemi sonrası sacın geri esneme davranışı değerlendirilmiştir. Şekil 5.22’te Hill48 akma kriteri ile beraber farklı pekleşme modelleri ile yapılan bükme analiz sonucunda oluşan geri esneme miktarları incelendiğinde en düşük hata oranı R5 ve R10 zımbaların her ikisi içinde Hockett-Sherby modelinde olduğu görülmüştür. R5-20mm için en düşük hata oranı %5,59 ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek hata oranı ise %10,45 ile Swift-Hockett-Sherby kombine pekleşme modelinde gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, R10-20mm için en düşük hata oranı %16,51 ile Hockett-Sherby modelinde elde edilirken, en yüksek hata oranı %20,32 ile Ludwik modelinde olduğu görülmüştür.

Geri esneme açısından değerlendirildiğinde, R5-20mm zımba ilerlemesi için en yüksek değer $6,105^{\circ}$ ile Swift-Hockett-Sherby modelinde, en düşük değer ise $5,836^{\circ}$ ile Hockett-Sherby modeli ile yapılan analiz sonucunda elde edilmiştir. R10-20mm için en yüksek geri esneme değeri $6,887^{\circ}$ ile Ludwik modelinde gözlemlenirken, en düşük değer $6,669^{\circ}$ ile Hockett-Sherby modelinde kaydedilmiştir.

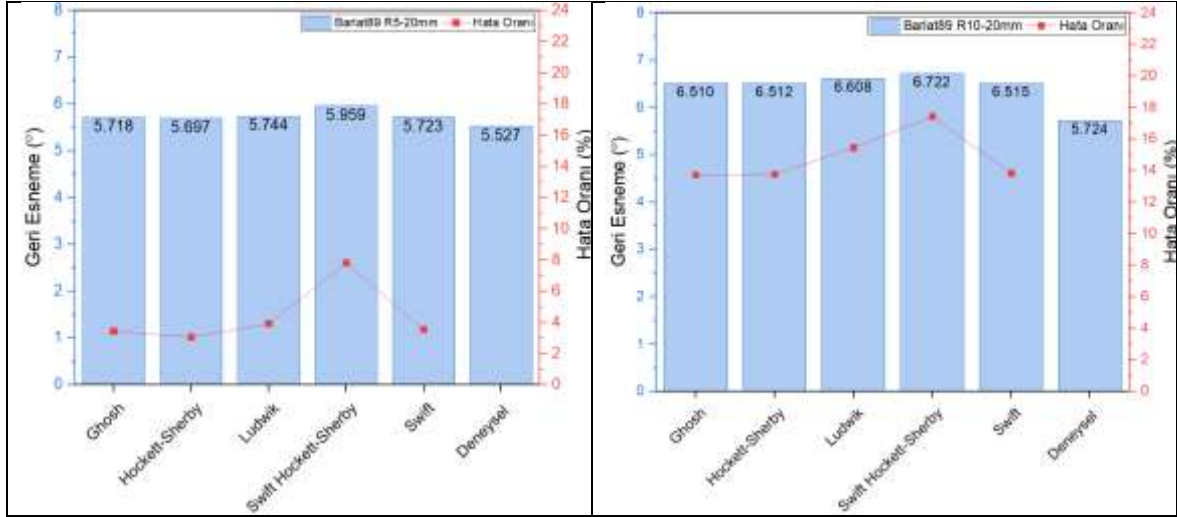
Ghosh ve Swift modelleri ise hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, Ghosh modeli R5-20mm zımba için $5,858^{\circ}$, R10-20mm için $6,666^{\circ}$ geri esneme tahmini yapmıştır. Swift modeli ise R5-20mm için $5,863^{\circ}$, R10-20mm için $6,671^{\circ}$ değerlerini vermiştir. Bu iki modelin geri esneme değerleri Hockett-Sherby ve Ludwik modelleri arasında konumlanmaktadır. Hata oranları açısından bakıldığında, Ghosh modeli R5-20mm için %5,98, R10-20mm için %16,46 hata oranına sahiptir. Swift modeli için bu oranlar sırasıyla %6,07 ve %16,55 olarak hesaplanmıştır. Bu oranlar, Hockett-Sherby modelinden biraz daha yüksek, ancak Ludwik ve Swift-Hockett-Sherby modellerine kıyasla daha düşük seviyededir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Ghosh ve Swift modelleri hata oranları açısından kabul edilebilir seviyelerde olup, Hockett-Sherby modeline yakın sonuçlar vermektedir.

Hata oranları ve geri esneme değerleri birlikte değerlendirildiğinde, Hockett-Sherby modelinin düşük hata oranı geri esneme tahminleri ile Hill48 akma kriteri ile kullanıldığında en güvenilir model olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Swift-Hockett-Sherby kombine modeli ve Ludwik modeli daha yüksek geri esneme tahminleri yapmakta ve hata oranları da görece yüksek seviyelerde seyrettiği görülmüştür.



Şekil 5.22. 20 mm şekillendirme mesafesi için Hill48 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Şekil 5.23’de Barlat89 akma kriteri ile pekleşme modellerinin performansları verilmiştir. R5-20mm zımba ile yapılan bükme işleminde en düşük geri esneme $5,697^\circ$ ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek geri esneme ise $5,959^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby modeli ile tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme miktarı $5,527^\circ$ olarak ölçülmüştür. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en düşük hata oranı %3,08 ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek hata oranı ise %7,82 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde gözlemlenmiştir. Ghosh ve Swift modellerinde ise tahmin performansı açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %3,46 ve %4,02 olarak hesaplanmıştır. R10-20 mm zımba ile yapılan analizlerde ise en düşük değer $6,51^\circ$ ile Ghosh modeli, en yüksek değer ise $6,722^\circ$ ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel olarak ölçülen geri esneme $5,724^\circ$ olup, hesaplanan en düşük hata oranı %13,77 ile Hockett-Sherby modelinde, en yüksek hata oranı ise %17,44 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde olduğu görülmüştür. Ghosh ve Swift modelleri hata oranları açısından yine orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %13,73 ve %14,15 olarak hesaplanmıştır. Barlat89 akma kriteri ile kullanılan pekleşme modellerinin performansları genel olarak değerlendirildiğinde Hockett-Sherby modeli hem R5-20mm hem de R10-20mm zımba ile yapılan şekillendirme analizlerinde en düşük hata oranını vermesi nedeniyle en güvenilir model olarak öne çıktığı görülmüştür. Swift-Hockett-Sherby kombine pekleşme modeli ise en yüksek hata oranına sahip geri esneme tahmin performansına sahip olduğu görülmüştür.



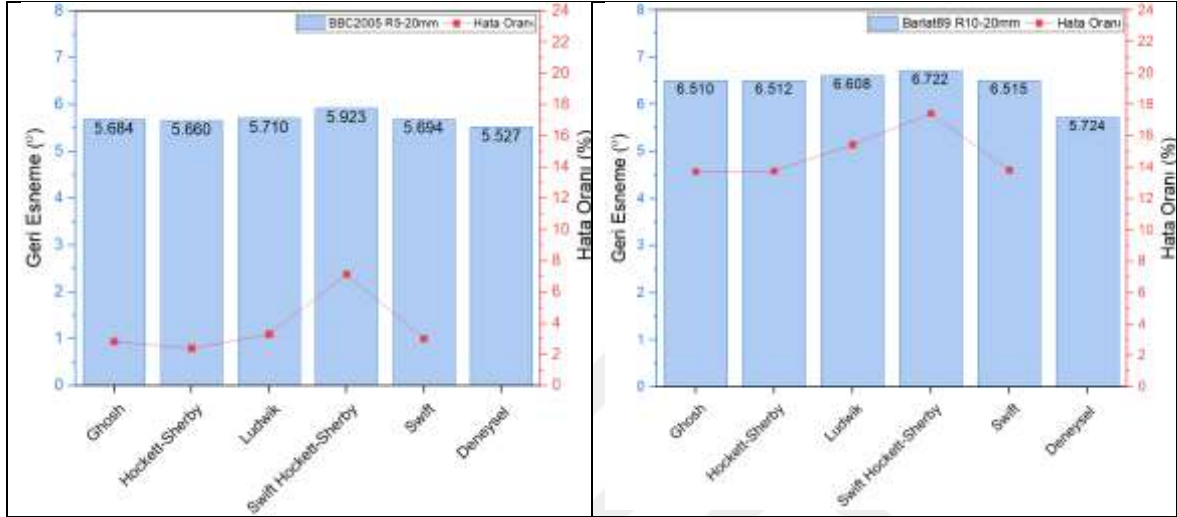
Şekil 5.23. 20 mm şekillendirme mesafesi için Barlat89 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Şekil 5.24'te BBC2005 akma kriteri ile kullanılan pekleşme modelleri tahmin performansları verilmiştir. R5-20mm zımba ile yapılan analizlerde, en düşük geri esneme değeri 5.660° ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise 5,923° ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri 5,527° olup hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en iyi tahmin performansına sahip model %2,89 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olurken, en yüksek hata oranı %6,95 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde olduğu görülmüştür. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %3,14, %3,78 ve %3,58 olarak hesaplanmıştır.

R10-20mm zımba ile yapılan analizlerde, geri esneme açısından en düşük değer 6,51° ile Ghosh modeli, en yüksek değer ise 6,722° ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneysel geri esneme değeri ise 5,724°. Hata oranları açısından bakıldığında, en iyi tahmin performansına sahip model %13,77 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olduğu belirlenmiştir. En yüksek hata oranı %17,44 ile Swift-Hockett-Sherby modeli ile yapılan bükme analizi sonucunda görülmüştür. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %13,73, %15,45 ve %14,15 olduğu görülmüştür.

Hockett-Sherby modelinin hem R5-20mm hem de R10-20mm koşullarında en düşük hata oranına sahip olması nedeniyle en iyi tahmin performansına sahip pekleşme modeli olduğu

belirlenmiştir. Swift-Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme hata oranları ile tahmin performansı en düşük pekleşme modeli olarak değerlendirilmiştir. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede olup birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca, tahmin sonuçları Hockett-Sherby modeline daha yakın değerlerdedir.



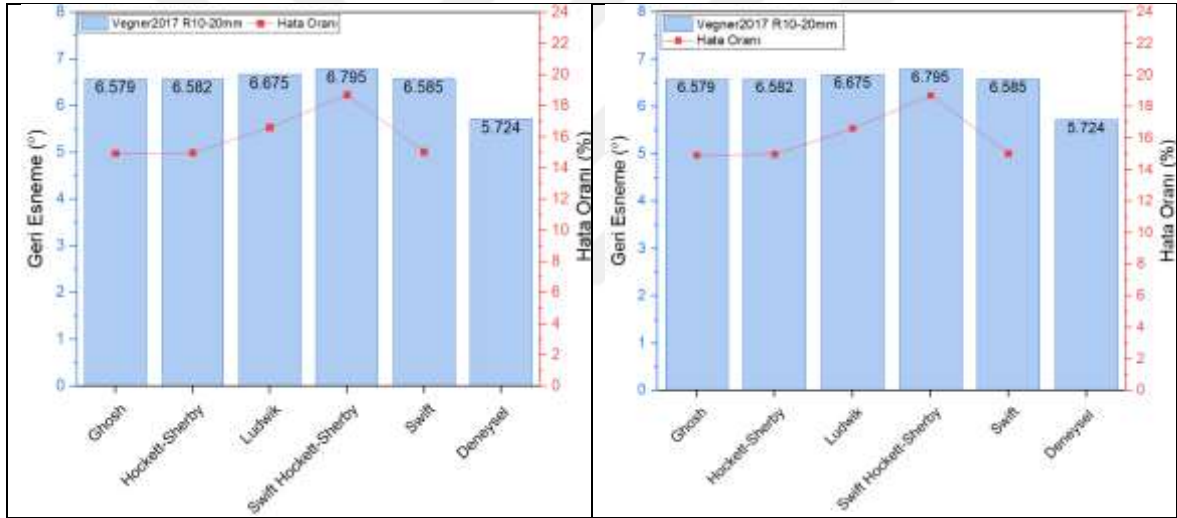
Şekil 5.24. 20 mm şekillendirme mesafesi için BBC2005 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

Şekil 5.25'te Vegner2017 akma kriteri kullanılarak yapılan bükme analizleri sonucunda, farklı pekleşme modelleri ile elde edilen geri esneme değerleri ve tahmin performansları karşılaştırılmıştır. R5-20mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde en düşük geri esneme değeri 5,761° ile Hockett-Sherby modeli, en yüksek geri esneme değeri ise 6,006° ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneyisel geri esneme değeri 5,527°'dir. Hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en iyi tahmin performansına sahip model %4,23 hata oranı ile Hockett-Sherby modeli olurken, en yüksek hata oranı %8,67 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde olduğu görülmüştür. Ghosh, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %4,65, %5,10 ve %5,72 olarak hesaplanmıştır.

R10-20mm zımba ile yapılan bükme analizlerinde ise en düşük geri esneme değeri 6,579° ile Ghosh modeli, en yüksek geri esneme değeri ise 6,795° ile Swift-Hockett-Sherby modeli tarafından tahmin edilmiştir. Deneyisel geri esneme değeri ise 5,724° olup, hata oranları açısından değerlendirildiğinde, en iyi tahmin performansına sahip model %14,94 hata oranı ile Ghosh modeli olurken, en yüksek hata oranı %18,71 ile Swift-Hockett-Sherby modelinde

hesaplanmıştır. Hockett-Sherby, Ludwik ve Swift modelleri hata oranları açısından orta seviyede yer almakta olup, hata oranları sırasıyla %14,99, %16,62 ve %16,21 olarak hesaplanmıştır. Hockett-Sherby modelinin hata oranı Ghosh modeline son derece yakın olduğu belirlenmiştir.

Vegner2017 akma kriteri altında yapılan bükme simülasyonlarında en uygun model, R5-20mm için Hockett-Sherby modeli, R10-20mm için Ghosh modeli olarak belirlenmiştir. R10-20mm zımba ile yapılan şekillendirme işleminde de Hockett-Sherby modelinin tahmin performansı en iyi tahmin performansı gösteren Ghosh modeline çok çok yakın olup dikkat çekmektedir. Swift-Hockett-Sherby modeli ise her iki durumda da en yüksek hata oranına sahip olması nedeniyle en düşük tahmin performansına sahip model olmuştur



Şekil 5.25. 20 mm şekillendirme mesafesi için Vegner2017 akma kriterine göre pekleşme modeli geri esneme tahmin performansı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı pekleşme modellerinin 6061-T6 alüminyum alaşım sac malzemenin bükme işlemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çekme testleri, malzeme karakterizasyonu ve bükme analizleri sonucunda, malzemenin hadde yönüne bağlı olarak mekanik davranışında farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. 0° hadde yönünde en yüksek akma dayanımı ve uzama değerleri elde edilirken, 45° ve 90° hadde yönlerinde mekanik özelliklerde belirgin değişimler gözlemlenmiştir.

Gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile farklı pekleşme modellerinin tahmin performansları karşılaştırıldığında şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Hockett-Sherby pekleşme modeli, en düşük hata oranına (%0,102) ve en yüksek uyum katsayısına ($R^2 = 0,9996$) sahip olup, deneysel verilere en iyi uyum sağlayan model olmuştur. Bu modelin, plastik deformasyon sürecinde pekleşme karakteristiğini en iyi şekilde temsil ettiği görülmüştür.

- Swift-Hockett-Sherby modeli, özellikle büyük şekil değişimleri için uygun bir tahmin performansı sergilemiş ve hata oranı %0,237 olarak hesaplanmıştır. Ancak bazı durumlarda hata oranı yükselmiş ve modelin doğruluğu azalmıştır.
- Ghosh ve Swift modelleri, tahmin performansı açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiş olup, hata oranları sırasıyla %0,239 ve %0,242 olarak hesaplanmıştır. Bu modeller, deneysel verilere uyum açısından başarılı kabul edilmekle birlikte, Hockett-Sherby modeline kıyasla daha yüksek hata içermektedir.
- Ludwik modeli, %0,405 hata oranı ile en yüksek sapmayı göstermiş ve diğer modellere kıyasla daha düşük bir tahmin performansı sergilemiştir. Modelin yüksek pekleşme oranına sahip olması, tahmin sonuçlarında sapmalara neden olmuştur.

Bükme işlemi sırasında şekillendirme kuvveti tahminleri açısından değerlendirildiğinde:

- Swift-Hockett-Sherby modeli, şekillendirme kuvveti tahminlerinde en başarılı model olarak öne çıkmıştır. En düşük hata oranı %1,70 olarak belirlenmiş olup, deneysel sonuçlarla yüksek uyum sağlamıştır.

- Hockett-Sherby modeli, şekillendirme kuvveti tahminlerinde başarılı sonuçlar vermesine rağmen bazı durumlarda hata oranı yükselmiştir.
- Ghosh ve Swift modelleri, orta seviyede hata oranlarına sahip olup, şekillendirme kuvveti tahminlerinde kabul edilebilir doğruluk sağlamıştır.
- Ludwik modeli, şekillendirme kuvveti tahminlerinde en yüksek hata oranına sahip olmuş ve özellikle yüksek deformasyon bölgelerinde diğer modellere kıyasla daha düşük doğruluk sergilemiştir.

Geri esneme tahminleri açısından incelendiğinde:

- Hockett-Sherby modeli, en düşük hata oranı ile geri esneme miktarını en doğru şekilde tahmin eden model olarak belirlenmiştir.
- Swift-Hockett-Sherby modeli, bazı test koşullarında geri esneme tahminlerinde başarılı sonuçlar verse de, hata oranlarının belirli durumlarda yükseldiği tespit edilmiştir.
- Ghosh ve Swift modelleri, hata oranları açısından orta seviyede olup, belirli deformasyon miktarlarında makul tahmin performansı göstermiştir.
- Ludwik modeli, geri esneme tahminlerinde en yüksek hata oranına sahip olmuş ve özellikle büyük deformasyonlar için güvenilirliği düşük bulunmuştur.

Öneriler:

- Endüstriyel uygulamalar açısından, 6061-T6 alüminyum alaşım sac bükme işlemlerinde geri esneme tahmininin doğruluğunu artırmak için Hockett-Sherby pekleşme modelinin kullanılması önerilmektedir.
- Şekillendirme kuvveti tahminlerinde, Swift-Hockett-Sherby kombine modeli uygun bir alternatif olabileceği görülmüştür ancak yüksek deformasyon bölgelerinde hata oranlarının arttığı göz önünde bulundurulmalıdır.
- Gelecek çalışmalar açısından, geri esneme ve şekillendirme kuvveti tahmin performansını artırmak amacıyla, makine öğrenmesi tabanlı hibrit modellerin geliştirilmesi önerilmektedir.
- Farklı sac metal alaşımlarında, benzer yöntemlerle ek çalışmalar yapılarak pekleşme modellerinin performanslarının değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Karakoyun, F., Kiritsis, D., Martinsen, K. (2014). Holistic life cycle approach for lightweight automotive components. *Metallurgical Research and Technology*, 111(3):137-146
2. Czerwinski, F. (2021). Current trends in automotive lightweighting strategies and materials. *Materials*, 14(21), 6631.
3. Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel, C. (2012). Potential vehicle fleet CO₂ reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. *Energy Policy*, 40(1), 404–421.
4. Majumdar, S., Sinha, A., Das, A., Datta, P., Nag, D. (2024). An insight view of evolution of advanced aluminum alloy for aerospace and automotive industry: Current status and future prospects. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 32(2), 131-172.
5. Baruah, H., Borah, R.R. (2020). Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Materials Science*, 1(1A), 37–42.
6. Chauhan, K. (2017). Influence of heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys (6xxx series): A literature review. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(3), 424–428.
7. Stoicănescu, M. (2023). Study on the influence of treatment parameters on the hardness of 6xxx series aluminium alloys. *Review of the Air Force Academy*, 21(1), 58–66.
8. Dubey, R., Jayaganthan, R., Ruan, D., Gupta, N., Jones, N., Velmurugan, R. (2022). Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 165, 104397.
9. Kut, S., Pasowicz, G., Stachowicz, F. (2024). Experimental determination of springback characteristics in a three-point bending test of the aluminium alloy sheet with aluminium cladding. *Acta Mechanica et Automatica*, 18(3), 307–313.
10. Örnekci, A. O., Ekşi, S. (2024). Experimental study on springback properties of 6061 aluminum in V-bending. *Sakarya University Journal of Science*. 28(3), 21-29.
11. Hetz, P., Merklein, M. (2024). Numerical springback prediction for high-strength aluminum alloys based on the sheet metal upsetting test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 13(1), 4290.
12. Mulidrán, P., Spišák, E., Tomáš, M., Varga, J., Majerníková, J. (2021). The effect of material models on springback prediction. *Strength of Materials*, 53(1), 1-5.
13. Mulidrán, P., Spišák, E., Tomáš, M., Majerníková, J., Varga, J. (2021). The effect of material models in the FEM simulation on the springback prediction of the TRIP steel. *Acta Metallurgica Slovaca*. 27(3), 103-108.

14. Şen, N., Civek, T., Seçgin, Ö. (2022). Experimental, analytical and parametric evaluation of the springback behavior of MART1400 sheets. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(6).
15. Zhu, P., Zhang, Q., Xu, H., Ouyang, Y. (2021). Experimental and numerical investigation on plasticity and fracture behaviors of aluminum alloy 6061-T6 extrusions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(3).
16. Wang, G., Zhu, G., Kou, L., Li, T., Liu, Z., Shang, X., Jiang, X., Zhu, X. (2019). Effect of heat treatment conditions on stamping deformation and springback of 6061 aluminum alloy sheets. *Materials Research Express*, 7(1).
17. Trzepieciński, T., Lemu, H. (2017). *Prediction of springback in V-die air bending process by using finite element method*. MATEC Web of Conferences, 121, 03023.
18. Trzepieciński, T., Lemu, H. (2019). Prediction of springback in the air V-bending of metallic sheets. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 645(1), 012011.
19. Shrivastava, A. (2020). Study of spring back process in sheet metal: A review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(1), 222–226.
20. Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S. (2013). Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials & Design*, 50, 253–266.
21. Spišák, E., Majerníková, J., Mulidrán, P., Hajduk, J., Ruda, F. (2025). Springback analysis and prediction of automotive steel sheets used in compression bending. *Materials*, 18(4), 774.
22. Huang, M., Fu, L., Lee, L., Liu, C. (2017). Effect of yield function on the stamping springback of aluminum alloy. In *Advanced High Strength Sheet Steels*, 199–208.
23. Olguner, S., Bozdana, A. (2019). *Prediction of Lankford coefficients for AA1050 and AA5754 aluminum sheets using uniaxial tensile tests and cup drawing experiments*. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine, 438-446.
24. Sarban, A. A. (2024). Impact of hot rolling on the r-values of 6000 series aluminium alloys. *Materials Research Proceedings*. 41, 914-950.
25. Kim, H., Park, S. (2019). Loading direction dependence of yield-point phenomenon and Bauschinger effect in API X70 steel sheet. *Metals and Materials International*, 26(1), 14–24.

26. Sobotka, J., Solfronk, P., Koreček, D., Kolnerová, M. (2017). Influence of testing methods on the final values of the modulus of elasticity E. *MM Science Journal*, 1942–1946.
27. Grajcar, A., Kozłowska, A., Grzegorzczak, B. (2018). Strain hardening behavior and microstructure evolution of high-manganese steel subjected to interrupted tensile tests. *Metals*, 8(2), 122.
28. Zhou, D., Wang, H., Saxey, D., Muránsky, O., Geng, H., Rickard, W., Quadir, Z., Yang, C., Reddy, S., Zhang, D. (2019). Hall–Petch slope in ultrafine grained Al-Mg alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(9), 1–11.
29. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801–806.
30. Buang, M. S., Abdullah, S., Saedon, J. (2015). Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air V-die bending process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8, 1322–1331.
31. Leu, D. K. (2018). Relationship between mechanical properties and geometric parameters to limitation condition of springback based on springback–radius concept in V-die bending process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1–4), 913–926.
32. Karalar, M., Bayramoğlu, M. (2022). Combined impacts of thickness and bending angle on springback of 1000DP steel sheets. *Ironmaking & Steelmaking*, 49(7), 693–698.
33. Durrenberger, L., Dietsch, P. (2018). *Bending angle correction regarding sheet thickness*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418(1), 012076.
34. Çavuşoğlu, O., Gürün, H. (2014). Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 777–784.
35. Stachowicz, F., Trzepieciński, T., Pieja, T. (2010). Warm forming of stainless steel sheet. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(2), 85–94.
36. Bay, N., Olsson, D., Andreasen, J. L. (2008). Lubricant test methods for sheet metal forming. *Tribology International*, 41(9–10), 844–853.
37. Trzepieciński, T., Szewczyk, M., Szwajka, K. (2022). The use of non-edible green oils to lubricate DC04 steel sheets in sheet metal forming process. *Lubricants*, 10(9), 210.
38. İnternet: AutoForm Engineering GmbH. URL: https://www.autoform.com/fileadmin/public/Redaktion/tr/newsroom/news/2019/Press_Release_190827_tr.pdf. Son Erişim Tarihi: 19.03.2025.

39. İnternet: ASM International. (2025). Aluminum and aluminum alloys subject guide. ASM International. URL: <https://www.asminternational.org/aluminum-and-aluminum-alloys-subject-guide/?srsltid=AfmBOooE3mOqjJiqrUnYUdGVLn9iJUz9sfEm8fyvinls5mcBlMDX8Sw9> Son Erişim Tarihi: 15 Haziran 2025.
40. İnternet: SyBridge Technologies. (2025). Decoding aluminum alloy numbering. SyBridge Technologies. URL: <https://sybridge.com/decoding-aluminum-alloy-numbering/> Son Erişim Tarihi: 15 Haziran 2025,
41. Dizaji, S. A., Darendeliler, H., Kaftanoglu, B. (2014). Effect of hardening models on different ductile fracture criteria in sheet metal forming. *International Journal of Material Forming*, 9(3), 261–267.
42. Butuc, M., Teodosiu, C., Barlat, F., Gracio, J. (2011). Analysis of sheet metal formability through isotropic and kinematic hardening models. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 30(5), 532–546.
43. Butuc, M., Barlat, F., Gracio, J., Vincze, G. (2010). Sheet metal forming limit predictions based on advanced constitutive equations. *International Journal of Material Forming*, 3(3), 179–182.
44. Fu, P., Yu, G., Song, D., Qi, S., Qiao, Z., Zhang, Y., Meng, Q., Zhao, J., Jia, S. (2025). A forming limit prediction model based on tensile instability theory for orthotropic sheet metal considering distortion hardening. *Journal of Materials Science*. 60(6), 3040–3062.
45. Zhu, H., Lin, Y., Chen, K., He, Z., Yuan, S. (2023). A homogeneous anisotropic hardening model in plane stress state for sheet metal under nonlinear loading paths. *Materials*, 16(3).
46. Noman, M., Clausmeyer, T., Barthel, C., Svendsen, B., Huétink, J., Riel, M. V. (2010). Experimental characterization and modeling of the hardening behavior of the sheet steel LH800. *Materials Science and Engineering A*, 527(9), 2515–2526.
47. Dizaji, S. A., Darendeliler, H., Kaftanoglu, B. (2016). On the fracture prediction of 304L stainless steel sheets utilizing different hardening models. *Journal of Physics: Conference Series*, 734(3).
48. Yoon, J., Stoughton, T. (2010). *Modeling of directional hardening based on non-associated flow for sheet forming*. AIP Conference Proceedings, 1252, 161–167.
49. Sanrutsadakorn, A., Lawong, W., Julsri, W. (2023). Numerical study of predicting forming process based on different hardening models in advanced high strength steel sheets. *Key Engineering Materials*, 951, 21–32.
50. Yoshida, F. (2010). *Material models for accurate simulation of sheet metal forming and springback*. AIP Conference Proceedings, 1252, 71–78.

51. Burello, E., Rezvanpour, H., Cimolino, D., Capaccioli, F., Vergnano, A. (2025). Integrating stamping-induced material property variations into FEM models for structural performance simulation of sheet-metal components. *Applied Sciences*. 15(5), 2480.
52. Jasri, M. (2016). *A new tool to acquire sheet metal cyclic plasticity data for hardening models*. In: Conference Proceedings: International Conference On Materials Science, Metal & Manufacturing (M3 2016). Singapore, 94-100.
53. Chen, C., Gong, J., Chen, Y., Wang, J. (2021). A prediction model for bending springback of AZM120 sheet metal and mechanical compensation of CNC automatic panel bender. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(9–10), 3325–3337.
54. Chen, J., Xiao, Y., Ding, W. W., Zhu, X. (2015). Describing the non-saturating cyclic hardening behavior with a newly developed kinematic hardening model. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 151–158.
55. Rosenschon, M., Merklein, M. (2018). *Analysis of the stress and directional dependent Bauschinger-effect of sheet metals*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418(1).
56. Eggertsen, P-A. (2011). *Prediction of springback in sheet metal forming*, Doktora tezi, Chalmers University of Technology, İsveç, ISBN 978-91-7385-501-3.
57. Dong, X. H. (2012). GTN meso-damage model based on different hardening rules and its application for springback finite element analysis in sheet metal forming. *Engineering Mechanics*. 1(3), 97-121.
58. Yue, Z., Qi, J., Zhao, X. D., Badreddine, H., Gao, J., Chu, X. (2018). Springback prediction of aluminum alloy sheet under changing loading paths. *Metals*, 8(11), 950.
59. Kılıç, S., Öztürk, F., Picu, C. R. (2018). Investigation of the performance of flow models for TWIP steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 4346–4371.





Gazili olmak ayrıcalıktır