

**ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE ŞEKİL VERME OPERASYONLARI  
SONUCUNDA OLUŞAN GERİ YAYLANMANIN GÜRBÜZ  
OPTİMİZASYONU**

**DENİZ BEKAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2011**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

Deniz BEKAR tarafından hazırlanan ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE ŞEKİL VERME OPERASYONLARI SONUCU OLUŞAN GERİ YAYLANMANIN GÜRBÜZ OPTİMİZASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR (Tez Danışmanı)

---

Doç. Dr. Mehmet Ali GÜLER (İkinci Tez Danışmanı)

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül Altın KAYHAN

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Deniz BEKAR

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR  
**Tez İkinci Danışmanı** : Doç. Dr. Mehmet Ali GÜLER  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Ekim 2011

**Deniz BEKAR**

**ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE ŞEKİL VERME OPERASYONLARI SONUCUNDA  
OLUŞAN GERİ YAYLANMANIN GÜRBÜZ OPTİMİZASYONU**

**ÖZET**

Günümüzde otomobil şirketleri, araçlardaki yapısal elemanların mukavemetlerini ve çarpmaya dayanıklılıklarını riske atmadan daha düşük ağırlığa sahip ve daha az yakıt tüketimi olan araç üretimi üzerine odaklanmışlardır. Bu amaçla otomotiv üreticileri, alüminyum ve magnezyum alaşım malzemelerin yerine alternatif olarak daha az maliyetli ve daha iyi dayanımlı yüksek mukavemetli çift fazlı çeliklerin kullanımını arttırmışlardır. Bununla birlikte, yüksek akma mukavemetinden dolayı çift fazlı çelikler diğer yapısal çeliklere oranla şekil verme işlemlerinden sonra daha fazla geri yaylanma eğilimi göstermektedir. Ayrıca, malzeme özelliklerinin ve imalat sürecindeki değişkenlerin sahip olduğu varyasyonlar üretilen parçaların geri yaylanma değerlerinde değişimlere sebep olmaktadır. Bu nedenle, hem gürbüz hem de uygun maliyetli parçaların üretilebilmesi için geri yaylanmanın azaltılması kadar sahip olduğu varyasyon değerinin de düşürülmesi önemli bir çalışma konusudur. Bu çalışmada, DP600 çeliklerinde iki farklı problem için, U-büküm ve 7-flanşlı, şekil verme işlemlerinden sonra oluşan geri yaylanma miktarının ve varyasyonunun bir gürbüz optimizasyon çerçevesinde en aza indirilmesi incelenmektedir. Gürbüz optimizasyonun hesaplama maliyetini azaltabilmek ve Monte Carlo benzetimi ile hesaplanan geri yaylanma miktarını ve varyasyonunu tahmin edebilmek için vekil modeller oluşturulmuştur. Geri yaylanmayı etkileyen en etkili rastsal değişkenleri belirleyebilmek için hassasiyet analizi gerçekleştirilmiş ve akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ) en önemli parametre olarak belirlenmiştir. Parçadan-parçaya ve partiden-partiye olan geri yaylanma varyasyonlarını hesaplayabilmek amacıyla çift döngülü bir Monte Carlo benzetimi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, akma gerilmesinin partiden-partiye olan varyasyonu arttıkça, partiden-partiye olan geri yaylanma varyasyonu artmakta fakat parçadan-parçaya olan geri yaylanma varyasyonu değişmemektedir. 7-flanşlı tasarım problemi için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon süreci sonucunda geri yaylanma açılarının ortalama değerlerinde nominal ortalama geri yaylanma sonuçlarına kıyasla %7 ila %85 arasında değişen miktarlarda azalma meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca,

kalıp ve zımba yarıçapları için tasarımcı tarafından belirlenen alt ve üst sınır değerlerinin geri yaylanmanın optimum ortalama ve standart sapma değerini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri yaylanma, gürbüz optimizasyon, çift döngülü Monte Carlo benzetimi, vekil model.

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Assistant Professor Dr. Erdem ACAR  
**Co – Supervisor** : Associate Professor Dr. Mehmet Ali GÜLER  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – October 2011

**Deniz BEKAR**

**ROBUST OPTIMIZATION OF SPRINGBACK IN DUAL PHASE STEELS  
DURING SHEET METAL FORMING OPERATIONS**

**ABSTRACT**

Nowadays, automobile companies have been focused on manufacturing light-weight and fuel efficient automobiles without jeopardizing the strength and crashworthiness of the structural parts. For that purpose, automotive manufacturers are actively exploring the use of high strength dual phase steels as an alternative to aluminum and magnesium alloys due to their low cost and durability. However, dual phase steels have a tendency to springback more than other structural steels in a forming operation due to their high tensile strength. In addition, variations in manufacturing process parameters and material properties cause springback variation over different manufactured parts. Therefore, it is an important task to reduce the magnitude of springback as well as its variation within to produce robust and cost-effective parts. This work investigates minimization of the magnitude and variation of springback of DP600 steels in both U-channel forming and 7-flange design within a robust optimization framework. Metamodels are constructed to reduce the computational cost of robust optimization and also predict the springback and its variation computed by Monte Carlo simulations. Sensitivity analysis is performed to determine the most important random variables that affect the springback. Yield stress ( $\sigma_y$ ) is found to be most influential parameter. Finally, a double-loop Monte Carlo simulation method is proposed to calculate part-to-part and batch-to-batch springback variations. It is found that as the batch-to-batch variation of yield stress increases, the batch-to-batch springback variation increases while the part-to-part springback variation remains unchanged. For 7-flange design, considerable reductions were obtained for the mean values of different springback angles in amounts varying between 7% and 85% when compared to nominal mean springback results. It was observed for most cases that the optimizer pushed the design variables to lower and upper bounds.

**Keywords:** Springback, robust optimization, dual phase steels, double-loop Monte Carlo simulations, metamodel.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasında çok değerli katkılarda bulunan ve her daim yol gösteren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR'a en içten şekilde teşekkür ederim. Ayrıca katkılarından ötürü ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Ali Güler'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmayı MAG-109M078 kodlu proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve proje kapsamındaki deneyleri gerçekleştiren ÇOŞKUNÖZ firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Beraber proje çalışmalarını yürüttüğümüz Fırat ÖZER'e göstermiş olduğu büyük emek ve özveriden ötürü en içten şekilde teşekkür ederim. Ayrıca tüm asistan arkadaşlarıma, özellikle Z88 ve Z89 nolu oda sakinleri Akın PAKSOY, Çağın GÜLENOĞLU, Haydar BATTALOĞLU, İlkay GÜNEL, Muhammed Emin CERİT ve Sefa YILMAZTÜRK'e göstermiş oldukları samimi arkadaşlıklarından dolayı teşekkür ederim. En zor zamanlarda yanımda olan, yardım ve desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen ve onları tanımaktan dolayı kendimi şanslı hissettiğim Fatih AKTÜRK, Gizem GÜLBEN ve İbrahim Ethem BAĞCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak aileme, anneme, babama ve kız kardeşime tüm hayatım boyunca bana gösterdikleri anlayış, verdikleri destek ve en önemlisi sevgiden ötürü sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xviii
KISALTMALAR	xxi
SEMBOL LİSTESİ	xxii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı .....	4
1.3. Çalışmanın Literatüre Katkıları .....	5
1.4. Tezin İçeriği .....	5
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	6
2.1. Geri Yaylanma Analizi .....	6
2.1.1. Analitik çalışmalar .....	6
2.1.2. Sonlu elemanlar yöntemi .....	7
2.2. Vekil Modeller .....	8
2.2.1. Deney tasarımı .....	9
2.2.1.1. Klasik tasarımlar .....	9
2.2.1.2. Uzay doldurma tasarımlar .....	10
2.2.2 Çalışmada kullanılan modeller .....	12



2.2.2.1. Polinom yanıt yüzey (PYY).....	12
2.2.2.2. Kademeli polinom regresyon (KPR).....	13
2.2.2.3. Radyal tabanlı fonksiyonlar (RTF) .....	14
2.2.2.3. Kriging (KR) .....	15
2.2.3. Vekil modellerin doğruluğunun belirlenmesi .....	16
2.2.3.1 Veri noktalarında çapraz doğrulama .....	18
2.2.3.2. Test noktalarında doğrulama.....	20
2.3. Geri Yaylanmanın Deterministik Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar .....	21
2.3.1. Direkt optimizasyon çalışmaları .....	22
2.3.2. Vekil model tabanlı optimizasyon çalışmaları.....	23
2.4. Geri Yaylanmanın Gürbüz Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar .....	24
2.4.1. Direkt optimizasyon çalışmaları .....	24
2.4.2. Vekil model tabanlı optimizasyon çalışmaları.....	25
3. YÖNTEM .....	27
3.1. Taguchi Yöntemi .....	29
3.2. Gürbüz Optimizasyon.....	34
3.2.1. Gürbüz optimizasyon problem tanımı .....	36
3.2.2. Varyasyon hesabı .....	40
3.2.2.1. Analitik yöntemler .....	41
3.2.2.2. Benzetim yöntemleri .....	44
3.2.2.3. Tek döngülü Monte Carlo benzetimi .....	44
3.2.2.4. Tek döngülü Monte Carlo benzetiminin dezavantajları.....	45
3.3. Önerilen Yöntem (Çift Döngülü Monte Carlo Benzetimi Yöntemi) .....	46

4. U-BÜKÜM PROBLEMİ (ANALİTİK ÇÖZÜM) .....	52
4.1. Geri Yaylanma Analizi.....	52
4.2. Gürbüz Optimizasyon Probleminin Tanımı .....	57
4.3. Optimizasyon Probleminin Çözümü .....	59
4.3.1. % 5'lik sac incelmesi kısıtı için çözüm.....	60
4.3.2. %10'luk sac incelmesi için çözüm.....	64
4.3.3. %15'lik sac incelmesi için çözüm.....	67
4.4. Deterministik ve Gürbüz Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	70
4.5. Hassasiyet Analizi .....	71
4.6. Parçadan-Parçaya ve Partiden-Partiye Geri Yaylanma Varyasyonu Hesabı... 73	
4.7. Tartışma.....	75
5. U-BÜKÜM PROBLEMİ (SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ) .....	77
5.1. U-Büküm .....	78
5.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması.....	80
5.3. Vekil Model Oluşturulması .....	82
5.3.1. Tasarım noktalarının oluşturulması .....	82
5.3.2. Vekil modeller .....	83
5.4. Vekil Modellerin Doğruluğunun Hesaplanması.....	83
5.5. Hassasiyet Analizi .....	84
5.6. Gürbüz Optimizasyon Probleminin Tanımı .....	86
5.7. Optimizasyon Probleminin Çözümü .....	90
5.8. Parçadan-Parçaya ve Partiden-Partiye Geri Yaylanma Varyasyonu Hesabı... 94	
5.9. Tartışma .....	99

6. 7-FLANŞLI TASARIM PROBLEMİ.....	101
6.1. 7-Flanşlı Tasarım Probleminin Tanımlanması .....	102
6.2. 7-Flanşlı Tasarım için Sonlu Elemanlar Analizleri.....	106
6.3. Vekil Modeller .....	108
6.3.1. Birinci seviye vekil modeller için örnekleme noktalarının oluşturulması .....	110
6.3.2. Birinci seviye vekil modellerin oluşturulması .....	111
6.3.3. Birinci seviyedeki vekil modellerin doğruluğunun hesaplanması .....	111
6.4. Optimizasyon Yöntemi.....	115
6.4.1. İkinci seviye vekil modellerin oluşturulması.....	115
6.4.2. İkinci seviyedeki vekil modellerin doğruluğunun hesaplanması.....	116
6.5. Optimizasyon sonuçları .....	117
6.5.1. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları.....	117
6.5.2. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları.....	119
6.6. Birden fazla vekil model kullanarak optimizasyon .....	123
6.7. Tartışma.....	126
7. SONUÇLAR .....	128
7.1. Tartışma.....	128
7.2. Sonuçlar.....	128
7.3. İleriye Yönelik Çalışmalar .....	133
KAYNAKLAR .....	134
EKLER.....	140
EK A : Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları .....	140

EK B : Farklı ağırlık katsayıları için gürbüz optimizasyon sonuçları .....	144
ÖZGEÇMİŞ .....	150

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. İç ve dış sıralar kullanılarak oluşturulan örnek bir ürün dizisi .....	33
Çizelge 3.2. <i>Parçadan-parçaya</i> ve <i>partiden-partiye</i> varyasyon için dağılım parametreleri .....	50
Çizelge 4.1. 0.7-1.0 mm aralığındaki $R_d$ değerleri için Monte Carlo benzetimi (10,000 adet örnekleme) sonuçları.....	60
Çizelge 4.2. Geri yaylanmanın ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti .....	62
Çizelge 4.3. Sac incelmesinin ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti .....	64
Çizelge 4.4. 0.48-0.6 mm aralığındaki $R_d$ değerleri için Monte Carlo benzetimi.....	65
Çizelge 4.5. 0.31-0.43 mm aralığındaki $R_d$ değerleri için Monte Carlo benzetimi sonuçları .....	66
Çizelge 4.6. Müsaade edilebilir sac incelmesine bağlı olarak kalıp yarıçapı ile geri yaylanmanın ve sac incelmesinin büyüklük ve varyasyonunun değişimi .....	70
Çizelge 4.7. Deterministik ve gürbüz optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması...71	
Çizelge 4.7. Rastsal değişkenlerin ortalama ve sınır değerleri .....	72
Çizelge 4.8. Rastsal değişkenlerin geri yaylanma üzerine etkisi.....	72
Çizelge 4.9. Rastsal değişkenlerin geri yaylanma üzerine etkisi. ....	72

Çizelge 4.10. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile elde edilen sonuçlar .....	73
Çizelge 5.1. Büküm işleminin parametreleri ve sacın boyutları .....	79
Çizelge 5.2. DP600 malzemesine ait mekanik özellikler .....	81
Çizelge 5.3. Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması .....	82
Çizelge 5.4. Süreç değişkenleri için minimum ve maksimum değerler.....	83
Çizelge 5.5. $\theta_1, \theta_2, \rho$ ve $\Delta t$ için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları ..	84
Çizelge 5.6. Değişkenlere karşılık gelen tanımlar .....	85
Çizelge 5.7. Rastsal değişkenler için dağılım özellikleri.....	86
Çizelge 5.8. $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\Delta t}$ , ve $\sigma_{\Delta t}$ tahmini için hata miktarları .....	88
Çizelge 5.9. Gürbüz optimizasyon probleminin çözümü ( $w_1=w_2=0.5$ ) .....	90
Çizelge 5.10. Optimum tasarım değişkenleri için doğrulama sonuçları .....	90
Çizelge 5.11. $t_{spec}=\%5$ için gürbüz optimizasyon sonuçlarının nominal sonuçlar ile karşılaştırılması .....	91
Çizelge 5.12. $t_{spec}=\%10$ için gürbüz optimizasyon sonuçlarının nominal sonuçlar ile karşılaştırılması .....	92
Çizelge 5.13. Optimum kalıp yarıçapı değerleri için çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile hesaplanan parçadan-parçaya ve partiden-partiye geri yaylanma varyasyonu değerleri .....	95
Çizelge 5.14. $K$ ve $n$ için parçadan-parçaya ve partiden-partiye dağılım parametreleri. ....	97
Çizelge 6.1. Her bir flanşa ait genel özellikler.....	103

Çizelge 6.2. DP600 çeliğine ait malzeme özellikleri .....	106
Çizelge 6.3. Geri yaylanma açılarına ait SEA sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	108
Çizelge 6.4. Her bir flanş için tasarım değişkenlerinin (zımba ve kalıp yarıçapının) minimum ve maksimum değerleri .....	110
Çizelge 6.5. Rastsal değişkenlerin minimum ve maksimum değerleri .....	110
Çizelge 6.6. Birinci seviyede her bir flanş için belirlenen en iyi vekil model tipleri.....	112
Çizelge 6.7. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #1) .....	112
Çizelge 6.8. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #2) .....	113
Çizelge 6.9. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #3) .....	113
Çizelge 6.10. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #4) .....	113
Çizelge 6.11. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #5) .....	114
Çizelge 6.12. $\theta_1$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #6).....	114
Çizelge 6.13. $\theta_1$ ve $\theta_2$ tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #7) .....	114
Çizelge 6.14. Rastsal değişkenler için normal dağılım parametreleri.....	115

Çizelge 6.15. Her bir flanş için en düşük hata miktarına sahip vekil model tipleri (ikinci seviye vekil modeller arasından).....	116
Çizelge 6.16. Flanş #1'in $\theta_1$ ve $\theta_2$ açıları için PYY vekil modellerinin sahip olduğu katsayılar .....	118
Çizelge 6.17. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ).....	119
Çizelge 6.18. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ).....	121
Çizelge 6.19. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = 1, w_2 = 0$ ).....	122
Çizelge 6.20. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = 0, w_2 = 1$ ).....	122
Çizelge 6.21. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ) .....	123
Çizelge 6.22. Birinci ve ikinci seviyede farklı vekil model tipleri kullanılarak elde edilen optimum tasarım değişkenleri.....	125
Çizelge 6.23. Farklı optimum tasarımların farklı vekil model tiplerinde kullanılmasıyla elde edilen ortalama geri yaylanma değerleri .....	126
Çizelge A.1. Tasarım değişkenlerinin alt (AS) ve üst sınır (ÜS) değerleri (Flanş #3-Flanş 7 için).....	140
Çizelge A.2. Flanş #3'ten Flanş 7'ye kadar için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ) .....	142
Çizelge B.1. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ ).....	144
Çizelge B.2. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ ).....	144
Çizelge B.3. Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ ) .....	145



Çizelge B.4. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1=1, w_2=0$ ).....	146
Çizelge B.5. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=0, w_2=1$ ).....	147
Çizelge B.6. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=0, w_2=1$ ).....	147
Çizelge B.7. Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları ( $w_1=0,$ $w_2=1$ ) .....	148
Çizelge B.8. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1=0, w_2=1$ ).....	149

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üç değişkenli klasik tasarımlar. (a) çok etmenli tasarım; (b) merkezi karma tasarım .....	10
Şekil 2.2. (a) “klasik” tasarım ve (b) “uzay doldurma” tasarımı .....	11
Şekil 2. 3. (a) Direkt optimizasyon. (b) Vekil model tabanlı optimizasyon. ....	22
Şekil 3.1. Gürbüz ve hassas tasarımların karşılaştırılması.....	27
Şekil 3.2. Gürbüz tasarımda P-şeması ile farklı tipteki tasarım parametreleri arasındaki ilişkinin gösterimi .....	28
Şekil 3.3. Varyasyon değerinin azaltılması ile süreç kalitesinin artırılması.....	30
Şekil 3.4. U-büküm sürecinde geri yaylanma ve geri yaylanma varyasyonunu minimize etmek için geliştirilen vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesi.....	35
Şekil 3.5. Aralık ölçekli değişkenlere sahip bir sistem .....	38
Şekil 3.6. Rastsal değişkenlere sahip bir sistem .....	39
Şekil 3.7. Tek döngülü Monte Carlo benzetimi algoritması .....	46
Şekil 3.8. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi modeli.....	48
Şekil 3.9. Düzgün dağılıma sahip akma gerilmesi varyasyon değeri .....	49
Şekil 3.10. $N_p \times N_b$ boyutlu sonuç matrisinden faydalanarak parçadan-parçaya ve partiden partiye varyasyonların hesaplanması.....	51
Şekil 4.1. U-büküm .....	53
Şekil 4.2. Gerdirilerek yapılan sac bükümü.....	54
Şekil 4.3. Sac incelmesinin Monte Carlo benzetimi sonucu elde edilen olasılık dağılımı.....	59
Şekil 4.4. Sac incilmesi için normal olasılık grafiği .....	59

Şekil 4.5. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi (%5'lik sac incelmesi için) .....	62
Şekil 4.6. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi (%5'lik sac incelmesi için) .....	62
Şekil 4.7. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi (%5'lik sac incelmesi için) .....	63
Şekil 4.8. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi (%5'lik sac incelmesi için) .....	63
Şekil 4.9. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi (%10'luk sac incelmesi için) .....	66
Şekil 4.10. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi (%10'luk sac incelmesi için) .....	66
Şekil 4.11. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi (%10'luk sac incelmesi için) .....	66
Şekil 4.12. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi (%10'luk sac incelmesi için) .....	66
Şekil 4.13. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi (%15'lik sac incelmesi için).....	68
Şekil 4.14. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi (%15'lik sac incelmesi için).....	68
Şekil 4.15. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi (%15'lik sac incelmesi için) .....	68
Şekil 4.16. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi (%15'lik sac incelmesi için) .....	68
Şekil 4.17. Geri yaylanma standart sapma değerinin $R_d = 0.96mm$ için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi .....	74
Şekil 4.18. Geri yaylanma standart sapma değerinin $R_d = 0.56mm$ için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi .....	74
Şekil 4.19. Geri yaylanma standart sapma değerinin $R_d = 0.38mm$ için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi.....	75
Şekil 5.1. U-büküm işleminin geometrik özellikleri.....	79

Şekil 5.2. 0.9 mm kalınlığındaki DP600 sac levhanın 7 ve 11 entegrasyon noktası kullanılarak yapılan geri yaylanma benzetimlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.3. Geri yaylanma ölçüm yöntemi.....	81
Şekil 5.4. $\theta_1$ için değişkenlerin etkileri .....	85
Şekil 5.5. $\theta_2$ için değişkenlerin etkileri .....	85
Şekil 5.6. $\rho$ için değişkenlerin etkileri.....	86
Şekil 5.7. $\Delta t$ için değişkenlerin etkileri .....	86
Şekil 5.8. $\mu_{\theta}$ için gerçek ( $y$ ) ve tahmin ( $\hat{y}$ ) yanıt değerleri arasındaki ilişki.....	89
Şekil 5.9. $\mu_{\Delta t}$ için gerçek ( $y$ ) ve tahmin ( $\hat{y}$ ) yanıt değerleri arasındaki ilişki .....	89
Şekil 5.10. $t_{spec}=\%5$ için optimum ( $w_1=w_2=0.5$ ) ve nominal tasarımların karşılaştırılması.....	93
Şekil 5.11. $t_{spec}=\%10$ için optimum ( $w_1=w_2=0.5$ ) ve nominal tasarımların karşılaştırılması .....	93
Şekil 5.12. $K$ ve $n$ parametrelerin <i>parçadan-parçaya</i> ve <i>partiden-partiye</i> değişiminin modellenmesi .....	96
Şekil 5.13. Parçadan-parçaya ve partiden-partiye varyasyonun değişimi ( $r_d = 3mm$ ) .....	98
Şekil 5.14. Parçadan-parçaya ve partiden-partiye varyasyonun değişimi ( $r_d = 7mm$ ) .....	99
Şekil 6.1. Şekil verme işlemi öncesi flanşların görünümü.....	103
Şekil 6.2. Şekil verme işlemi sonrası flanşların görünümü .....	103
Şekil 6.3. Geri yaylanma açısı ölçüm yöntemi .....	104
Şekil 6.4. Yedi flanşlı tasarım için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon sürecinin akış şeması .....	109

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

<b>BHF</b>	Sac tutucu kuvveti (blank holder force)
<b>BMMH</b>	Bağıl maksimum mutlak hata
<b>BOMH</b>	Bağıl ortalama mutlak hata
<b>CDF</b>	Birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function)
<b>COV</b>	Varyasyon katsayısı (coefficient of variation)
<b>DBRF</b>	Çekme boncuğu kısıtlayıcı kuvveti (draw bead restraining force)
<b>DoE</b>	Deney tasarımı (design of experiment)
<b>DP</b>	Çift fazlı çelik (dual phase steel)
<b>HY</b>	Haddeleme yönü
<b>KOHK</b>	Karekök ortalama hata karesi
<b>KPR</b>	Kademeli polinom regresyonu
<b>KPR1</b>	Birinci dereceden kademeli polinom regresyonu
<b>KPR2</b>	İkinci dereceden kademeli polinom regresyonu
<b>KR</b>	Kriging
<b>KR0</b>	Sabit eğilim modeline sahip Kriging modeli
<b>KR1</b>	Birinci dereceden eğilim modeline sahip Kriging modeli
<b>MMH</b>	Maksimum mutlak hata
<b>OMH</b>	Ortalama mutlak hata
<b>PDF</b>	Olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function)
<b>PYY</b>	Polinom yanıt yüzey
<b>PYY1</b>	Birinci dereceden polinom yanıt yüzey
<b>PYY2</b>	İkinci dereceden polinom yanıt yüzey
<b>RTF</b>	Radyal tabanlı fonksiyonlar
<b>SEA</b>	Sonlu elemanlar analizi
<b>SEY</b>	Sonlu elemanlar yöntemi
<b>SGO</b>	Sinyal gürültü oranı
<b>STD</b>	Standart sapma

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$b_b$	Parti sınırı
$\mathbf{d}$	Tasarım değişkeni vektörü
$E$	Elastisite modülü
$f$	Anizotropi katsayısı
$f_s$	Sürtünme katsayısı
$f(\mathbf{d})$	Amaç fonksiyonu
$g(\mathbf{d})$	Eşitsizlik kısıt fonksiyonu
$\mathbf{H}$	Şapka matrisi
$h(\mathbf{d})$	Eşitlik kısıt fonksiyonu
$K$	Pekleşme katsayısı
$L$	Değişken sayısı
$n$	Pekleşme üsteli
$N$	Örnekleme noktası sayısı
$N_b$	Parti sayısı
$N_p$	Parça sayısı
$r$	Radyal mesafe
$R$	Normal anizotropi
$R^2$	Belirleme katsayısı
$R(x_i, x_j)$	Korelasyon fonksiyonu
$R_d$	Kalıp yarıçapı
$(R_d)_{nom}$	Kalıp yarıçapı için nominal değer
$R_p$	Zimba yarıçapı
$t_{spec}$	Kritik sac incelme değeri
$w_1, w_2$	Ağırlık katsayıları
$\mathbf{x}$	Kontrol parametreleri
$\mathbf{X}$	Deney tasarımı matrisi
$y$	Asıl yanıt değeri
$\hat{y}$	Tahmini yanıt değeri
$\Delta t$	Sac incelme değeri
$\Delta y$	Yanıt değeri aralığı
$\varepsilon$	Gerinim
$\theta_1$	Yan duvar açısı
$\theta_2$	Flanş açısı
$\lambda_i$	İnterpolasyon katsayısı
$\mu$	Ortalama değer
$\xi$	Gürültü parametreleri

$\rho$	Yan duvar kıvrımı
$\sigma$	Standart sapma
$\sigma^2$	Varyasyon
$\sigma_b$	Partiden-partiye varyasyon
$\sigma_p$	parçadan-parçaya varyasyon
$\sigma_y$	Akma mukavemeti
$\varphi$	Öklid normundaki radyal tabanlı fonksiyon

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Otomotiv endüstrisindeki firmalar, mukavemet ve çarpmaya karşı dayanıklı yapısal parçalardan oluşan ama aynı zamanda da hafif olan ve yakıt tasarrufu sağlayan araç üretimi üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu amaç için, otomobil üreticileri alüminyum ve magnezyum alaşımlarına alternatif olarak kullanılabilir daha dayanıklı ve düşük maliyetli yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımını planlamaktadırlar. Bununla beraber yüksek mukavemetli çift fazlı çeliklerin kullanımı beraberinde şekil verme operasyonu sonucunda ortaya çıkan yüksek geri yaylanma problemini getirmektedir. Sahip oldukları yüksek çekme mukavemetlerinden dolayı, çift fazlı çelikler diğer yapısal çeliklere kıyasla daha fazla geri yaylanma eğilimi gösterirler. Ayrıca malzemenin anizotropik davranışlarından ve imalat sürecindeki değişkenlerin sahip olduğu varyasyonlardan ötürü her şekil verme işleminden sonra değişik geri yaylanma değerleri ile karşılaşmaktadır. Bu yüzden geri yaylanma miktarının ve varyasyonunun azaltılması, ucuz ve aynı zamanda gürbüz parçaların üretilebilmesi için önem arz etmektedir. Ayrıca geri yaylanma düzeyinin minimum düzeyde tutulması, parçaların montajı esnasında yüksek geri yaylanma miktarından dolayı karşılaşılabilecek büyük zorlukların giderilmesi açısından çok önemlidir. Bunu başarabilmenin yolu, şekil verme işlemine etki eden değişkenlerin (zımba kuvveti, sürtünme katsayısı vb.) optimum değerlerinin bulunmasıdır. Geri yaylanma miktarının en küçük değere indirilmesine (yani tasarlanan parça ile üretilen parça arasındaki farkın en küçük değere indirilmesi) ek olarak geri yaylanma yayılımının da (üretilen farklı parçalardaki farklı geri yaylanma değerleri) en küçük değere indirilmesi gürbüz bir sonuç elde edilebilmesi için gereklidir.

Hem geri yaylanmanın hem de geri yaylanma varyasyonunun azaltılması, üretim süreci değişkenlerinin optimum değerlerinin belirleneceği bir gürbüz optimizasyon çerçevesi dâhilinde yapılabilir. Ayrıca, bu optimizasyon çerçevesi dâhilinde, şekil verme sürecine etkiyen belirsiz parametrelerin (örneğin; sac kalınlığı, malzeme özellikleri vb.) de modellenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla gürbüz optimizasyon,



Üretim süreci değişkenleri ve belirsiz parametrelerin farklı kombinasyonları için, sonlu elemanlar yöntemi ile defalarca geri yaylanmanın hesaplamasını zorunlu kılar. Ancak, geri yaylanma gibi karmaşık analizler günümüz bilgisayar teknolojisi ile bile saatler almakta olduğundan, içinde sonlu elemanlar analizinin direkt kullanıldığı bir gürbüz optimizasyon çalışması makul görünmemektedir. Geri yaylanmaların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmaları yerine, hesaplama süresi kısa matematiksel modeller (vekil modeller) kullanılarak tahmin edilmeleri, gürbüz optimizasyonu mümkün kılar. Bu şekilde oluşturulan optimizasyon çerçevesi, *vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesi* olarak adlandırılır.

Bu yaklaşımın ilk adımı, üretim süreci değişkenlerinin ve belirsiz parametrelerinin saptanmasıdır. Daha sonra, geri yaylanmaları hızlı şekilde tahmin edilebilmek amacıyla farklı tipte vekil modeller oluşturulur. Bu vekil modellerin girdileri üretim süreci değişkenleri ve bazı belirsiz parametreler, çıktısı ise geri yaylanma miktarlarıdır. Son olarak, oluşturulan vekil modeller, bir gürbüz optimizasyon çerçevesi dâhilinde ortalama geri yaylanma ve geri yaylanma varyasyonu tahmininde kullanılırlar. Ayrıca, vekil modeller geri yaylanmanın üretim süreci değişkenlerine ve belirsiz parametrelere olan hassasiyetinin belirlenmesi amacı ile de kullanılırlar.

Oluşturulan vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesinin beş ana parçası bulunmaktadır: (1) geri yaylanma tahmini için vekil model oluşturma, (2) geri yaylanma varyasyonu hesaplama, (3) geri yaylanma varyasyonu hassasiyet analizi, (4) *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplama, (5) gürbüz optimizasyon. Bu aşamalar aşağıda açıklanmıştır.

Birinci aşamada, sonlu elemanlar analizi gibi uzun zaman alan analiz modellerinin yerini alan, hızlı sonuç üreten matematiksel modeller olan vekil modeller oluşturulur. Vekil model oluşturma aşamaları şu şekilde özetlenebilir. Öncelikle vekil modelin girdileri ve çıktıları belirlenir. Bu çalışmada kullanılan U-büküm ve 7-flanşlı büküm problemleri için oluşturulacak vekil modellerin girdileri üretim süreci değişkenleri ve bazı belirsiz parametreler, çıktısı ise geri yaylanma miktarlarıdır. Sonra, problemin doğasına uygun bir “deney tasarımı” seçilir. Burada, fiziksel olarak deney yapılarak

geri yaylanma ölçülmemekte, ancak sonlu elemanlar analiz modelleri ile sonuç elde edilmektedir. Deney tasarımı, vekil model girdilerinin her birinin ayrı bir eksen oluşturacağı bir uzayda, sonlu elemanlar analizi yapılacak nokta seçimidir. Seçilen bu noktalar örnekleme noktaları olarak adlandırılır. Vekil modellerin doğruluğu, örnekleme noktalarının sayısına ve bu noktaların tasarım uzayı içinde seçildikleri yere bağlıdır. Bahsedilen problemler için deney tasarımı, üretim süreci değişkenleri ve belirsiz parametrelerin hangi kombinasyonları için sonlu elemanlar analizi yapılır, geri yaylanma hesaplanacağıının belirlenmesidir. Deney tasarımı yapıldıktan sonra, seçilen noktalarda sonlu elemanlar analizleri yapılır. Daha sonra, problemin girdileri ile çıktıları arasında ilişki kurmak amacıyla farklı tip vekil modeller oluşturulur. Son olarak, doğruluk derecesi en yüksek olan vekil model seçilir ve sonraki aşamalarda kullanılır.

İkinci aşamada ise geri yaylanmanın toplam varyasyonu hesaplanır. Yüksek geri yaylanma değerleri üretilen parçaların birleştirilmelerinde problem oluşturacağı gibi, geri yaylanmadaki varyasyonlar da problemlere neden olur. Geri yaylanmadaki varyasyonların temel nedeni, sac kalınlığı, malzeme özellikleri, sürtünme katsayısı ve benzeri parametrelerdeki varyasyonlardır.

Üçüncü aşamada, geri yaylanma varyasyonunun hassasiyet analizi gerçekleştirilir. Vekil modeller oluşturulduktan ve doğruluk derecesi onaylandıktan sonra, geri yaylanmaların hangi üretim süreci değişkenleri ve belirsiz parametrelere daha hassas olduğu belirlenir. Böylece ilk aşamada dikkate alınan tüm parametrelerin içinden geri yaylanmaya en çok etki edenleri tespit edilerek parametre sayısında azalma sağlanır.

Dördüncü aşamada ise hassasiyet analizinden sonra belirlenen en etkili belirsiz parametrelerin *parçadan-parçaya*, *parti içi* veya *partiden-partiye* gibi durumlar için değişiklikleri göz önüne alınarak bahsi geçen durumlar için varyasyon hesabı yapılır. Örneğin, malzeme özellikleri (akma gerilmesi, pekleşme katsayısı, pekleşme üsteli, vb.) üreticilerin sahip olduğu farklı üretim standartlarından ötürü *parçadan-parçaya*, *parti içi* ve *partiden-partiye* varyasyonlara sahip olmaktadır. *Partiden-partiye* varyasyonların modellenmesi zor olduğundan şimdiye değin ihmal edilmiştir. Bu

çalışma ile *partiden-partiye* varyasyonların modellenmesi için çift döngülü bir Monte Carlo benzetim modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile malzeme özelliklerinin *parçadan-parçaya* gösterdiği varyasyonlar iç döngüde modellenirken, *partiden-partiye* varyasyonlar dış döngü içerisinde modellenmiştir. Böylece *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonları hesaplanabilmiştir.

Vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesinin son aşaması olarak hem geri yaylanmaların hem de geri yaylanma varyasyonlarının azaltılması, üretim süreci değişkenlerinin optimum değerlerinin belirleneceği bir gürbüz optimizasyon çerçevesi dâhilinde gerçekleştirilir. Öncelikle, geri yaylanma hassasiyet analizi ve geri yaylanma varyasyon analizlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, üretim süreci değişkenleri ve belirsiz parametrelerinin hangilerinin optimizasyonda kullanılacağı belirlenir. Geri yaylanmaya ve geri yaylanma varyasyonuna etkisi ihmal edilebilecek seviyedeki bazı üretim süreci değişkenleri ve belirsizlik parametreleri optimizasyon probleminin boyutlarını azaltmak amacıyla kapsam dışında bırakılır. Sonra, optimizasyon probleminin amaç fonksiyonları ve kısıtları tanımlanır. Bu çalışmadaki problemler için, amaç fonksiyonları ortalama geri yaylanma ve geri yaylanma varyasyonudur ve hedef, bu değerlerin en küçüklenmesidir. Kısıtlar ise, üretim süreci parametrelerinin alt ve üst sınırları ile eşitsizlik kısıtlarıdır. Son olarak da uygun bir optimizasyon algoritması kullanılarak, tanımlanan gürbüz optimizasyon problemi çözülür.

## **1.2. Çalışmanın Amacı**

Bu çalışmanın üç temel amacı bulunmaktadır: (1) Malzeme özelliklerinin *partiden-partiye* ve *parçadan-parçaya* olan varyasyonlarını çift döngülü bir Monte Carlo benzetimi aracılığıyla modelleyerek geri yaylanmanın ortalama değerini ve varyasyonunu hesaplayabilmek. (2) Geri yaylanmayı ve varyasyonunu en fazla etkileyen şekil verme süreci parametrelerini ve süreçteki belirsizlik parametrelerini tayin etmek. (3) Geri yaylanmanın ve geri yaylanma varyasyonlarının asgari

seviyeye düşürülmesi için, şekil verme süreci parametrelerinin optimum değerlerini belirlemek.

### **1.3. Çalışmanın Literatüre Katkıları**

Geri yaylanmanın şekil verme parametreleri cinsinden ifade edilmesi amacıyla, polinom yanıt yüzey, kademeli polinom regresyon, radyal tabanlı fonksiyonlar ve Kriging vekil model yöntemleri kullanılarak U-büküm ve 7-flanşlı büküm için geri yaylanma tahmini gerçekleştirilmiş ve bu tahmini en iyi yapan vekil model tipleri belirlenmiştir. Şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalarda ihmal edilen malzeme özelliklerindeki partiden partiye varyasyonların modellenmesi için çift döngülü bir Monte Carlo benzetim modeli geliştirilmiştir. Hem geri yaylanma hem de geri yaylanma varyasyonlarını minimize etmek üzere bir gürbüz tasarım çerçevesi oluşturulmuştur. Ayrıca literatürdeki çalışmalardan farklı olarak çoklu vekil model kullanımı ile geri yaylanma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

### **1.4. Tezin İçeriği**

Bu çalışmanın ikinci bölümü geri yaylanma analizine, vekil model yöntemlerine, geri yaylanmanın deterministik ve gürbüz eniyilenmesine yönelik çalışmaları kapsayan bir literatür taramasını içermektedir. Üçüncü bölümde ise çift fazlı çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın gürbüz eniyilemesini gerçekleştirebilmek için izlenen yöntem açıklanmıştır. Bu bölümde Taguchi yöntemi, gürbüz optimizasyon ve bu tez çalışması kapsamında oluşturulan çift döngülü Monte Carlo benzetim modeli anlatılmıştır. Dördüncü, beşinci ve altıncı bölümlerde U-büküm ve 7-flanşlı büküm problemleri için problem tanımları yapılmış, vekil modeller ile optimizasyon problemi çözümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak yedinci bölümde tartışma, sonuçlar ve ileriye yönelik çalışmalardan bahsedilmiştir.

## **2. LİTERATÜR TARAMASI**

Literatürde geri yaylanmanın hesaplanması, doğru tahmini ve optimizasyonu üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bölüm 2.1’de analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen geri yaylanma hesaplamalarını kapsayan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 2.2’de geri yaylanma tahmini yapabilmek için oluşturulan vekil modeller hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 2.3 ve 2.4’te sırasıyla, geri yaylanmanın deterministik ve gürbüz optimizasyonuna yönelik çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

### **2.1. Geri Yaylanma Analizi**

Geri yaylanmayı hesaplayabilmek için yapılan çalışmalar iki başlık altında incelenebilir: (i) analitik çalışmalar ve (ii) sonlu elemanlar yöntemi.

#### **2.1.1. Analitik çalışmalar**

Basit geometriye sahip (U-büküm gibi) problemlerin çözümü için analitik yöntemler sağladıkları hesaplama süresi avantajından ve gürbüz optimizasyon çalışmasına kolay uygulanabilmelerinden dolayı tercih edilirler. Analitik yöntemler ile zamandan kazanım sağlanabilmesine rağmen, bu yöntemlerin çıkarımları için karmaşık matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Zhang vd. [1] geliştirdikleri analitik modeli, Numisheet93 konferansında verilen U-büküm problemine uygulamışlardır. Önerilen analitik model, U-büküm sonucu sacda meydana gelen geri yaylanmayı hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Bu model, Hill48 akma kriteri [2] ve düzlemsel gerilim durumunu temel almaktadır. Ayrıca sacdaki incelmeyin, sac kalınlığının, pekleşme katsayısının, sac tutucu kuvvetinin, sürtünme katsayısının ve anizotropi değerinin etkilerini de dikkate almaktadır. Diğer bir analitik model Behrouzi vd. [3] tarafından asimetric büküm işlemi için geliştirilmiştir. Geri yaylanmadaki hatayı telafi etmek ve kalıp tasarımı yapmak için hedef formu dikkate alarak ters algoritma kullanmışlardır. Geleneksel analitik modellerden farklı olarak Yi vd. [4] geri yaylanmanın hesabında, altı farklı deformasyon bölgesi için artık diferansiyel gerinimi temel alarak analitik denklemler geliştirmişlerdir. Daha

karmaşık problemlerin çözümü için analitik yöntemler yetersiz kalmakta ve hesaplanması çok zor matematiksel denklemler ortaya çıkmaktadır. Bu tip matematiksel hesaplamaların üstesinden gelebilmek için uygun bir yaklaşımla sayısal olarak çözüm yapan “sonlu elemanlar yöntemi” kullanılmaktadır.

### **2.1.2. Sonlu elemanlar yöntemi**

Sonlu elemanlar yöntemi geri yaylanma hesaplamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, kısmi diferansiyel denklemlere ve bunun yanı sıra integral denklemlerine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan sayısal bir tekniktir. Geri yaylanma problemi birçok fiziksel ve matematiksel parametrenin fonksiyonu olarak ifade edildiğinden bu problemin çözümü için gerçekleştirilecek sonlu elemanlar analizi (SEA), bahsedilen parametreleri dikkatle göz önüne alır. Lin vd. [5] geri yaylanma hesabını etkileyen parametreleri açığa kavuşturmak amacıyla yaptıkları bir çalışmada geri yaylanma benzetimini etkileyen sayısal parametreler olarak çözüm yaklaşımını, dinamik etkileri, kalıbın köşe elemanlarının sayısını ve şekil verilecek parça üzerindeki eleman boyutlarını belirlemiştir. Shi vd. [6] geri yaylanma benzetiminin akma kriterine, anizotropi değerine ve şekil değiştirme hızına karşı oldukça hassas olduğunu göstermişlerdir. Eğer mümkünse gerilme-gerinim eğrisini  $K$  (pekleşme katsayısı) ve  $n$  (pekleşme üsteli) parametreleri ile tanımlamak yerine, eksiksiz bir gerilme-gerinim verisinin kullanılmasını önermişlerdir. Hu vd. [7] haddeleme yönü ve tersi boyunca farklı sürtünme katsayılarının ayrıca düz ve kavisli işlenmiş yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı değişimlerinin geri yaylanma analizi sonuçları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Papeleux ve Ponthot [8] geri yaylanmanın sonlu elemanlar analizinin kalınlık boyunca entegrasyon noktası sayısına, eleman tipine, ağ boyutuna, temas algoritmasına, kalıp omuzu üzerindeki her bir elemanın temas açısına ve muhtemel atalet etkileri gibi sayısal parametrelere karşı çok hassas olduğunu göstermişlerdir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile geri yaylanma hesabı oldukça zaman alıcıdır. Finn vd. [9] yaptıkları çalışmada, açık yöntemle yapılan analizlerin kapalı yöntemle yapılanlara oranla çok daha uzun sürdüğünü aynı zamanda da kapalı yöntemlerin

yüksek işlemci ve hafıza kapasitesine ihtiyaç duyduğunu belirtmişlerdir. Otomobil gövde paneli için gerçekleştirdikleri açık yöntemli sonlu elemanlar analizi ile geri yaylanma hesabını 135 işlemci saati kadar bir sürede sonuçlanmışır. Narasimhan ve Lovell [10] preslenerek üretilen bir otomobil parçası için açık ve kapalı yöntemleri birleştiren bir sonlu elemanlar analizi yöntemiyle, hem doğru bir geri yaylanma hesabı sağlamışlar hem de hesaplama süresini azaltmışlardır. Fakat yine de hesaplama için geçen süreler sonlu elemanlar yönteminin geri yaylanmanın gürbüz optimizasyonunda direkt olarak kullanılmasını engellemektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemine göre çok daha kısa sürelerde sonuç veren vekil model yöntemleri fazla sayıda analiz gerektiren optimizasyon çalışmaları için tercih edilmektedir.

## **2.2. Vekil Modeller**

Vekil modeller, bir problemin girdileri ve çıktıları arasında matematiksel bir bağıntı oluşturmayı sağlarlar. Bu matematiksel modeller duyarlılık analizi, tasarım ve optimizasyon gibi çok fazla sayıda analiz gerektiren mühendislik uygulamalarının hesaplama sürelerinin kısaltılmasını sağlarlar. Bu matematiksel ilişkinin belirlenmesi için öncelikle belirli girdi kombinasyonlarına karşılık gelen çeşitli tasarım noktaları oluşturulmalı ve bu tasarım noktalarında analizler yapılmalıdır. İlk olarak, deneysel tasarım yöntemleri (Design of experiment, DoE) ile tasarım noktaları belirlenirler ve sonra her bir tasarım noktası için gerekli analizler yapılarak yanıt değerleri hesaplanır. En son aşama olarak, tasarım noktaları ve bu noktalar için elde edilen yanıtlar kullanılarak, girdiler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi betimleyen bir matematiksel model oluşturulur. Bu matematiksel model bir kez oluşturulduktan sonra, girdilerin herhangi bir kombinasyonu için çok hızlı ve basit bir şekilde yanıt tahmini yapılabilir. Deneysel tasarım yöntemleri ve geri yaylanma tahmini için en sık kullanılan vekil modeller hakkında yapılan çalışmalar takip eden bölümlerde sunulmuştur.

### **2.2.1. Deney tasarımı**

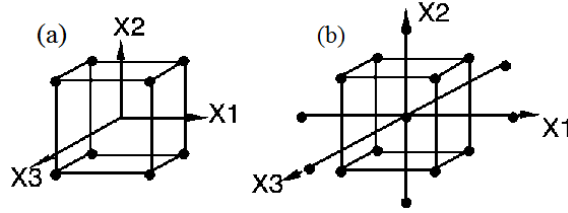
Deney tasarımı tipinin belirlenmesi, vekil model oluşturulmasının ilk aşamasıdır. Deney tasarımı, belli değerlere sahip tasarım değişkenleri aracılığıyla ifade edilen ve bir dizi halinde gerçekleştirilecek deneyleri ifade eder [11]. Bir deney tasarımı, satırları deney numaralarını sütunları ise belli değerlere sahip parametreleri ifade eden bir  $X$  matrisi ile gösterilir [11]. Bahsedilen deneyler fiziksel deneylerle sınırlı değildir ve çoğunlukla sayısal deneyler (sonlu elemanlar analizi) yapılmaktadır. Esas olarak fiziksel deneyler için geliştirilen deney tasarımı teknikleri, bilgisayarlarda yapılacak deneylerin tasarımlarına da uygulanabilmektedir. Simpson vd. [11] yaptıkları kapsamlı çalışmada uygun şekilde tasarlanan sayısal deneylerin bilgisayarlardan etkin bir biçimde faydalanılması açısından büyük önem arz ettiğini belirtmişlerdir. Wang ve Shan [12]'a göre deney tasarımları iki kategoride incelenebilir: (i) klasik tasarımlar ve (ii) uzay doldurma (space filling) tasarımları.

#### **2.2.1.1. Klasik tasarımlar**

Klasik deney tasarımları, fiziksel deneylerin yapıldığı zamanlarda deney tasarımı teorisinden faydalanılması sonucunda ortaya çıkmıştır [12]. En çok tercih edilen klasik deney tasarımları; çok etmenli (factorial design) veya kesirli çok etmenli tasarım (fractional factorial design) [13], merkezî karma tasarım (central composite design) [13], Box-Behnken tasarımı [14] ve Plackett-Burman [15] tasarımlarıdır. Şekil 2.1'de üç tasarım değişkeni olan bir problem için çok etmenli ve merkezî karma tasarım yöntemleri ile oluşturulan deney tasarımları gösterilmektedir. Klasik yöntemler, tasarım uzayının sınır bölgelerine yakın yerlerde örnekleme noktası oluşturmaya eğilimlidirler. Bu yöntemlerde, tasarım uzayının merkezinde çok az sayıda örnekleme noktası bulunur. Klasik tasarımlar hakkında daha kapsamlı bilgiler için Myers ve Montgomery'nin [13] kitabına başvurulabilir. Bilgisayar ortamında yapılan deneyler fiziksel olarak yapılanlara kıyasla rastsal hatadan çok sistematik hatalar içerirler [12]. Sacks vd. [16], rastsal hata yerine sistematik hatanın görüldüğü durumlarda, iyi bir deneysel tasarımın, tasarım uzayının sınır bölgelerinden çok



tasarım uzayını doldurma eğiliminde olması gerektiğini çünkü modellenen sistem hakkında en çok bilginin bu sayede elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

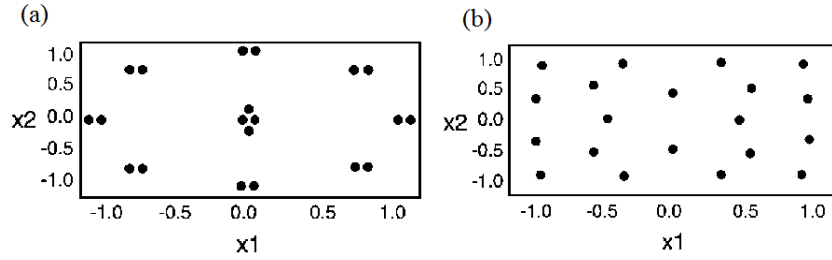


Şekil 2.1. Üç değişkenli klasik tasarımlar. (a) çok etmenli tasarım; (b) merkezi karma tasarım. [11]

#### 2.2.1.2. Uzay doldurma tasarımlar

Simpson vd.'nin [11] çalışmasında kapsamlı olarak incelenen örnekleme yöntemleri için bahsedildiği üzere; deterministik bilgisayar analizleri için örnekleme noktası oluştururken tasarım uzayının tüm bölgelerini eşit olarak değerlendiren uzay doldurma tasarımları birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir [11,17]. Jin vd. [18] kullanılan vekil model tipine göre örnekleme yöntemi seçiminin etkilerini incelemişler ve büyük boyutlu problemler için uzay doldurma tasarım yöntemlerinin daha uygun olduğunu belirlemişlerdir. Simpson vd. [19] tasarımın ilk aşamalarında, daha vekil model oluşturulmadan önce, uzay doldurma tasarım yöntemlerinin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Simpson vd. [20] klasik tasarımlarda ve fiziksel deneylerin analizinde (örneğin, merkezi karma tasarım ve çok etmenli tasarım kullanarak) rastsal varyasyonun, örnekleme noktalarını tasarım uzayının uç noktalarına yayarak ve benzer veri noktaları oluşturarak (tekrarlama şeklinde) elde edildiğini belirtmiştir (Şekil 2.2. (a)). Sacks vd. [16] bu şekilde varyasyon oluşturmanın deterministik bilgisayar analizleri için uygun olmayacağını ve bilgisayar ortamında yapılacak deney ve tasarımlar için örnekleme noktalarının tasarım uzayını dolduracak şekilde oluşturulması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bunun

yanında optimum bütünleştirilmiş hata karesine (integrated mean square error, IMSE) sahip tasarımlar kullanarak bahsedilen hata miktarının tasarım bölgesi boyunca minimize edilmesini önermişlerdir. Şekil 2.2. (b)'de görülen uzay doldurma tasarımı optimum bütünleştirilmiş ortalama hata karesine sahip bir tasarımdır.



Koch [21], merkezî karma tasarım ve yüzey merkezli karma tasarım yöntemlerini birleştirerek tasarım uzayında daha düzgün bir örnekleme noktası sağlayan geliştirilmiş bir merkezî karma tasarımı incelemiştir. Kohler ve Owen [22], maksimum entropi tasarımını [23], ortalama hata karesi tasarımlarını, minimax ve maximin tasarımlarını [24], Latin hiperküp (Latin hypercube) tasarımlarını [25] ve dikey sıralar (orthogonal arrays) [26] deneysel tasarımlarını kapsayan bir çalışma ile uzay doldurma tasarımlarını incelemiştir. Currin vd. [23] maksimum entropi prensibini kullanarak bilgisayar deneyleri için tasarımlar gerçekleştirmişlerdir. Tang [27], bilgisayar ortamındaki analizler için dikey sıralar temelli Latin hiperküp yönteminin geleneksel Latin hiperküp yöntemlerinden daha uygun olduğunu belirtmiştir. Park [25] bilgisayarda yapılacak deneyler için ya bütünleştirilmiş ortalama hata karesini minimuma indiren ya da entropiyi maksimuma çıkaran optimum Latin hiperküp tasarımlarını ele almıştır. Owen [28], dikey sıralar yöntemi kullanılarak yapılan tasarımların bilgisayar ortamındaki deneyler için uygun olduğunu savunmuştur. Lineer ve lineer olmayan regresyon modelleri için Bayesci

deneysel tasarımları inceleyen bir çalışma Chaloner ve Verdinelle [29] tarafından gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2 Çalışmada kullanılan modeller

Günümüze değin birçok vekil model oluşturma tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikler içerisinde en çok tercih edilenler şunlardır; polinom yanıt yüzey [13], radyal tabanlı fonksiyonlar [30-31], Gauss prosesi [32-33], sinir ağları [34], destek vektör regresyonu [35-36] ve Kriging [16,37]. Geri yaylanma problemi için en sık kullanılan vekil model tipi polinom yanıt yüzeyidir [38-41]. Kullanılan diğer vekil model tipleri arasında Kriging [42] ve yapay sinir ağları [43] da bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan vekil model tipleri; (i) polinom yanıt yüzey, (ii) kademeli polinom regresyon, (iii) radyal tabanlı fonksiyonlar ve (iv) Kriging'dir.

#### 2.2.2.1. Polinom yanıt yüzey (PYY)

Kullanılan değişken sayısına bağlı olarak ( $x_i, i=1...L$ ) PYY modelleri istenilen şekilde uyarlanabilir. En sık kullanılan PYY modeli ikinci derece polinomdur ve şu şekilde ifade edilebilir [13]:

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^L b_i x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L b_{ij} x_i x_j . \quad (2.1)$$

Burada  $\hat{y}$ , asıl yanıt fonksiyonu olan  $y$  ile yaklaşık olarak aynı yanıtı veren fonksiyondur.  $L$  kullanılan değişken sayısını,  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$  ve  $b_{ij}$  de en küçük kareler yöntemi ile belirlenecek olan bilinmeyen katsayıları göstermektedir. Marretta vd. [38] hafif alüminyum alaşımlarının şekil verme sürecinde ortaya çıkan geri yaylanma ve sac incelleme değerlerini kontrol edebilmek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada girdi ve çıktılar arasındaki matematiksel bağıntıyı PYY yöntemi kullanarak oluşturmuşlardır. Firat vd. [39] U-büküm problemi için sac tutucu kuvveti ve sürtünme katsayısını geri yaylanmaya etki eden parametreler olarak dikkate alarak polinom yanıt yüzeyler oluşturmuşlar ve geri yaylanma tahmini gerçekleştirmişlerdir. Jansson vd. [40] yaptıkları çalışmada PYY yöntemini kullanarak otomotiv

sanayisinde kullanılan bir sac metal parça için optimum sınırlandırıcı kuvveti sağlayan çekme boncuğu tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Naceur vd. [41] alüminyumdan üretilmiş sac parçalar için yaptıkları çalışmada ikinci dereceden polinom yanıt yüzeyler kullanarak derin çekme işleminden sonraki sac incelleme değerinin tahminini gerçekleştirmişler ve optimum sac incelleme değerini belirlemişlerdir.

#### **2.2.2.2. Kademeli polinom regresyon (KPR)**

Kademeli polinom regresyon, regresyon modeli içinde kullanılacak değişkenlerin otomatik olarak seçildiği bir çoklu regresyon yöntemidir. Ardışık olarak yapılan kısmi *F-sınamaları* ile regresyon modeli içinde yer alacak değişkenler belirlenir. Bunun dışında *t-sınaması*, *ayarlanmış-R<sup>2</sup>* vb. teknikler kullanılarak da değişken seçimi gerçekleştirilebilir.

Kademeli polinom regresyonu yönteminde iki farklı yaklaşım kullanılabilir. Bunlar;

- İleriye doğru seçim; bu yaklaşım regresyon modeli içinde hiçbir değişken olmadan başlar ve her bir değişken teker teker denenerek eğer istatistiksel olarak önem teşkil ediyorsa regresyon modeline eklenir.
- Geriye doğru eleme; bu yaklaşım regresyon modeli içinde yer alabilecek tüm değişkenler ile başlar ve her bir değişken istatistiksel önemleri için test edilir. Önem arz etmeyen değişkenler regresyon modeline katılmaz.

Kademeli polinom regresyonunda genellikle ileriye doğru seçim yöntemini içeren algoritmalar ile modeller oluşturulur. Regresyon modeli oluşturulurken her bir aşamada, yeni bir değişken eklendikten sonra, modelden çıkarıldığında artık kareler toplamının (residual sum of squares) belirgin ölçüde artmasına sebep olmayacak değişkenler belirlenir. Belirlenen bu değişkenler modelden çıkarılır. Regresyon modelinde sağlanabilecek mevcut iyileştirme belirli bir kritik değer altına düşene kadar bu süreç devam eder.

### 2.2.2.3. Radyal tabanlı fonksiyonlar (RTF)

Radyal tabanlı fonksiyonların öncelikli uygulama amacı çok değişkenli dağımık veriler için çok değişkenli fonksiyonlar elde etmektir [30]. Bir radyal tabanlı fonksiyon ile yapılan tahmin şu şekilde gösterilebilir;

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad (2.2)$$

Burada  $\lambda_i$  interpolasyon katsayılarını,  $n$  örnekleme noktası sayısını ve  $\varphi$  fonksiyonu da  $i$ . örnekleme noktasından elde edilen Öklid normundaki  $\|x - x_i\|$  radyal tabanlı fonksiyonu ifade etmektedir. Öklid normu ( $r$ ),

$$r = \|x - x_i\| = \sqrt{(x - x_i)^T (x - x_i)} \quad (2.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır ve tasarım noktası  $x$ 'in örnekleme noktasından veya merkez  $x_i$  noktasından olan radyal mesafesini ( $r$ ) göstermektedir. Bilinmeyen interpolasyon katsayıları ( $\lambda_i$ ) artık hataların ( $R$ ) minimizasyonu gerçekleştirilerek aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$R = \sum_{k=1}^n \left[ y(x_k) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(\|x_k - x_i\|) \right]^2. \quad (2.4)$$

Genelde kullanılan RTF modelleri ince-levha yivi (thin-plate-spline), Gauss (Gaussian) ve çok değişkenli ikinci dereceden (multi-quadric) denklemdir. Bunların içinde en çok kullanılan RTF formülasyonu, çok değişkenli ikinci dereceden denklemdir (2.5).

$$\varphi(r) = \sqrt{r^2 + c^2} \quad (2.5)$$

Bu yöntemde  $c$  değişkeni sabit bir sayı olarak kabul edilmektedir. Tüm örnekleme noktaları 0 ila 1 arasında normalize edildiğinde görülmüştür ki,  $c$ 'yi 1'e eşit almak

birçok problem türü için yeterli olmaktadır [44]. Bu tez çalışması kapsamında çok değişkenli ikinci dereceden denklem yöntemi kullanılmış ve  $c=1$  olarak alınmıştır.

Wang vd. [44] yirmi adet test problemi için beş adet performans ölçütüne göre vekil model yöntemlerini kıyaslamışlar ve RTF yönteminin en iyi sonucu verdiğini gözlemlemişlerdir. Jin vd. [18] farklı problem tiplerini inceleyen on dört adet test problemini kullanarak PYY, RTF ve Kriging yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada RTF yöntemini hassasiyet ve gürbüzlük açısından birçok durum için en güvenilir yöntem olarak ifade etmişlerdir. Mullur vd. [31] geliştirdikleri “genişletilmiş-radyal tabanlı fonksiyonlar” yöntemini çeşitli mühendislik problemlerine uygulamışlar ve elde ettikleri sonuçlara dayanarak bu yöntemin büyük ölçekli problemlerin çözümünde verimli olabileceğini belirtmişlerdir. Acar vd. [45] RTF yöntemi ile maksimum özgül enerji emilimine sahip ince çepirli konik enerji yutucu elemanların tasarımını gerçekleştirmişlerdir.

#### 2.2.2.4. Kriging (KR)

Temel olarak Kriging modeli, kullanılan verilerin eğilimini ve olasılıksal dağılımlarını birleştiren bir yöntemdir.

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x) + Z(x). \quad (2.6)$$

Burada eğilim modeli yanıtı genel olarak tahmin eder, olasılıksal bileşen olan  $Z(x)$  ise ortalamayı 0 kabul eder ve kovaryans değerini Denklem (2.7)'de gösterilen şekilde kullanarak sapmaları hesaplar.

$$COV[Z(x_i), Z(x_j)] = \sigma^2 \mathbf{R}[R(x_i, x_j)]. \quad (2.7)$$

Bu denklemde  $\sigma^2$  varyasyonu ve  $\mathbf{R}$  de  $N$  adet örnekleme noktasından oluşturulan  $N \times N$  korelasyon matrisini ifade etmektedir.  $R(x_i, x_j)$  iki örnekleme noktası  $x_i$  ve  $x_j$  arasındaki korelasyon fonksiyonudur. Bu tez çalışması kapsamında, eğilim modeli sabit bir sayı ve korelasyon modeli de Simpson vd. [46] tarafından da önerildiği şekilde Gauss olarak seçilmiştir. Ayrıca Kriging modeli hesaplamaları için Lophaven

vd. [37] tarafından geliştirilen MATLAB<sup>®</sup> Kriging araç kutusu kullanılmıştır. Strano [42] yaptığı çalışmada U-büküm problemi için optimum geri yaylanma tahmini amacıyla Kriging modelini kullanmıştır. Elde ettiği geri yaylanma ve hasar olasılığı değerlerini kıyaslamış ve sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermiştir. Acar vd. [45] eğilim modeli sabit bir sayı olan KR yöntemini kullanarak maksimum ezilme kuvveti verimine sahip konik enerji yutucu elemanların tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Stander vd. [47] gerçekleştirdikleri çarpmaya karşı dayanıklılık optimizasyonu çalışmasında KR vekil modelini kullanmışlardır. KR yöntemi kullanıldığı zaman tüm tasarım uzayının başlangıç değeri olarak seçilmesi gerektiğini belirtmişler ve başlangıç aralığı tasarım uzayından küçük olduğu zaman ortaya ekstrapolasyon hatalarının çıkabileceğini ifade etmişlerdir.

### 2.2.3. Vekil modellerin doğruluğunun belirlenmesi

Oluşturulan vekil modellerin tahmin ettiği sonuçların ne kadar doğru olduğunu belirleyebilmek için bazı hata ölçütleri kullanılır. Bunlar, (i) karekök ortalama hata karesi (KOHK), (ii) belirleme katsayısı ( $R^2$ ), (iii) ortalama mutlak hata (OMH), (iv) maksimum mutlak hata (MMH), (v) bağıl ortalama mutlak hata (BOMH) ve (vi) bağıl maksimum mutlak hata (BMMH) olarak adlandırılan hata ölçütleridir.

$V$  uzayındaki  $D$  tanım kümesine ait gerçek karekök ortalama hata karesi şu şekilde ifade edilir [48];

$$KOHK_{gerçek} = \sqrt{\frac{1}{V} \int_D (\hat{y}(x) - y(x))^2 dx}. \quad (2.8)$$

Burada  $y(x)$  yanıt modelini,  $\hat{y}(x)$  ise bu yanıt modeline ait vekil modeli ifade etmektedir. Denklem (2.8)'deki integral,  $N$  adet örnekleme noktasında sayısal entegrasyon uygulanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [48,49]:

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (2.9)$$

Burada  $\hat{y}_i$ ,  $y_i$  değerine karşılık gelen  $i$ . örnekleme noktasındaki tahmin değerini belirtir. Düşük KOHK değeri, vekil modelin yanıt modele olan uyumunun yüksek olduğunu belirtir.

Bir diğer hata ölçütü olan  $R^2$  yanıt değerleri ile tahmin değerleri arasındaki korelasyonun karesidir. Vekil modelin doğruluğunu, veri seti içindeki varyasyonu dikkate alarak şu şekilde hesaplar [18,50]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{OHK}{Varyans}. \quad (2.10)$$

Burada  $\bar{y}$ , elde edilen  $y_i$  değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. OHK (ortalama hata karesi), vekil modelin gerçek benzetim modelinden sapmalarını, varyans ise problemin ne ölçüde düzensizliğe sahip olduğunu belirtir.  $R^2$  değeri vekil modelin doğruluğu hakkında genel olarak bilgi verir. Yüksek  $R^2$  değeri, vekil modelin doğruluğunun yüksek olduğunu gösterir.

İstatistikte OMH, yanıt değerleri ile tahmin değerlerinin birbirlerine ne kadar yakın olduklarını belirlemek amacıyla kullanılır. OMH şu şekilde ifade edilir:

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|. \quad (2.11)$$

MMH ise yanıt değeri ile tahmin değerleri arasındaki en büyük hata miktarını hesaplar.

$$MMH = maks(y_i - \hat{y}_i). \quad (2.12)$$

Bağlı hata, tahmin değeri ile yanıt değeri arasındaki hata miktarının yanıt değerine oranıdır. Bir başka deyişle deneysel sapmanın kesin değere oranı bağlı hata olarak adlandırılır. BOMH ve BMMH olmak üzere iki şekilde hesaplanabilir:



$$BOMH = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N * STD} \quad (2.13)$$

Burada STD standart sapma değerini ifade etmektedir. Standart sapma;

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanır.

Bir vekil modelin yüksek  $R^2$  değerine sahip olması bölgesel olarak da yüksek doğruluk miktarına sahip olduğunu ifade etmez. Dolayısıyla bölgesel hata miktarlarını belirleyebilmek için BMMH değeri hesaplanır [50];

$$BMMH = \frac{\max\{|y_1 - \hat{y}_1|, |y_2 - \hat{y}_2|, \dots, |y_n - \hat{y}_n|\}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.15)$$

Bu bölümde bahsedilen hata ölçütleri aracılığıyla RTF ve KR vekil modelleri için örnekleme noktaları kullanılarak hata hesaplaması yapıldığında elde edilen sonuç sıfır olacaktır. Bu modeller, tüm örnekleme noktalarından geçen düzgün bir enterpolasyon yüzeyinin elde edilmesini sağlarlar [44]. Dolayısıyla hata hesabı için ek örnekleme (test) noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Test noktası kullanımının hesaplama maliyetlerini arttırdığı durumlarda ise çapraz doğrulama yöntemleri ile sadece örnekleme noktalarındaki veri ile hata hesabı yapılır [49].

### 2.2.3.1 Veri noktalarında çapraz doğrulama

Çapraz doğrulama hata ölçeği kullanılarak da bahsi geçen vekil modellerin doğrulukları belirlenebilir ve en düşük çapraz doğrulama hatasına sahip vekil model seçimi için kullanılabilir. Meckesheimer vd. [51] çapraz doğrulama hatasını şu şekilde ifade eder: “Basit çapraz doğrulama yaklaşımına,  $N$  adet girdi çıktı çiftini  $(x_i - y_i)$  içeren,  $i = 1 \dots N$ , bir  $S\{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\}$  veri seti ile başlanılır. Burada  $y_i$ ,  $x_i$

örnekleme noktasındaki yanıt değerini ve  $N$  de örnekleme adedini belirtir. İlk aşamada, veri seti rastgele hale getirilir ve iki kısma ayrılır. Örneğin, boyutu  $n^1$  olan  $S^1\{\mathbf{X}^1, \mathbf{Y}^1\}$  gibi bir ilk kısım vekil model oluşturmak için kullanılırken, boyutu  $n^2$  olan  $S^2\{\mathbf{X}^2, \mathbf{Y}^2\}$  gibi bir ikinci kısım muhtemel çapraz doğrulama hatasını hesaplamak için kullanılır. Bu, hesaba katılmayan tasarım noktalarındaki  $(x^2)$  vekil model tahminleri  $(\hat{y}^2)$  ile gerçek değerler  $(y^2)$  arasındaki farktır. Bir sonraki aşamada ise veri setleri değiştirilerek vekil model oluşturulur ve vekil modelin kullanılan yeni veri setini ne kadar iyi tahmin ettiği belirlenir. Eldeki verilerin her zaman iki kısma ayrılarak kullanılması gerekmez. Farklı şekillerde veri setini rastgele hale getirmek ve kısımlara ayırmak için Laslett [52] tarafından bahsedilen yöntemlere başvurulabilir.

$p$ -katlı çapraz doğrulama yönteminde ise başlangıçta kullanılan veri seti  $S\{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\} = S^1\{\mathbf{X}^1, \mathbf{Y}^1\}, S^2\{\mathbf{X}^2, \mathbf{Y}^2\}, \dots, S^p\{\mathbf{X}^p, \mathbf{Y}^p\}$  şeklinde  $p$  adet geniş kapsamlı ve birbirinden ayrık alt bölümlere ayrılır. Daha sonra her seferinde alt bölümlerden biri dışarıda bırakılarak  $p$  kez vekil model oluşturulur ve hesaba katılmayan veri seti kullanılarak da çapraz doğrulama hatası hesaplanır.

$p$ -katlı çapraz doğrulamanın bir türü de  $k$  adet veriyi dışarıda bırakan yaklaşımdır.  $N$  adet verinin  $k$ 'lı kombinasyonu kadar veri dışarıda bırakılır ve vekil model kalan veriler kullanılarak oluşturulur. Her seferinde hesaba katılmayan noktalarda çapraz doğrulama hatası hesaplanır. Bu yaklaşım, hesaplama maliyeti yüksek bir  $p$ -katlı çapraz doğrulama türüdür. Mitchell ve Morris [53] özel bir durum olan  $k=1$  için çapraz doğrulama hatasının nasıl hesaplama yükü oluşturmadan elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Doğrusal regresyon ile oluşturulan vekil modeller için  $k=1$  olduğu durumda çapraz doğrulama hatası (aynı zamanda tahmin hatalarının kareleri toplamı (prediction error sum of squares, PRESS) olarak da bilinir.), şapka matrisi ( $\mathbf{H}$ ) kullanılarak  $N$  adet örnekleme noktasına uygulanacak bir en küçük kareler yöntemi ile kolaylıkla hesaplanabilir (Daha detaylı bilgi için bkz. [13]).”

$k = 1$  için çapraz doğrulama hatası şu şekilde hesaplanabilir; herhangi bir vekil model türü  $N-1$  tane örnekleme noktası kullanılarak  $N$  kez oluşturulur. Her seferinde bir örnekleme noktası, kullanılan modelin doğruluğunu test edebilmek için diğer örnekleme noktalarının içinden ayrılır. Daha sonra, çapraz doğrulama hatasının istenilen hata ölçütü değerleri Bölüm 2.2.3'te belirtildiği üzere hesaplanabilir. Bu noktada şuna dikkat edilmelidir ki, artık Denklem (2.9-2.14)'teki  $y_i$ , alıkoyulan örnekleme noktası olan  $x_i$ 'de hesaplanmış yanıt değerini,  $\hat{y}_i$  ise vekil model kullanılarak hesaplanan tahmini yanıt değerini ifade etmektedir.

Goel vd. [54] polinom yanıt yüzeyler için çapraz doğrulama hatasının asıl KOHK değerinden daha düşük bir değer gösterdiğini aynı zamanda KR ve RTF için ise asıl KOHK değerinden daha yüksek bir değer tahmin ettiğini belirtmişlerdir. Acar ve Rais-Rohani [55] çapraz doğrulama hatasını kullanarak bir vekil model bütünündeki bireysel vekil modellerin ağırlık katsayı seçimini ele almışlar ve optimizasyon aracılığıyla çapraz doğrulama hatasını en aza indirgeyen ağırlık katsayılarını belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca ağırlık katsayılarının çapraz doğrulama hatası yanında az sayıda doğrulama noktasındaki hata değerleri ile seçilmesi üzerine de araştırma yapmışlardır. Simpson [17]  $k = 1$  alınarak gerçekleştirilen hata hesaplama yönteminin vekil modelin doğruluğu hakkında iyi bir değerlendirme sağlamadığını, bu yüzden ek doğrulama noktalarına ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

### **2.2.3.2. Test noktalarında doğrulama**

Jin vd. [18] oluşturulan vekil modelin doğruluğunun belirlenmesi için sadece örnekleme noktalarının kullanılmasıyla hesaplanan uyum değerinin yeterli olmayacağını, yeni tahmin noktaları kullanıldığı zaman vekil modelin aynı performansı devam ettirip ettiremeyeceğinin farkına varabilmek için ek veri noktaları kullanarak doğruluğunun onaylanması gerektiğini belirtmişlerdir. Doğruluk miktarını daha geniş bir açıdan ele almak amacıyla çalışmalarında üç farklı hata ölçüğü kullanmışlardır:  $R^2$ , BOMH ve BMMH. Li [56] de  $k = 1$  için yapılan çapraz doğrulamanın deterministik bilgisayar deneyleri için yetersiz kaldığını ve vekil modelin doğruluğunu test edebilmek için ek tasarım noktalarından gelecek bilgiye

ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Wang vd. [57] farklı boyut ve zorluktaki birçok mühendislik problemi için vekil model oluşturdukları çalışmada, test noktalarında hata miktarını hesaplayarak kullandıkları vekil modellerin doğruluğunu belirlemişlerdir. Ayrıca hesaplanan doğruluk değerinin örnekleme sayısından, veri içindeki gürültüden, problemin büyüklüğünden (değişken sayısı) ve doğrusal olmayışından etkilendiğini ifade etmişlerdir.

### 2.3. Geri Yaylanmanın Deterministik Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar

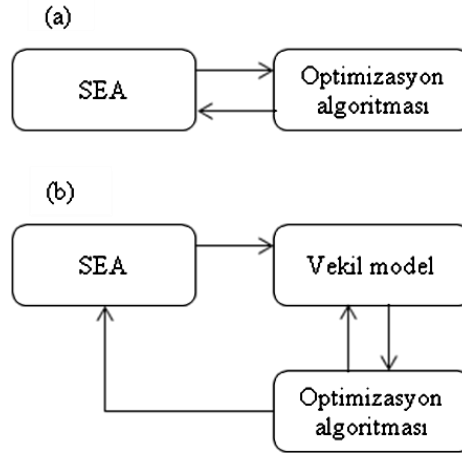
Geri yaylanmanın minimum değere indirgenmesi için optimizasyon teknikleri uygulanmaktadır. Optimizasyonu gerçekleştirebilmek için amaç fonksiyonunun, tasarım değişkenlerinin ve kısıtların belirlenmesi gerekir. Amaç fonksiyonu, optimize ya da diğer bir deyişle maksimize veya minimize edilmek istenen fonksiyondur. Tasarım değişkenleri, tasarımını optimum şekle getirmek isteyen tasarımcının değiştirebileceği değişkenlerdir. Kısıt fonksiyonları ise tasarımın sağlaması gereken limit değerleri belirtir [58].

Du vd. [59] deterministik optimizasyon çerçevesini şu şekilde ifade eder: “Tasarım değişkenleri  $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$  olan ve minimum değere indirgenmek istenen bir  $f(\mathbf{d})$  fonksiyonu olsun. Bu sistemin tasarım kısıtları  $g_i(\mathbf{d}) \leq 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n_g$ ) ve  $h_j(\mathbf{d}) = 0$  ( $j = 1, 2, \dots, n_h$ ) olsun. Burada  $g_i(\mathbf{d})$ , eşitsizlik kısıtlarını,  $h_j(\mathbf{d})$  ise eşitlik kısıtlarını ifade eder. Değişkenlerin belirsizlikleri dikkate alınmadığında, optimum tasarım şu şekilde belirlenebilir:

$$\begin{aligned}
 \underset{\mathbf{d}}{\text{en küçük}} \quad & Z = f(\mathbf{d}) \\
 \text{öyle ki} \quad & g_i(\mathbf{d}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\
 & h_j(\mathbf{d}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\
 & d_k^L \leq d_k \leq d_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Burada  $d_k^L$  ve  $d_k^U$ , sırasıyla  $d_k$ 'nin alabileceği alt ve üst sınır değerleridir.”

Şekil verme sürecini optimize etmenin yollarından biri; optimizasyon döngüsü içerisinde yinelenen her bir hesaplama adımı için doğrudan sonlu elemanlar analizi uygulamak, diğeri ise sonlu elemanlar analizini matematiksel olarak modelleyen ve çok daha hızlı bir biçimde hesaplamaları gerçekleştiren vekil model kullanmaktır [60]. Şekil 2.3.(a)'da görüldüğü üzere direkt optimizasyon yönteminde, optimizasyon algoritması doğrudan sonlu elemanlar analizine bağlıdır. Vekil model tabanlı yöntemde ise belirli sayıda sonlu elemanlar analizi yapıp, bu analiz sonuçlarına göre oluşturulan vekil model, doğrudan optimizasyon algoritması ile ilişkilendirilir (Şekil 2.3.(b)).



Şekil 2. 3. (a) Direkt optimizasyon. (b) Vekil model tabanlı optimizasyon [60].

### 2.3.1. Direkt optimizasyon çalışmaları

Geri yaylanma analizleri gibi lineer olmayan ve zamana bağlı analizler çok zaman aldıklarından, optimizasyon döngüsü içinde direkt olarak kullanıldıklarında hesaplama süreleri çok fazla olabilmektedir. Guo vd. [61] sıralı karesel programlama ile ters yaklaşım yöntemlerinin birleşimine dayanan bir sayısal yöntem aracılığıyla derin çekme işleminde kullanılan sac levha için kalınlık varyasyonunu minimize eden bir şekil optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Chou vd. [62] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak U-büküm için birçok geri yaylanma azaltıcı yöntemi

denemişlerdir. Geri yaylanma ile şekil verme süreci parametreleri arasında sonlu elemanlar benzetimi aracılığıyla bağlantı kurmuşlar ve sonrasında her bir geri yaylanma azaltıcı yöntem için optimizasyon analizini sonlu elemanlar analizi ile birleştirerek optimum süreç parametrelerini elde etmişlerdir. Marretta vd. [38] çalışmalarında S-biçimli U-büküm sürecini incelemişler ve gerçekleştirdikleri deterministik optimizasyon yönteminde sadece sac tutucu kuvvetini tasarım değişkeni olarak belirlemişlerdir. Pareto eğrisi oluşturarak, birbirine zıt olarak değişen sac incelme değerini ve geri yaylamayı en uygun değerde tutan sac tutucu kuvvetini hesaplamışlardır.

### **2.3.2. Vekil model tabanlı optimizasyon çalışmaları**

Uzun süre alan sonlu elemanlar analizleri içerisinde optimizasyon çalışması gerçekleştirmek yerine sonlu elemanlar analizlerinin davranışlarını tahmin eden vekil modellerin optimizasyon sürecinde kullanılması çok daha makul sürelerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ingarao vd. [63] geri yaylanmayı minimuma indirmenin aynı zamanda diğer problemlerle, sac incelmesi gibi, çelişiyor olmasından dolayı çok amaçlı bir problem olduğunu belirtmişler, nümerik benzetimleri, yanıt yüzey yöntemleri ve Pareto eğrilerini birleştirerek geri yaylanmayı incelemişlerdir. Aşırı sac incelmesini ve geri yaylanmadan dolayı oluşan geometrik bozuklukları azaltabilmek için sürtünme katsayısı ve sac tutucu kuvvetini tasarım değişkeni olarak kabul edip optimize etmişlerdir. Naceur vd. [41] şekil verme işleminden sonra ortaya çıkan geri yaylanmayı azaltabilmek amacıyla geliştirdikleri yeni PYY yöntemini kullanarak optimum sac levha kalınlığını, malzeme parametrelerini ( $K, n$ ), zımba ve kalıp yarıçapını belirlemişlerdir. Liew vd. [64] geri yaylanmanın minimize edilmesi için oluşturdukları optimizasyon döngüsünde vekil model olarak yapay sinir ağları yöntemini kullanmışlardır. Oluşturdukları yapay sinir ağları ile metal şekillendirme operasyonları için süreç parametrelerinin optimum değerlerini tespit etmişler ve sinir ağları yaklaşımı ile geri yaylanma hesaplamalarında önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlamışlardır.

## 2.4. Geri Yaylanmanın Gürbüz Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar

Du vd. [59] gürbüz optimizasyonu şu şekilde ifade eder: “Tasarım değişkenleri rastsal değişkenler olarak kabul edildiğinde, bir tasarımın gürbüzlüğü standart sapma değeri ile ifade edilir. Gürbüz bir sistem elde edebilmek için en küçük standart sapma değerine ulaşmak gerekir. Gürbüz sistemin amacı sadece amaç fonksiyonunu minimuma indirmek değil, aynı zamanda elde edilen sonuçlar içerisindeki varyasyonu da, tasarım değişkenlerindeki belirsizliklerden kaynaklanan, asgari seviyede tutmaktır.” Park vd. [65] olasılıksal bir optimizasyon çerçevesini şu şekilde belirtirler:

$$\begin{aligned} \text{en küçük} & w_1\mu_z + w_2\sigma_z \\ \mu_x & \\ \text{öyle ki} & \mu_{g_i} + k\sigma_{g_i} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\ & h_j(\mathbf{d}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\ & \mu_k^L \leq \mu_k \leq \mu_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.17)$$

Burada  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık faktörleri;  $\mu_k^L$  ve  $\mu_k^U$  sırasıyla  $\mu_k$ 'nin alt ve üst sınır değerleri;  $k$  ise kısıt sağlama olasılığını gösteren sabit bir sayıdır. Olasılık değeri  $\Phi(k)$  ile belirtilir. Burada  $\Phi$ , birikimli dağılım fonksiyonudur (cumulative distribution function, CDF). Örneğin,  $k=3$  ise olasılık değeri  $\Phi(3)=0.9987$  olacaktır.

### 2.4.1. Direkt optimizasyon çalışmaları

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, hesaplama sürelerinin çok yüksek olmasından dolayı gürbüz optimizasyon çalışmasını vekil model kullanmadan doğrudan sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştiren çok az sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. Bunlardan biri Shivpuri ve Zhang [66] tarafından gerçekleştirilen, derin çekme işleminde ortaya çıkan buruşma ve sac incilmesi problemlerinin azaltılmasına yönelik çalışmadır. Sonlu elemanlar analizi tabanlı genetik algoritma yaklaşımı (NSGA-II) ile birden çok tasarım alternatifi için deterministik Pareto eğrileri oluşturmuşlar ve ödünleşim (trade-off) stratejisi ile de optimum tasarımı

belirlemişlerdir. Bir sonraki aşamada, Pareto eğrisinden elde ettikleri her olurlu nokta için birinci derece ortalama değer yaklaşımı ile güvenilirlik analizi gerçekleştirmişlerdir. Sac tutucu kuvveti için varyasyon katsayısını ( $\frac{\text{standard sapma}}{\text{ortalama}}$ ) sabit bir değerde tutmuşlar, kalıp ile zımba arasındaki sürtünme için ise üç farklı değer kullanmışlardır. Farklı varyasyon değerlerini dikkate almalarındaki amaç, sürtünmedeki belirsizliklerin ne zaman yükseldiğini görebilmek ve en gürbüz tasarım noktasını belirleyebilmek içindir. En yüksek güvenilirlik değerine sahip tasarımı optimum olasılıksal tasarım olarak seçmişlerdir. Böylece hem hasar olasılığını önemli ölçüde azaltırken hem de üretilen parça kalitesini % 45 oranında iyileştirmişlerdir. Del Prete vd. [67] ise SEA tabanlı olasılıksal analizlerin, varyasyon katsayısını belirlemedeki kabiliyetleri üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı sayıda olasılıksal değişken (sac kalınlığı, sürtünme katsayısı, pekleşme katsayısı, elastisite modülü, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti) kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Analiz içerisinde kullanılan olasılıksal değişken sayısını arttırdıkça (önce üç adet değişken ile analizlere başlamışlar, en son beş adet değişken kullanmışlardır.) geri yaylanmanın varyasyon katsayısının önemli ölçüde iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Yeterli sayıda olasılıksal değişken kullanıldığında (bu durumun hesaplama süresini daha da uzatacağını belirtmişlerdir.), makul bir varyasyon değerinin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

#### **2.4.2. Vekil model tabanlı optimizasyon çalışmaları**

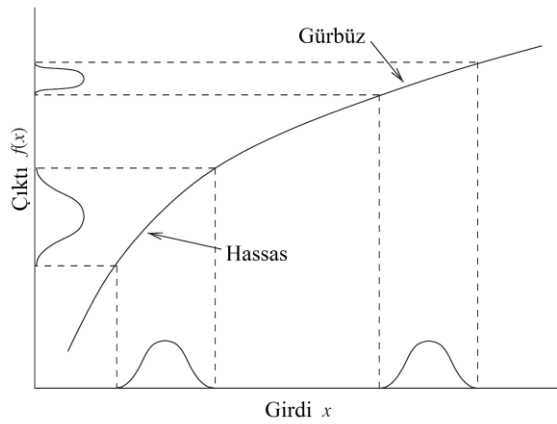
Maretta vd. [38] yaptıkları çalışmada tek tasarım değişkeni olarak kullandıkları sac tutucu kuvvetinin yanına sisteme belirsizlik katabilmek için olasılıksal davranış gösteren pekleşme üsteli ( $n$ ) ve sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ifadelerini de eklemişlerdir. Yüksek sac tutucu kuvveti kullanıldığı zaman sistemdeki varyasyonların arttığını belirlemişler ve bunun belirsizlik içeren değişkenlerin etkisi sonucu meydana geldiği ifade etmişlerdir. Wang vd. [68] yüksek mukavemetli çeliklerin şekil verme operasyonları için gerçekleştirdikleri çalışmalarında optimum sac tutucu kuvveti (blank holder force, BHF) ve çekme boncuğu kısıtlayıcı kuvveti (draw bead restraining force, DBRF) değerini belirleyebilmek için gürbüz tasarım



kullanmışlardır. Sac kalınlığı ( $t$ ), akma mukavemeti ( $\sigma_y$ ), çekme mukavemeti ( $\sigma_b$ ) ve sürtünme katsayısını ( $f$ ) belirsiz değişkenler olarak kabul etmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile malzeme özelliklerinin, sürtünmenin ve süreç değişkenlerinin istatistiksel dağılımlarını göz önüne alarak sistemdeki belirsizlikleri tanımlamışlardır. Önerdikleri ayrık aralıklı PYY (separated interval response surface methodology) yöntemi ile sac-metal derin çekme işlemini daha yüksek bir doğrulukla modellemişlerdir. Li vd. [69] sac şekillendirme süreci için geliştirdikleri “altı sigma için tasarım” yöntemiyle bir gürbüz optimizasyon çerçevesi oluşturmuşlardır. Bu yöntem ile güvenilirliği ve gürbüzlüğü yüksek bir sac şekillendirme süreci meydana getirmişler, aynı zamanda vekil modeller kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işleminin verimini de arttırmışlardır. Zhang ve Shivpuri [70] süreç belirsizliklerinin varlığında çatlak oluşumu ve buruşma problemini minimuma indirgeyen optimum değişken sac tutucu kuvvetini olasılıksal kısıtlar ile belirlemişlerdir. Box-Behnken yöntemi ile dört adet değişken için yirmi yedi tane örnekleme noktası ve PYY yöntemi ile de ikinci dereceden vekil model oluşturmuşlardır. Deterministik ve gürbüz optimizasyon yöntemlerini inceledikleri problem için kıyaslamışlar, elde ettikleri sonuçlar ile gürbüz optimizasyonun deterministiğe oranla iki katı daha güvenilir sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Buranathiti vd. [71] hasar analizi kapsamında sac şekillendirme işlemi için olasılıksal tasarım sürecini incelemişlerdir. Çalışmalarında hasar olasılığı çok düşük olan bir sistem elde edebilmek ve sac şekillendirme süreci içerisindeki belirsizlikleri etkili bir biçimde dikkate alabilmek amacıyla gürbüz tasarım çerçevesi oluşturmuşlardır. Wei vd. [72] Isukapalli vd. [73] tarafından sunulan olasılıksal PYY yöntemini kullanarak sac şekillendirme sürecindeki rastsal değişkenlerin (pekleşme üsteli, akma mukavemeti ve sürtünme katsayısı) belirsizliklerinin arzu edilen sonuç içerisinde neden olduğu varyasyonu belirlemişler ve optimum tasarım değişkeni değerlerini elde etmişlerdir.

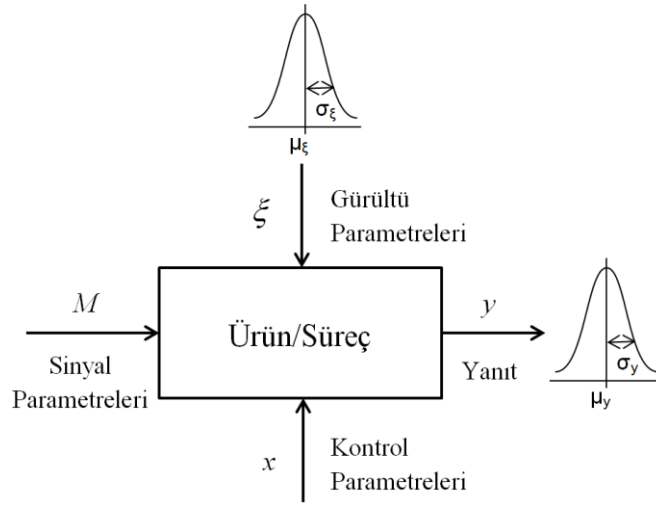
### 3. YÖNTEM

Gürbüz tasarımının temelinde hem arzu edilen performans değerine ulaşmak hem de bu performans değerinin varyasyonunu azaltmak amacı vardır. Gürbüz tasarım yöntemi aracılığıyla varyasyonlara daha az duyarlı tasarımlar oluşturmak hedeflenir. Bu varyasyonlar çalışma koşulları, üretim süreci ve geometrideki belirsizliklere bağlı olarak meydana gelebilmektedir. Geri yayanmadaki varyasyonların temel nedeni ise sac kalınlığı, malzeme özellikleri, sürtünme katsayısı ve benzeri parametrelerdeki varyasyonlardır [74]. Geleneksel deterministik optimizasyon yöntemleri süreç içerisindeki belirsizlikleri dikkate almaz ve bu durum, oluşturulan tasarımların belirsizliklerin var olduğu ortamlarda beklenen ölçüde performans gösterememesine sebep olur (hassas tasarımlar) [75]. Şekil 3.1’de bir gürbüz tasarım ile bir hassas tasarımın karşılaştırması görülebilir. Uygulama ortamında varlığı kaçınılmaz olan belirsizliklerin kaynağını azaltmadan, sistem içerisindeki değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini inceleyerek varyasyonu azaltmak birçok gürbüz tasarım yönteminin esasını oluşturmaktadır [75]. Bir diğer ifadeyle gürbüz tasarım, belirsizliklere sahip tasarım değişkenleri tarafından kaynaklanan sistem performansındaki varyasyonu azaltarak bu sayede tasarımın hassasiyetini de azaltmayı amaçlar.



Şekil 3.1. Gürbüz ve hassas tasarımların karşılaştırılması [75]

Gürbüz tasarım yönteminde sistem değişkenleri; (i) kontrol parametreleri ( $x$ ), tasarımcı tarafından kolaylıkla kontrol edilen, ( $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \in \mathcal{X}$ ), (ii) gürültü parametreleri ( $\xi$ ), kontrolü zor veya maliyetli ( $\xi = \{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(q)}\} \in \mathcal{E}$ ) ve (iii) sinyal parametreleri ( $M$ ), tasarımcı tarafından arzu edilen değeri belirten şekilde olmak üzere üç gruba ayrılır. P-şeması aracılığıyla bahsedilen farklı tipteki tasarım parametreleri arasındaki ilişki gösterilebilir (Şekil 3.2) [17].



Şekil 3.2. Gürbüz tasarımda P-şeması ile farklı tipteki tasarım parametreleri arasındaki ilişkinin gösterimi [17]

Gürültü parametrelerindeki varyasyonlar sistemin yanıt değerinin de belirli bir varyasyon değerine sahip olmasına neden olurlar. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, ortalaması  $\mu_\xi$  ve standart sapması  $\sigma_\xi$  olan normal dağılıma sahip gürültü parametreleri, ortalaması  $\mu_y$  ve standart sapması  $\sigma_y$  olan bir normal dağılım ile sistemin yanıt değerinin ifade edilmesini gerektirir.

İlerleyen bölümlerde geri yaylanma ve geri yaylanma varyasyonunun minimize edilmesi için kullanılan gürbüz tasarım yöntemlerinden bahsedilecektir. Literatürde bu yöntemler, (i) deneysel ve (ii) benzetime dayalı yöntem olarak ikiye ayrılmıştır. Deneysel yöntem olarak Taguchi yöntemi teorik olarak açıklanmış, benzetime dayalı yöntem olarak ise bu çalışmada kullanılan gürbüz optimizasyon yöntemi anlatılmıştır.

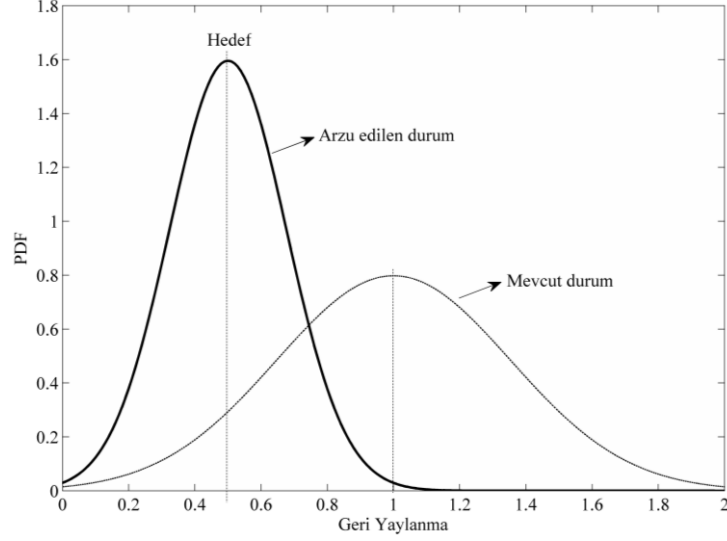
### **3.1. Taguchi Yöntemi**

Taguchi yöntemi ile ifade edilmek istenen kalite anlayışı, bir ürünün tasarım ve geliştirilmesi sürecinden başlayıp test ve doğrulama aşamaları ile birlikte üretim süreci boyunca arzu edilen kalitenin sağlanmasını hedefler. Burada kalite kelimesi ile anlatılmak istenen, belirsizliklerin etkisi altında meydana gelen geri yaylanma varyasyonunun minimize edilmesidir. Ürünün en erken aşamada kaliteli olarak elde edilmesi amaçlanır ve ürünün kaliteli olup olmadığını incelemektense kaliteyi ürünün kendisi içerisinde oluşturmak tercih edilir. Yani sadece üretim aşamasında kaliteye odaklanmak yerine, ürün tasarımından itibaren kaliteye önem verilmesi gerektiğini belirtir. Kalite, Taguchi tarafından; “elde edilen ürün performansının ulaşılmak istenen değer etrafında gösterdiği tutarlı davranış” olarak açıklanır. Performansın tutarlılığı, ortalama performans değerinin hedeflenen değere yaklaştırılmasıyla ve performans varyasyonunun azaltılmasıyla elde edilir. Bu duruma örnek bir süreç Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Burada gürbüz bir tasarım elde edebilmek amacıyla, hedeflenen geri yaylanma değeri etrafındaki varyasyon azaltılarak sürecin kalitesinin arttırıldığı gözlemlenebilir. Bir başka ifadeyle hem geri yaylanmanın ortalama değeri azalmış hem de geri yaylanma varyasyonu mevcut duruma göre büyük ölçüde azaltılmıştır. Bu sayede üretilen parçalarda oluşacak geri yaylanma değerinin değişimi dar bir aralığa indirgenerek istenmeyen veya yüksek geri yaylanma değerine sahip parça üretiminin önüne geçilmiştir.

Taguchi yöntemi tasarım sürecini üç aşamaya ayırır [76];

(i) *Sistem tasarımı*: Bu aşamada tasarımın performansını tahmin edebilmek amacıyla fonksiyonel modelin oluşturulması ve doğrulanmasıyla ilgilenilir. Tasarım uzayı

tanımlanır. Bunun yanında kontrol ve gürültü parametreleri için olurlu bölgeler belirlenir.



Şekil 3.3. Varyasyon değerinin azaltılması ile süreç kalitesinin artırılması

(ii) *Parametre tasarımı*: Parametre tasarımı aşamasında sistemin gürültü faktörlerine olan duyarlılığını azaltabilmek amacıyla kontrol parametreleri için uygun değer seçimi üzerine odaklanılır. Bu aşama aynı zamanda gürbüz tasarım olarak da adlandırılır.

(iii) *Tolerans tasarımı*: Bu etapta parametre tasarımı aşamasında oluşturulan tasarımların daha detaylı bir incelemesi yapılır. Buradaki amaç kontrol parametreleri için belirli bir tolerans değeri belirleyebilmektir.

Taguchi yöntemini matematiksel olarak açıklamak amacıyla, öncelikle  $y(\mathbf{x}, \xi)$  gibi bir ifadenin tasarımın performans ölçütünü belirttiği kabul edilsin. Daha önce de belirtildiği üzere  $\mathbf{x}$  kontrol,  $\xi$  ise gürültü parametrelerini ifade etmektedir. Bu noktada Taguchi, optimum tasarımın en küçük Ortalama Hata Karesine (OHK) sahip

tasarım olarak belirlenebileceği önerisinde bulunmuştur [76]. Trosset [77] tasarımın amacına uygun olarak ürün kalitesinin belirlenmesini sağlayan üç farklı amaç fonksiyonunun tanımlanabileceğini belirtmiştir. Bunlar;

(i) Eğer kalite,  $y$  değerinin  $y_{hedef}$  değerine ne kadar yakın olduğuyula belirleniyorsa,

$$OHK(\mathbf{x}) = \left\langle \left( y(\mathbf{x}, \xi) - y_{hedef} \right)^2 \right\rangle \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( y(\mathbf{x}, \xi^{(i)}) - y_{hedef} \right)^2 \quad (3.1)$$

(ii) Eğer kalite  $y$  değerinin ne kadar küçük olmasıyla belirleniyorsa,

$$OHK(\mathbf{x}) = \left\langle y^2(\mathbf{x}, \xi) \right\rangle \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y^2(\mathbf{x}, \xi^{(i)}) \quad (3.2)$$

(iii) Eğer kalite  $y$  değerinin ne kadar büyük olmasıyla belirleniyorsa,

$$OHK(\mathbf{x}) = \left\langle \frac{1}{y^2(\mathbf{x}, \xi)} \right\rangle \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{y^2(\mathbf{x}, \xi^{(i)})} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $m$  örnekleme sayısını,  $\xi^{(i)}$  ise  $\xi$ 'nin birleşik olasılık dağılım fonksiyonu  $\varphi(\xi)$  ile elde edilen  $i$ . gerçekleştirme değerini göstermektedir.

Taguchi yönteminin parametre tasarımı aşamasında, kontrol parametrelerinin ( $\mathbf{x}$ ) optimum değerleri,  $OHK(\mathbf{x})$ 'in minimize edilmesi yoluyla belirlenir. Uygulamada, performans değerinin değişimini belirleyebilmek amacıyla Sinyal-Gürültü Oranı (SGO) kullanılır [76]. Kullanılan verilerin çok geniş bir dinamik aralığa (değişebilir bir niceliğin alabileceği en yüksek ve en düşük değerlerin oranı) sahip olabilmelerinden dolayı, SGO sıklıkla logaritmik ölçek kullanılarak belirtilir. SGO,  $-10\log_{10} OHK(\mathbf{x})$  şeklinde ifade edilir. Taguchi'nin asıl yaklaşımında ise bu minimizasyon problemi, kontrol ve gürültü faktörlerinin ayrı ayrı işleme alındığı deney tasarımı teknikleri uygulanarak çözülür. Dikey sıralar yöntemi uygulanarak iç sıra (kontrol parametreleri,  $\mathbf{x}$ ) ve dış sıra (gürültü parametreleri,  $\xi$ ) şeklindeki iki ayrı sıranın vektörel çarpımı gerçekleştirilir. Oluşturulan bu düzen, *ürün dizisi*

olarak adlandırılır ve iç sırada bulunan her bir  $x$  değeri için dış sıra ( $\xi$ ) kullanılarak SGO belirlenir. Son olarak, gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler, standart varyans analizi yöntemleri kullanılarak gürbüz bir tasarım için optimum kontrol parametreleri kombinasyonu oluşturacak şekilde incelenir.

Elastomer bir bağlayıcı parçanın istenilen yapıştırma kuvvetini sağlayarak plastik bir boruya montajını gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen yöntem için örnek bir ürün dizisi Çizelge (3.1)'de gösterilmiştir [13]. Bu örnekte her biri üç farklı seviyeye sahip dört adet kontrol parametresi ( $A$  = ara kesişim noktası,  $B$  = bağlayıcı parçanın et kalınlığı,  $C$  = yerleştirme derinliği,  $D$  = yapıştırıcı yüzdesi) ve her biri iki farklı seviyeye sahip üç adet gürültü parametresi ( $E$  = havalandırma süresi,  $F$  = havalandırma sıcaklığı,  $G$  = havalandırma bağıl nemi) kullanılmıştır. Çizelge (3.1)'in (a) bölümünde kontrol parametreleri için olan tasarım yer alır. Bu tasarım kesirli çok etmenli tasarımdır ( $3^{4-2}$ ) ve *iç sıra* olarak adlandırılır. Çizelge (3.1)'in (b) bölümünde gürültü parametreleri için oluşturulan çok etmenli tasarım ( $2^3$ ) bulunur ve bu da *dış sıra* olarak adlandırılır. Daha sonra her bir deney sırasında kullanılacak girdi değerlerini belirlemek amacıyla iç ve dış sıradaki veriler çapraz olarak eşleştirilir. Böylece 72 adet deney oluşturulur ve her bir deney gerçekleştirilerek örnek problem kapsamında incelenen yapıştırma kuvveti için bir veri seti elde edilir.

Çizelge (3.1) incelendiğinde Taguchi tasarım yönteminin çok sayıda deney yapılmasına neden olduğu görülmektedir. Bu örnekte sadece 7 adet parametre olmasına rağmen 72 adet deney yapılmıştır. Ayrıca, iç sıra tasarımında kullanılan kesirli çok etmenli tasarım ( $3^{4-2}$ ) yöntemiyle kontrol parametrelerinin etkileşimleri hakkında yeterli bilgi edinilememektedir [13]. Taguchi yöntemi tek seferlik bir deney tasarımını kullanır. Yani sonradan deney tasarımına yeni tasarım noktaları eklenmez. Elde edilen deney sonuçları incelenir ve optimum amaç fonksiyonu değeri belirlenir. Bu durum ise vekil model tabanlı optimizasyon yöntemlerine ters düşmektedir. Bu tip yöntemlerde başlangıç için bir deney tasarımı oluşturulur ve bu tasarım noktalarında analizler gerçekleştirilir. Daha sonra analizler sonucu elde edilen yanıt değerleri kullanılarak vekil model oluşturulur. Bu vekil modele bir optimizasyon algoritması uygulanarak olurlu tasarım noktaları belirlenir. Bu tasarım noktalarının

performansı yeni analizler yapılarak doğrulanır ve istenilen sonuç elde edilirse süreç sonlanır. Eğer arzu edilen sonuç elde edilemezse ilk başta kullanılan deney tasarımına ek tasarım noktaları eklenerek veri seti iyileştirilir ve tekrar vekil model oluşturularak süreç tekrarlanır. Taguchi yönteminde kontrol ve gürültü parametrelerinin değerleri önceden belirlenir ve bu da ardışık optimizasyon sürecine izin vermez. Dolayısıyla tasarımcı aslında kendisini hiç ilgilendirmeyen tasarım bölgelerinde gereksiz yere fazla miktarda hesaplama yapmak zorunda kalabilir [77]. Taguchi yönteminin eksiklikleri üzerine daha detaylı bir inceleme için Nair [78] tarafından düzenlenen panel çalışmasına bakılabilir.

Çizelge 3.1. İç ve dış sıralar kullanılarak oluşturulan örnek bir ürün dizisi [13]

					(b) Dış sıra								
					E	1	1	1	1	2	2	2	2
					F	1	1	2	2	1	1	2	2
					G	1	2	1	2	1	2	1	2
					(a) İç sıra								
Deney no.	A	B	C	D									
1	1	1	1	1	15.6	9.5	16.9	19.9	19.6	19.6	20.0	19.1	
2	1	2	2	2	15.0	16.2	19.4	19.2	19.7	19.8	24.2	21.9	
3	1	3	3	3	16.3	16.7	19.1	15.6	22.6	18.2	23.3	20.4	
4	2	1	2	3	18.3	17.4	18.9	18.6	21.0	18.9	23.2	24.7	
5	2	2	3	1	19.7	18.6	19.4	25.1	25.6	21.4	27.5	25.3	
6	2	3	1	2	16.2	16.3	20.0	19.8	14.7	19.6	22.5	24.7	
7	3	1	3	2	16.4	19.1	18.4	23.6	16.8	18.6	24.3	21.6	
8	3	2	1	3	14.2	15.6	15.1	16.8	17.8	19.6	23.2	24.2	
9	3	3	2	1	16.1	19.9	19.3	17.3	23.1	22.7	22.6	28.6	

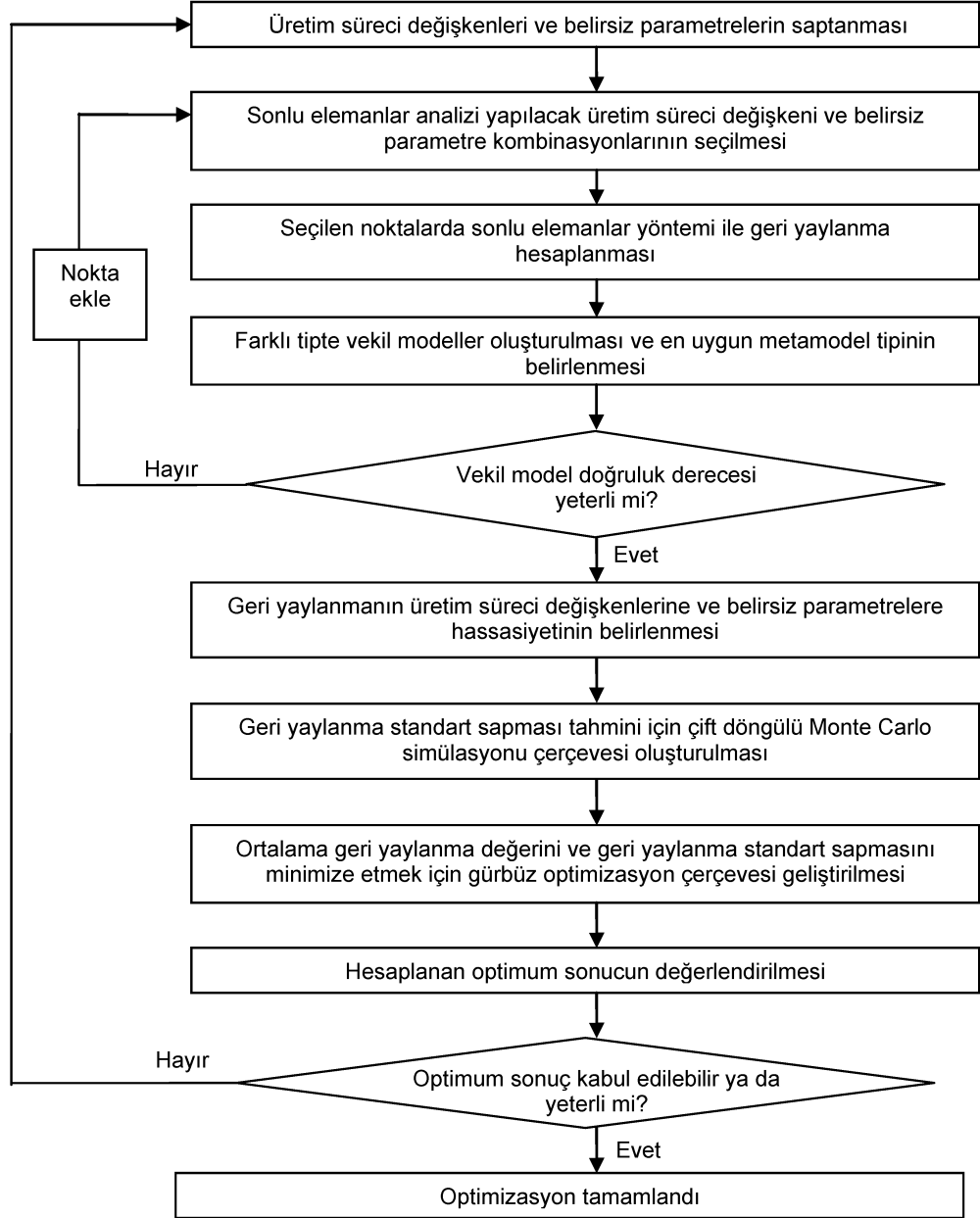


### 3.2. Gürbüz Optimizasyon

Gürbüz optimizasyonun amacı, belirsizliklere bağlı olarak en iyi ortalama performansı ve en düşük performans yayılımını (varyasyonunu) sağlamaktır. Gürbüz tasarım kullanımının bir sonucu olarak, sistemin gürültü parametrelerine (malzeme özellikleri, talaş kaldırma, sürtünme vb.) duyarlılığı en küçük değere düşürülürken, iyileştirilmiş kontrol parametreleri (sac tutucu kuvveti vb.) değerleri de elde edilir. Bu çalışmada, geri yaylanmayı ve geri yaylanmadaki varyasyonu minimize etmek için ana hatları Şekil 3.4'te gösterilen bir vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesi geliştirilmiştir. Bu sayede üretim süreci değişkenlerinin optimum değerleri belirlenebilmektedir. Optimizasyon sürecine geçmeden önce üretim süreci değişkenleri ve gürültü parametrelerinin hangilerinin optimizasyonda kullanılacağı geri yaylanma hassasiyet ve varyasyon analizlerine bakılarak tespit edilir. Etkisi ihmal edilebilecek seviyede olan değişken ve/veya parametreler optimizasyon probleminin boyutunu azaltmak amacıyla optimizasyon çerçevesi dışında bırakılır. Amaç ve kısıt fonksiyonlarının belirlenmesinden sonra optimizasyon problemi uygun bir algoritma ile çözülür. İlgilendiğimiz geri yaylanma problemi için amaç fonksiyonları ortalama geri yaylanma ve geri yaylanma standart sapmasıdır. Kısıtlar ise, üretim süreci parametrelerinin alt ve üst sınırları ile eşitsizlik kısıtlarıdır.

Yapılan bu çalışmada amaçlanan hem ortalama geri yaylanma değerinin hem de geri yaylanma standart sapmasının eşzamanlı minimize edilmesidir. Sadece amaç fonksiyonunun hedef değerini minimize etmeye çalışmak bazı sakıncaları beraberinde getirmektedir. Hedef değer çevresindeki fonksiyon değerinde oluşan pozitif ve negatif sapmalar birbirini nötrleştirmekte ve bu durum gürbüz olmayan optimum tasarımlara neden olmaktadır [79]. Sadece fonksiyonun standart sapma değerini azaltmak ise gürbüz ama optimum olmayan tasarımlara neden olur ki bu durum arzu edilmeyen bir sonuçtur [79]. Bu sebeplerden dolayı amaç fonksiyonunun hem performans değerini hem de standart sapmasını optimize etmek uygun olacaktır. Gürbüz tasarım sayesinde performans değerinin ortalaması ve standart sapması arasında net bir ödünleşim ilişkisi kurulabilmektedir. Gürbüz

optimizasyon yönteminin metodolojisi hakkında detaylı bilgi için Ben-Tal ve Nemirovski [80] tarafından gerçekleştirilen çalışmaya başvurulabilir.



Şekil 3.4. U-büküm sürecinde geri yaylanma ve geri yaylanma varyasyonunu minimize etmek için geliştirilen vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon çerçevesi.

### 3.2.1. Gürbüz optimizasyon problem tanımı

Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere gürbüz tasarım, hem ortalamayı hem de standart sapmayı eşzamanlı minimize eden çok amaçlı bir problem olarak formüle edilebilir;

$$x^* = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \{ \mu(\mathbf{x}), \sigma(\mathbf{x}) \} \quad (3.4)$$

Burada  $\mu$  ve  $\sigma$ , gürültü parametreleri  $\xi \in \mathcal{E}$  varlığında performans değerinde meydana gelen istatistiki verilerdir. Bunlar;

$$\mu(\mathbf{x}) = \int_{\mathcal{E}} \hat{y}(\mathbf{x}, \xi) P(\xi) d\xi \quad (3.5)$$

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = \int_{\mathcal{E}} (\hat{y} - \mu)^2 P(\xi) d\xi \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilirler. Matematiksel olarak bir problemin gürbüzlüğü, çıktı olarak elde edilen değerlerin standart sapması hesaplanarak belirlenir. Burada dikkate alınması gereken nokta, Denklem (3.5) ve (3.6)'nın boyutlarının yüksek olmasından (çok sayıda rastsal değişkenin olması) dolayı analitik çözümlerinin elde edilmesinin zorluğudur. Bu hesaplamayı gerçekleştirebilmek için ileriki bölümlerde bahsedilecek olan Monte Carlo benzetiminden faydalanılacaktır. Monte Carlo benzetimi ile ortalama ve varyans değerleri yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$\mu(\mathbf{x}) \cong \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y(\mathbf{x}, \xi^{(i)}) \quad (3.7)$$

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( y(\mathbf{x}, \xi^{(i)}) - \mu(\mathbf{x}) \right)^2. \quad (3.8)$$

Burada  $m$  örnekleme sayısını,  $\xi^{(i)}$  ise  $\xi$ 'nin birleşik olasılık dağılım fonksiyonu  $\varphi(\xi)$  ile elde edilen  $i$ . gerçekleştirme değerini göstermektedir.

Gürbüz optimizasyon modeli genel olarak şu şekilde ifade edilir [81];

$$\begin{aligned}
& \text{en küçük} && f_0(\mathbf{x}) \\
& \text{öyle ki} && f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}_i) \leq 0, \quad \forall \mathbf{u}_i \in U_i, \quad i = 1, \dots, m
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Burada  $\mathbf{x} \in R^n$  kontrol parametrelerini ifade eden vektörü,  $f_0, f_i : R^n \rightarrow R$  amaç ve kısıt fonksiyonlarını ve  $\mathbf{u}_i \in R^k$  ise  $U_i \subseteq R^k$  alt kümesinden rastgele seçilen gürültü parametrelerini ifade etmektedir. Denklem (3.9) ile hedeflenen, tüm olurlu çözümler içerisinde amaç fonksiyonunu minimum yapan  $x^*$  değerlerinin belirlenmesidir.

Kontrol parametreleri olarak belirlenen değişkenler süreç içerisinde (i) sadece aralıklı, (ii) sadece rastsal veya (iii) hem aralıklı hem de rastsal değerler alabilirler. Bu üç farklı durum için oluşturulabilecek gürbüz optimizasyon modelleri sırasıyla [59];

(i) Kontrol parametreleri sadece aralıklı değer aldıklarında oluşturulan optimizasyon modeli;

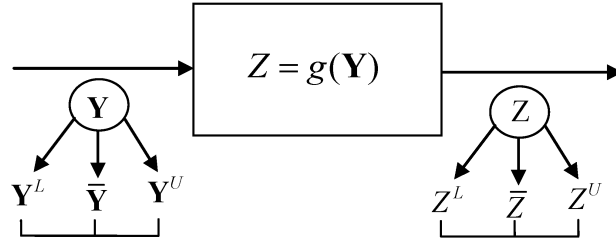
$$\begin{aligned}
& \text{en küçük} && w_1 \bar{Z} + w_2 \delta_Z \\
& \text{öyle ki} && g^{\max} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\
& && h_j(\bar{\mathbf{Y}}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\
& && \bar{Y}_k^L \leq \bar{Y}_k \leq \bar{Y}_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, n
\end{aligned} \tag{3.10}$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $Z = g(\mathbf{Y})$  sistemin performans değerini (Şekil 3.5),  $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_y})$  ise  $n_y$  adet aralık ölçekli değişkeni içeren vektörü belirtir ve bu değişkenlerin birbirinden bağımsız oldukları kabul edilmiştir.  $\mathbf{Y}$ 'yi oluşturan unsurlar kontrol ve gürültü parametreleri olabilir.  $\mathbf{Y}$  alt ve üst sınır değerleri  $[\mathbf{Y}^L, \mathbf{Y}^U]$  aralığında bulunur.  $Z$  aralığının orta noktası olan  $\bar{Z}$  ve aralığın genişliğini ifade eden  $\delta_Z$  şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{Z} = \frac{1}{2}(Z^U + Z^L) \tag{3.11}$$

$$\delta_Z = Z^U - Z^L. \tag{3.12}$$

Burada  $Z^U$  ve  $Z^L$  sırasıyla  $Z$ 'nin üst ve alt değerlerini belirtmektedir. Bu çerçevede tanımlanan bir sistemin gürbüzlüğü,  $\bar{Z}$  değeri hedeflenen değere ulaşırken elde edilebilecek en düşük  $\delta_z$  değeri ile sağlanır.



Şekil 3.5. Aralık ölçekli değişkenlere sahip bir sistem [59]

(ii) Kontrol parametreleri sadece rastsal değer aldıklarında oluşturulan optimizasyon modeli;

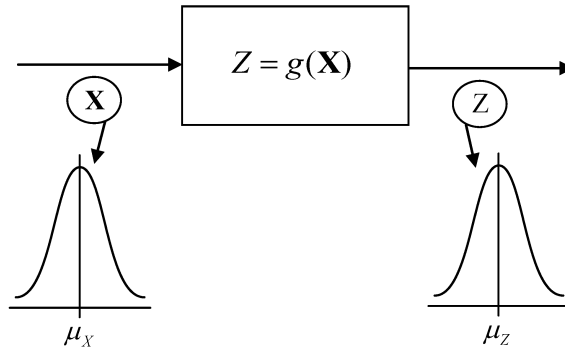
$$\begin{aligned}
 \text{en küçük} & \quad w_1 \mu_z + w_2 \sigma_z \\
 \mu_x & \\
 \text{öyle ki} & \quad \mu_{g_i} + k \sigma_{g_i} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\
 & \quad h_j(\mathbf{d}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\
 & \quad \mu_k^L \leq \mu_k \leq \mu_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $Z = g(\mathbf{X})$  sistemin performans değerini (Şekil 3.6),  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_{n_x})$  ise  $n_x$  adet rastsal değişkeni içeren vektörü belirtir ve bu değişkenlerin birbirinden bağımsız oldukları kabul edilmiştir. Yanıt değeri olan  $Z$ 'nin ortalama değeri ( $\mu_z$ ) ve varyansı ( $\sigma_z^2$ ) sırasıyla (3.14) ve (3.15) ile hesaplanır:

$$\mu_z \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(\mathbf{x}_i) \tag{3.14}$$

$$\sigma_Z^2 \cong \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (g(\mathbf{x}_i) - \mu_Z)^2 . \quad (3.15)$$

Burada  $N$  örnekleme sayısını belirtmektedir.



Şekil 3.6. Rastsal değişkenlere sahip bir sistem [59]

Denklem (3.13)'te  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık faktörleri,  $\mu_k^L$  ve  $\mu_k^U$  sırasıyla  $\mu_k$ 'nin alt ve üst sınır değerleri;  $k$  ise olurlu çözümlerin hangi olasılıkla ilgili kısıtları sağlayacağını belirten katsayıdır. Olasılık değeri  $\Phi(k)$  ile belirtilir. Burada  $\Phi$  standart normal dağılımın, birikimli dağılım fonksiyonudur (cumulative distribution function, cdf). Örneğin,  $k=3$  ise olasılık değeri  $\Phi(3)=0.9987$  olacaktır.  $\mu_Z$  ve  $\sigma_Z$  değerleri, Denklem (3.7 ve 3.8) aracılığıyla hesaplanabilir.  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık faktörleri, ortalama ile standart sapma değerinin önem sırasına göre belirlenir ve  $w_1+w_2=1$  eşitliğini sağlar. Bu tezde, kontrol parametrelerinin sadece rastsal değer aldığı bir gürbüz optimizasyon çalışması yürütülmüştür.

(iii) Kontrol parametreleri hem aralıklı hem de rastsal değer aldıklarında Du vd. [59] tarafından oluşturulan optimizasyon modeli;

$$\begin{aligned}
& \text{en küçük} && w_1 \bar{\mu}_z + w_2 \bar{\sigma}_z + w_3 \delta \sigma_z \\
& \mu_x, \bar{Y} && \\
& \text{öyle ki} && \mu_{g_i}^{\max} + k \sigma_{g_i}^{\max} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\
& && h_j(\mu_x, \mathbf{Y}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_h \\
& && \bar{Y}_k^L \leq \bar{Y}_k \leq \bar{Y}_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, n_Y \\
& && \mu_m^L \leq \mu_m \leq \mu_m^U, \quad m = 1, 2, \dots, n_X
\end{aligned} \tag{3.16}$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\mu_{g_i}^{\max}$  ve  $\sigma_{g_i}^{\max}$ , kısıt fonksiyonu olan  $g_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 'nin maksimum ortalama ve standart sapma değerlerini,  $Z = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  sistemin performans değerini belirtir.  $\bar{\mu}_z, \bar{\sigma}_z$  ve  $\delta_z$  değerleri şu şekilde hesaplanır;

$$\bar{\mu}_z = \frac{1}{2}(\mu_z^{\max} + \mu_z^{\min}) \tag{3.17}$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{2}(\sigma_z^{\max} + \sigma_z^{\min}) \tag{3.18}$$

$$\delta_z = \sigma_z^{\max} - \sigma_z^{\min} \tag{3.19}$$

Burada  $\mu_z^{\max}$  ve  $\mu_z^{\min}$  sırasıyla maksimum ve minimum ortalama değerlerini ifade eder.

Görüldüğü üzere sistemlerin gürbüz olup olmadıklarına karar vermeyi sağlayan ölçüt, o sistemin performans değerinin sahip olduğu varyasyondur. Bu varyasyon değerinin hesabı için analitik yöntemler veya benzetim yöntemleri uygulanabilir. Bir sonraki bölümde bu yöntemlerin nasıl uygulandığı açıklanacaktır.

### 3.2.2. Varyasyon hesabı

Gürültü parametreleri etkisinde süreç içerisinde meydana gelen varyasyonun hesaplanabilmesi için (i) analitik modeller ve (ii) benzetim yöntemleri şeklinde olmak üzere iki farklı yaklaşım uygulanabilir.

### 3.2.2.1. Analitik yöntemler

Geri yaylanma değerini hesaplamaya yarayan ve birden çok rastsal değişkene sahip lineer olmayan bir fonksiyonu dikkate alalım [82];

$$Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.20)$$

$Y$ 'nin ortalama ve varyans değerleri,

$$\begin{aligned} \mu_Y = E[Y] &= \int_{x_1=-\infty}^{\infty} \dots \int_{x_n=-\infty}^{\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\times f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2, \dots, dx_n \end{aligned} \quad (3.21)$$

ve

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= E[(Y - \mu_Y)^2] \\ &= \int_{x_1=-\infty}^{\infty} \dots \int_{x_n=-\infty}^{\infty} [g(x_1, x_2, \dots, x_n) - \mu_Y]^2 \\ &\times f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2, \dots, dx_n \end{aligned} \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilir. Çoğu mühendislik uygulamasında  $X_1, X_2, \dots, X_n$  değişkenlerinin birleşik yoğunluk fonksiyonu  $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  bilinmeyebilir; fakat bu rastsal değişkenlerin ( $X_i$ ) ortalama ve varyans değerleri biliniyor olabilir. Ayrıca, birleşik yoğunluk fonksiyonu bilinse bile Denklem (3.21 ve 3.22)'deki çok sayıdaki integralin çözümü çok zor olabilir. Bu gibi durumlarda,  $g$  fonksiyonunun ortalama ve varyans değerleri yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu amaçla  $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  fonksiyonu  $\mu_1 = \mu_{X_1}, \mu_2 = \mu_{X_2}, \dots, \mu_n = \mu_{X_n}$  ortalama değerleri etrafında Taylor serisi ile (3.23)'deki gibi açılır:

$$\begin{aligned} Y &= g(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} (X_i - \mu_i) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} (X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j) + \dots \end{aligned} \quad (3.23)$$



Buradaki kısmi türevler  $X_i$ 'nin ortalama değerleri için (3.24)'deki gibi hesaplanır.

$$\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} = \frac{\partial g}{\partial X_i} (X_1 = \mu_1, \dots, X_n = \mu_n). \quad (3.24)$$

Denklem (3.23)'deki  $g$  fonksiyonunun ikinci ve daha yüksek dereceden türevleri ihmal edilerek,

$$Y \approx g(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_1, \dots, \mu_n} (X_i - \mu_i) \quad (3.25)$$

ifadesi elde edilebilir.  $g(\mu_1, \dots, \mu_n)$  ve  $\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_1, \dots, \mu_n}$  sabit değerler olduğundan (3.25)

kullanılarak  $Y$ 'nin ortalama değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_Y = E[Y] \approx g(\mu_1, \dots, \mu_n). \quad (3.26)$$

Benzer şekilde  $Y$ 'nin varyans değeri de aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^n a_i^2 \text{var}[X_i] + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n a_i a_j \text{cov}[X_i, X_j]. \quad (3.27)$$

Burada,

$$a_i = \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_1, \dots, \mu_n} \quad (3.28)$$

ve

$$a_j = \left. \frac{\partial g}{\partial X_j} \right|_{\mu_1, \dots, \mu_n} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir ve

$$\text{var}[X] = E\left[(X - \mu_X)^2\right] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f_X(x) \cdot dx \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(X_i, X_j) &= E\left[(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j)\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_{X_i})(x_j - \mu_{X_j}) \cdot f_{X_i, X_j}(x_i, x_j) \cdot dx_i \cdot dx_j \end{aligned} \quad (3.31)$$

olarak belirtilir. Eğer değişkenler ( $X_i$ ) istatistiksel olarak bağımsız ise varyans değeri,

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2 \quad (3.32)$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

$Y$  fonksiyonun ortalama ve varyans değerlerinin daha hassas olarak belirlenebilmesini sağlamak için (3.23)'deki yüksek dereceden türev terimleri hesaba katılmalıdır. Örneğin, eğer ikinci dereceden türev terimleri ihmal edilmeseydi  $Y$  fonksiyonunun ortalama değeri,

$$\begin{aligned} \mu_Y = E[Y] &\approx g(\mu_1, \dots, \mu_n) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} \Bigg|_{\mu_1, \dots, \mu_n} \text{cov}[X_i, X_j] \end{aligned} \quad (3.33)$$

ifadesi ile hesaplanabilirdi. Eğer  $X_i$  değerleri bağımsız ise (3.33) şu şekilde dönüşür:

$$\mu_Y = E[Y] \approx g(\mu_1, \dots, \mu_n) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial X_i} \Bigg|_{\mu_1, \dots, \mu_n} \text{var}[X_i] . \quad (3.34)$$

Birinci dereceden Taylor serisi açılımı ile  $\mu_Y$  ve  $\sigma_Y$  hesabı kolaydır ancak lineer olmayan problemlerde  $\mu_Y$  ve  $\sigma_Y$  tahminleri yüksek hata içerir. Daha önce de belirtildiği üzere Taylor serisi açılımı içerisindeki birçok terim hesaplama kolaylığı açısından ihmal edilmektedir.

### 3.2.2.2. Benzetim yöntemleri

Benzetim yöntemleri ifadesi ile anlatılmak istenen, geri yaylanma gibi lineer olmayan sistem performansı fonksiyonlarına sahip problemlerin çözümü için zor ve uzun hesaplamalar gerektiren analitik yöntemler yerine istatistiksel yöntemler aracılığıyla yaklaşıma dayalı bir çözüm sağlamaktır. Monte Carlo benzetimi yöntemi bir deney tasarımı tekniğidir ve yeterli sayıda örnekleme sayısı ile birlikte ilgilenilen problemin yanıt değerine ait yüksek doğrulukta istatistiki bilgi elde edilebilir. Bu süreçte, ilgili problemin yaklaşık çözümü için rastgele sayılar ve sistem değişkenlerine ait dağılım parametreleri kullanılarak çok sayıda benzetim gerçekleştirilir.

### 3.2.2.3. Tek döngülü Monte Carlo benzetimi

Genel bir ifadeyle Monte Carlo benzetimi anlatılmak istenirse, öncelikle tasarım uzayından rastgele noktalar  $\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(n)}$  seçilir ve daha sonra bu tasarım noktalarına karşılık gelen yanıt değeri  $y(\xi)$  hesaplanır. Monte Carlo benzetimi dört adımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- (i) Girdiler (kontrol ve gürültü parametreleri) için tasarım uzayının belirlenmesi,
- (ii) Tasarım uzayı içerisinde olasılıksal dağılımlar kullanılarak girdiler için rastgele değerlerin seçilmesi,
- (iii) Bu değerler kullanılarak sistemin performans fonksiyonunun hesaplanması,
- (iv) Elde edilen yanıt değerlerinin bir araya getirilmesi.

Hesaplanan bu yanıt değerlerinin ortalama değeri şu şekilde elde edilir [75]:

$$\langle y(\xi) \rangle \approx \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(\xi^{(i)}). \quad (3.35)$$

Burada  $\bar{y}$  Monte Carlo tahmini olarak belirtilir. Bu tahmin değerinin varyansı,

$$Var(\bar{y}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y(\xi^{(i)}) - \bar{y})^2 = \frac{\sigma_y^2}{n} \quad (3.36)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\sigma_y$ ,  $y(\xi)$ 'nin örnekleme varyansıdır. (3.36)'da belirtilen varyans değeri hesaplanarak Monte Carlo tahminin doğruluğu belirlenebilir. Standart sapma değeri ise,

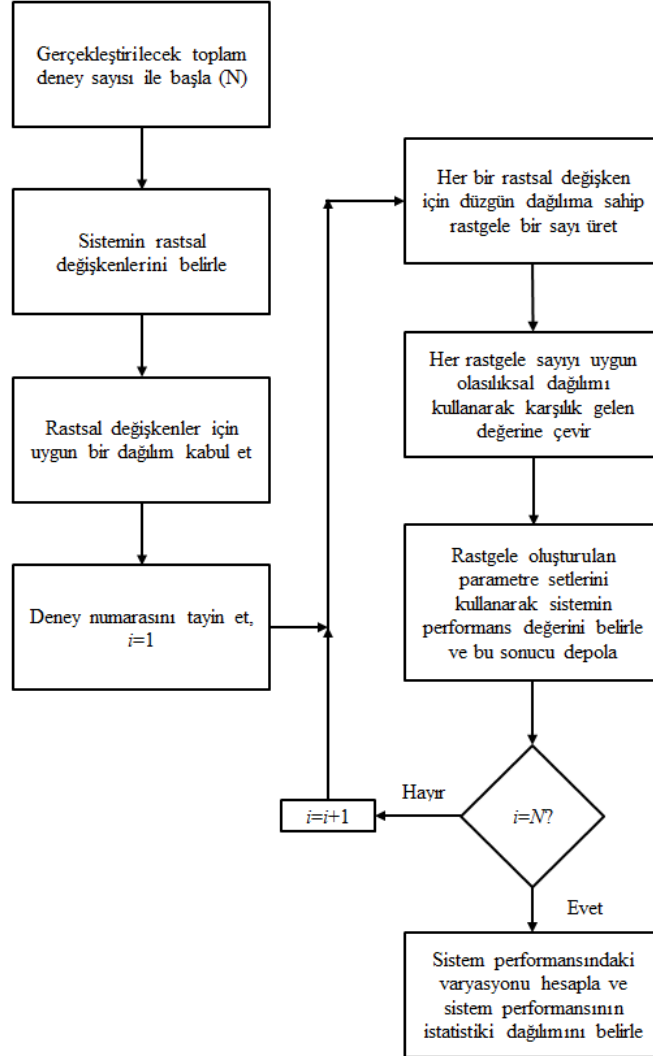
$$Std(\bar{y}) = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} \quad (3.37)$$

ile hesaplanır. Buradan Monte Carlo benzetiminin hata değerinin  $\sqrt{n}$  ile ters orantılı olarak azaldığı görülebilir.

Tek döngülü bir Monte Carlo benzetiminin algoritması Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada tek döngülü Monte Carlo benzetimi kullanılarak *parçadan-parçaya* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır. *Parçadan-parçaya* ifadesi ile anlatılmak istenen aynı üretim süreci içerisinde ve aynı partiden malzeme kullanılarak üretilen parçaların geri yaylanma değerleri arasında meydana gelen varyasyondur.

#### 3.2.2.4. Tek döngülü Monte Carlo benzetiminin dezavantajları

Tek döngülü bir Monte Carlo benzetimi yönteminde girdi olarak verilen tasarım değişkenlerine ait istatistiksel özellikler  $(\mu, \sigma)$  sabit olarak kabul edilir ve bu doğrultuda sistem performansı hesaplanır. Fakat bu girdilerin ortalama ve standart sapma değerlerinde de olasılıksal bir dağılım söz konusu olduğunda tek bir döngü içerisinde bu durumu modellemek imkânsız olacaktır. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi yöntemi ile, sistem modelleme aşamasında yaşanan bu zorluk ortadan kaldırılabilir. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile örneğin malzeme özelliklerinin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* gösterdiği varyasyonların geri yaylanma varyasyonu üzerine etkisini inceleme imkânı doğmaktadır. Tek bir döngü algoritması içinde hem *parçadan-parçaya* hem de *partiden-partiye* olan değişimler gözlemlenemez. Çünkü farklı durumları inceleyebilmek için farklı döngüler oluşturulmalıdır.



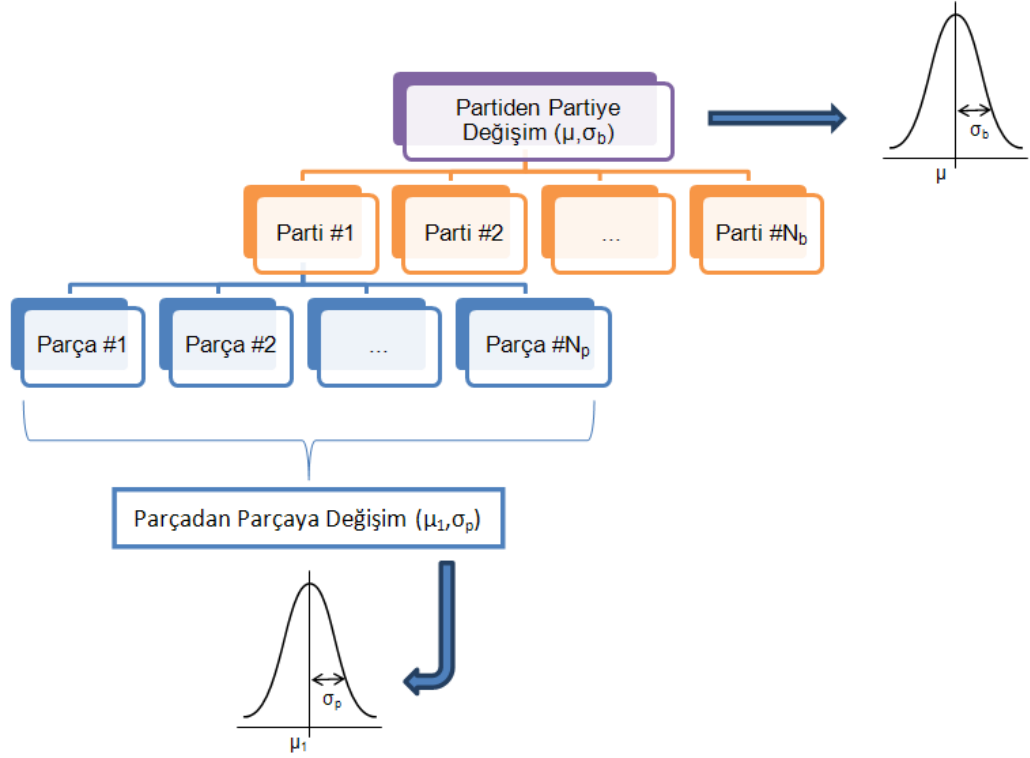
Şekil 3.7. Tek döngülü Monte Carlo benzetimi algoritması [82]

### 3.3. Önerilen Yöntem (Çift Döngülü Monte Carlo Benzetimi Yöntemi)

Gürültü parametrelerin *parçadan-parçaya*, *parti içi* veya *partiden-partiye* gibi durumlar için değişiklikleri dikkate alınarak her bir duruma ait varyasyon hesabı yapılabilir [83]. *Parti içi* varyasyon, aynı partiden üretilen parçalar arasındaki varyasyon değeridir. *Partiden-partiye* varyasyon, üretim sürecinde kullanılan partiler

arasındaki varyasyondur. Örneğin, malzeme özellikleri (akma gerilmesi, pekleşme katsayısı, pekleşme üsteli, vb.) üreticilerin sahip oldukları farklı üretim standartlarından ötürü *parçadan-parçaya*, *parti içi* ve *partiden-partiye* varyasyonlara sahip olmaktadır. Bu çalışmada *partiden-partiye* varyasyonların modellenmesi için çift döngülü bir Monte Carlo benzetimi çerçevesi geliştirilmiştir. Geliştirilen çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile malzeme özelliklerinin *parçadan-parçaya* gösterdiği varyasyonlar iç döngüde modellenirken, *partiden-partiye* varyasyonlar dış döngü içerisinde modellenmiştir (Şekil 3.8). Böylece *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonları hesaplanabilmiştir.

Şekil 3.8’de gösterilen modelin üretici tarafından U-büküm süreci için uygulandığı düşünülün. Üretici,  $N_b$  adet farklı tedarikçiden partiler halinde sac levha temin etmektedir. Bu partiler arasında malzeme özelliklerinde değişim görüldüğü gibi geometrik özelliklerde de değişime rastlanır. Benzer olarak, belirli bir üreticiden sağlanan sac levhalar kullanılarak  $N_p$  adet parçanın üretileceği varsayılmıştır. Belirli bir parti için, bu parti içerisinde üretilecek parçalar arasında da malzeme ve geometrik özellikler açısından farklılıklar oluşur. İşte bu tip değişimlerin geri yaylanma üzerindeki etkilerini hesaplayabilmek için farklı parti ve parçaları dikkate alan çift döngülü Monte Carlo benzetimi oluşturulmuştur. Bu yöntemde iç içe geçmiş iki döngü bulunmaktadır. İç döngüde  $N_p$  adet farklı parçanın, dış döngüde ise  $N_b$  adet farklı partinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Toplamda  $N_b \times N_p$  adet örnekleme oluşturulmuş, *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır.

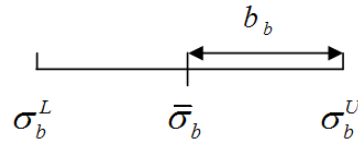


Şekil 3.8. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi modeli

Bu çalışma kapsamında incelenen U-büküm problemi için beş adet rastsal değişken belirlenmiştir. Bunlar; (i) akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ), (ii) pekleşme katsayısı ( $K$ ), (iii) normal anizotropi ( $R$ ), (iv) pekleşme üsteli ( $n$ ) ve (v) sac kalınlığı ( $t$ )'dir. Rastsal değişkenler her probleme özgü olarak değişir. Çift döngülü Monte Carlo benzetimini kolaylaştırabilmek için öncelikle en etkili rastsal değişken belirlenir ve sonrasında bu rastsal değişkenin *partiden-partiye* ve *parçadan-parçaya* olan değişimlerinin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yayılma varyasyonu üzerine etkisi incelenir. Bu çalışmada en etkili rastsal değişken, akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ) olarak belirlenmiştir. En etkili rastsal değişkenin belirlenmesi ile ilgili süreç Bölüm 4'te anlatılacaktır.

Akma gerilmesinin ortalama değerinin tüm partiler için aynı ve üretici tarafından belirtilen hedef değere eşit olduğu kabul edilmiştir. Ancak akma gerilmesine ait

standart sapma değeri her bir parti için farklı değerde alınmıştır. Çünkü her üretici farklı seviyede kalite-kontrol uygulamalarına sahiptir. Akma gerilmesinin standart sapma değerinin farklı üreticiler arasında düzgün bir yayılıma sahip olduğu kabul edilmiştir ve bu değer aralığını belirtmek için “parti sınırı” adı verilen bir değer kullanılmıştır (Şekil 3.9). Partiden-partiye varyasyonun etkilerini inceleyebilmek için altı adet parti sınırı değeri ( $b_b$ ) dikkate alınmıştır (Çizelge 3.2).



Şekil 3.9. Düzgün dağılıma sahip akma gerilmesi standart sapma değeri

Varyasyon değerinin hesaplanabilmesi için  $N_p \times N_b$  boyutlarında olan ve içerisinde Monte Carlo benzetimi ile elde edilen geri yayılma değerlerini içeren matris şu yöntem uygulanmıştır; *parçadan-parçaya* varyasyonu belirlemek için, öncelikle her bir sütunun standart sapması hesaplanır  $\sigma_{p_i}$ , sonrasında tüm sütunların standart sapma değerlerinin ortalaması  $ort(\sigma_{p_i})$  elde edilir. Hesaplanan bu değer *parçadan-parçaya* varyasyonu ifade eder. *Partiden-partiye* olan varyasyonu belirlemek için, öncelikle her bir satırın standart sapma değeri  $\sigma_{b_i}$  hesaplanır. Daha sonra tüm satırların standart sapma değerlerinin ortalaması  $ort(\sigma_{b_i})$  elde edilir. Hesaplanan bu değer *partiden-partiye* varyasyonu ifade eder.

Her bir sütun akma gerilmesinin farklı bir standart sapma değerine sahiptir. Bu standart sapma değeri, belirli bir sınır değerine ve ortalama değere sahip düzgün dağılımdan elde edilir. Yani  $N_p \times N_b$  matrisinde soldan sağa doğru, akma gerilmesinin standart sapma değeri alt sınır değerinden üst sınır değerine doğru değişir.

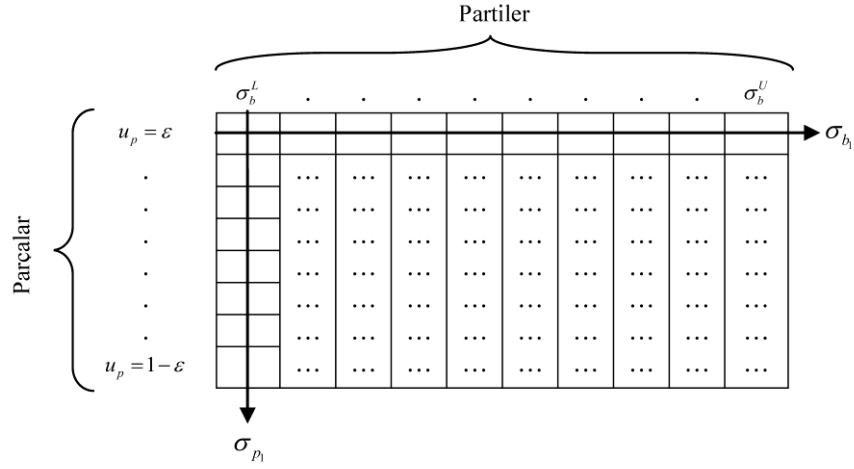


Çizelge 3.2. *Parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* varyasyon için dağılım parametreleri. Değerler [MPa] cinsindedir.

Parçadan-parçaya		Partiden-partiye						
$\mu$	$\sigma$	$\mu_{\sigma_b}$	$(b_b)_1$	$(b_b)_2$	$(b_b)_3$	$(b_b)_4$	$(b_b)_5$	$(b_b)_6$
389.3	31.1	31.1	0	5	10	15	20	25

Aynı zamanda her bir satır farklı bir akma gerilmesi değerini belirtir. İlk satırdan son satıra doğru normal dağılımdan faydalanarak rastgele sayılar üretilir. Bu rastgele sayılar farklı partilerde aynı kalite değerine sahip parçaları temsil etmektedir. Daha sonra rastgele sayılara karşılık gelen değerleri belirleyebilmek için birikimli dağılım fonksiyonu en üst sırada 0 en alt sırada 1 olacak şekilde değiştirilir. Akma gerilmesine gerçek değerler atayabilmek için birikimli dağılım fonksiyonu değeri 0 yerine  $\varepsilon = 10^{-4}$  olarak alınır. Aynı şekilde 1 yerine de  $1 - \varepsilon$  değeri kullanılır. Böylece  $N_p \times N_b$  boyutundaki matrisin sütunları farklı partileri belirtirken satırları farklı parçaları ifade eder.

Şekil 3.10'da görüleceği üzere, *partiden-partiye* varyasyon her bir satırın standart sapma değerinin ortalaması alınarak ( $ort(\sigma_{b_1}, \sigma_{b_2}, \sigma_{b_3}, \dots, \sigma_{b_{N_b}})$ ) bulunabilir. Benzer şekilde *parçadan-parçaya* varyasyon ise her bir sütunun standart sapma değerinin ortalaması hesaplanarak ( $ort(\sigma_{p_1}, \sigma_{p_2}, \sigma_{p_3}, \dots, \sigma_{p_{N_p}})$ ) elde edilebilir. Sabit bir akma gerilmesi değeri için sütunlar arasındaki standart sapma değerinin hesaplanması *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonunu verecektir. Aynı şekilde akma gerilmesinin sabit bir standart sapma değeri için satırlar arasındaki standart sapma değerinin hesaplanması *parçadan-parçaya* geri yaylanma varyasyonunu verecektir.



Şekil 3.10.  $N_p \times N_b$  boyutlu sonuç matrisinden faydalanarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* varyasyonların hesaplanması (burada  $\varepsilon = 10^{-4}$  kullanılmıştır)

#### 4. U-BÜKÜM PROBLEMİ (ANALİTİK ÇÖZÜM)

Bu bölümde, DP600 çeliklerinde U-büküm işlemi sonucu meydana gelen geri yaylanmanın miktarı ve varyasyonunun bir gürbüz optimizasyon çerçevesi içerisinde minimize edilmesi anlatılacaktır. Geri yaylanmanın tasarım değişkenleri ve rastsal değişkenlere bağlı değişimi analitik yöntemle hesaplanmıştır. Geri yaylanmanın ortalama değerinin ve varyansının tasarım değişkenlerine bağlı değişimi için ise vekil modeller kullanılmıştır. Böylelikle, optimizasyon sürecinin hesaplama yükü azaltılmıştır. Sac incelmesi değerinin belirli bir müsaade edilebilir değerden küçük olması gerekliliği gürbüz optimizasyon probleminin kısıtı olarak belirlenmiştir. Üç farklı müsaade edilebilir sac incelmesi değeri dikkate alınmış ve bu değerlerin optimizasyon sonuçları üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen hassasiyet analizi aracılığıyla problem içindeki en etkili rastsal değişken belirlenmiştir. Bahsedilen problem için çift döngülü Monte Carlo benzetimi uygulanmıştır. Bu sayede en etkili rastsal değişkenin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan varyasyonuna bağlı olarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır.

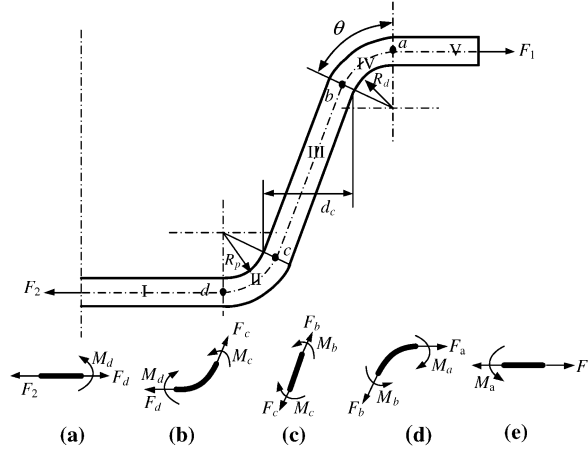
Bu bölüm içerisinde öncelikle U-büküm sürecinde meydana gelen geri yaylanmanın analitik çözümü anlatılacaktır. Daha sonra gürbüz optimizasyon probleminin tanımı yapılacaktır. Devamında üç farklı sac incelmesi değeri için gürbüz optimizasyon probleminin çözümü verilecektir. Sonrasında basit bir hassasiyet analizi gerçekleştirilerek en etkili rastsal değişken belirlenecektir. Son olarak, çift döngülü Monte Carlo benzetimi çerçevesinde hesaplanan *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyon değerleri belirtilecek ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

##### 4.1. Geri Yaylanma Analizi

Basit geometriye ve yükleme koşullarına sahip problemler için, bu bölümde yapılan çalışmadaki gibi, hesaplama avantajlarından ve gürbüz optimizasyon çalışmasına kolay uygulanabilir olmalarından ötürü analitik yöntemler tercih edilirler. Yapılan bu çalışmada, U-büküm işlemi (Şekil 4.1) sonucunda sac levhalarda oluşan geri

yaylanmasının hesaplanabilmesi için Dongjuan vd. [1] tarafından önerilen analitik model kullanılmıştır. Bu model Hill48 akma kriterini [2] ve düzlemsel gerinim durumunu esas almaktadır. Ayrıca, sac incelmesi, sac kalınlığı, pekleşme katsayısı, sac tutucu kuvveti, sürtünme katsayısı ve anizotropi değerinin etkilerini dikkate alır.

Sacın gerdirilerek büküm (sheet stretch-bending) işlemi için (Şekil 4.2) Dongjuan vd. [1] tarafından aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır;



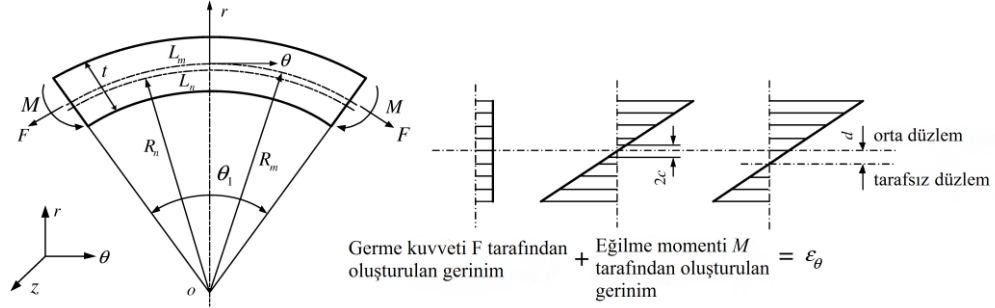
Şekil 4.1. U-büküm [1]

(i) Birim genişliğe karşılık gelen germe kuvveti (stretching force) ( $F$ ) değerinin kalınlık boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir. Bu kuvvet sac incelmesine neden olmaktadır.

(ii) Sac bükülmeden önce tarafsız düzleme dik olan hatların büküm işlemi boyunca tarafsız düzleme dik kaldığı kabul edilmiştir.

(iii) Kalınlık/genişlik oranı çok küçük olarak kabul edildiğinden  $z$  yönündeki gerinim ( $\varepsilon_z$ ) sıfır olarak alınır.

(iv) Sacın büküm işlemi boyunca hacmi sabit kabul edilir.



Şekil 4.2. Gerdirilerek yapılan sac bükümü. Burada  $L_n$  tarafsız düzlemin uzunluğunu,  $L_m$  ise sacın orta düzleminin yay uzunluğunu ifade eder. [1]

U-büküm sonrasında sacın son kalınlığı Denklem (4.1) ile hesaplanabilir.

$$t = \frac{R_n}{R_m} t_0 = \frac{\sqrt{R_i R_o}}{(R_i + R_o)/2} t_0 = \frac{\sqrt{R_i (R_i + t)}}{(R_i + (R_i + t))/2} t_0. \quad (4.1)$$

Burada  $t$  son sac kalınlığı,  $R_i$  ise kalıp yarıçapıdır. Denklem (4.2-4.4) aracılığıyla dış düzlemin ( $R_o$ ), orta düzlemin ( $R_m$ ) ve tarafsız düzlemin ( $R_n$ ) eğilme yarıçapları belirlenebilir.

$$R_o = R_i + t \quad (4.2)$$

$$R_n = \sqrt{R_i R_o} \quad (4.3)$$

$$R_m = (R_i + R_o)/2. \quad (4.4)$$

Anizotropi katsayısı ( $f$ ) Denklem (4.5) ile ifade edilebilir.

$$f = \frac{1 + R}{\sqrt{1 + 2R}}. \quad (4.5)$$

Burada  $R$  normal anizotropi değerini belirtmektedir. Elastik bölgenin yarı kalınlığı (c);

$$E_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (4.6)$$

için

$$c = \frac{f \sigma_Y R_n}{E_1} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\sigma_Y$  akma gerilmesi,  $E$  elastisite modülü ve  $E_1$  de düzlem gerinim durumundaki elastisite modülüdür. Orta düzlemden  $\pm c$  kadarlık uzaklıkta elastik deformasyonlar gözlenir.

Germe kuvveti  $F$  tarafından oluşturulan gerilme  $\sigma_{m\theta}$  ile gösterilir ve Denklem (4.8) ile hesaplanır.

$$\sigma_{m\theta} = fk \left( \varepsilon_0 + f \ln \frac{R_m}{R_n} \right)^n \quad R_n + c \leq R_m \leq R_0 \quad (4.8)$$

Burada  $k$  pekleşme katsayısı ve  $n$  ise pekleşme üstelidir. Eğilme momenti ( $M$ ) Denklem (4.9) kullanılarak elde edilebilir.

$$\begin{aligned} M = & b \int_{R_m^{-t/2}}^{R_n^{-c}} \left\{ -fk \left[ \varepsilon_0 - f \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) \right]^n - \sigma_{m\theta} \right\} (r - R_m) dr \\ & + b \int_{R_n^{-c}}^{R_n^{+c}} \left( \frac{E}{1-\nu^2} \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) - \sigma_{m\theta} \right) (r - R_m) dr \\ & + b \int_{R_n^{+c}}^{R_m^{+t/2}} \left\{ fk \left[ \varepsilon_0 + f \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) \right]^n - \sigma_{m\theta} \right\} (r - R_m) dr \end{aligned} \quad (4.9)$$

Burada  $b$  genişliktir.

Ters bükme işlemi (reverse bending process) süresince eğilme momentindeki değişim ( $\Delta M$ ) Denklem (4.10) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \Delta M = & \int_{R_n+c}^{R_o} \left\{ -fk \left[ \varepsilon_0 + f \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) - 2\bar{\varepsilon}_{\text{lim}} \right]^n - f\bar{\sigma}_s - \sigma'_{m\theta} \right\} (r - R_m) dr \\ & + \int_{R_i}^{R_n-c} \left[ fk \left( \varepsilon_0 - \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) - 2\bar{\varepsilon}_{\text{lim}} \right)^n + \bar{\sigma}_s - \sigma'_{m\theta} \right] (r - R_m) dr \\ & + \int_{R_n-c}^{R_n+c} \left\{ \left[ E_1 \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) \right] - \sigma'_{m\theta} \right\} (r - R_m) dr \end{aligned} \quad (4.10)$$

U-büküm işleminde sac levha çevrimsel yüklemelere maruz kalır. Dolayısıyla Bauschinger etkisinin [84] dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaç için yüklemeye kaldırılırkenki gerilme durumu, kinematik pekleşme modeli [85] kullanılarak tanımlanır.  $\sigma'_\theta$  yüklemeye kaldırıldıktan sonraki teğetsel gerilmedir (Denklem (4.11)).

$$|\sigma'_\theta| = \begin{cases} E_1 \left| \ln \frac{r}{R_n} \right| & R_n - c \leq r \leq R_n + c \\ fk \left( \varepsilon_0 + \left| f \ln \frac{r}{R_n} \right| - 2\bar{\varepsilon}_{\text{lim}} \right)^n + f\bar{\sigma}_s & R_i \leq r \leq R_n - c \text{ veya } R_n + c \leq r \leq R_o \end{cases} \quad (4.11)$$

Tersine yapılan gerdirerek büküm işleminden (reverse stretch bending) sonra sacın orta düzleminde meydana gelen gerilme  $\sigma'_{m\theta}$  ile gösterilir ve Denklem (4.12) ile hesaplanabilir.

$$\sigma'_{m\theta} = \sigma_{m\theta} - fk \left[ \varepsilon_0 + f \ln \left( \frac{r}{R_n} \right) - 2\bar{\varepsilon}_{\text{lim}} \right]^n - f\sigma_Y \quad (4.12)$$

Eğilme momenti hesaplandıktan sonra geri yaylanma değeri Denklem (4.13) ile elde edilebilir.

$$\Delta\theta = \int_0^\theta \frac{M(\phi)}{E_1 I} R_n d\phi ; \quad M(\phi) = M + \Delta M \quad (4.13)$$

$$\Delta\theta_{sw} = \frac{M_b L}{E_1 I} \quad ; \quad M_b = -2M \quad (4.14)$$

Burada  $\Delta\theta$ , II ve IV nolu (Şekil 4.1) bölgelerde geri yaylanma sırasında meydana gelen açısai değişimi ifade etmektedir.  $\Delta\theta_{sw}$ , geri yaylanma esnasında III nolu (Şekil 4.1) bölgedeki açısai değişimi gösterir. Birim genişliğe karşılık gelen kesitin atalet momenti ( $I = t^3 / 12$ ) ve  $L$  ise yan duvarın uzunluğudur.

Şekil verme işlemleri bittikten sonra, üretilen parçanın geometrisindeki dar açı Denklem (4.15) ile hesaplanabilir.

$$\theta = 90^\circ + \Delta\theta - (\Delta\theta_{sw} / 2) \quad (4.15)$$

İstenilen bükme açısı ile asıl elde edilen bükme açısı arasındaki fark yani geri yaylanma Denklem (4.16) aracılığıyla elde edilir.

$$\Delta\theta_{sb} = 90^\circ - \theta \quad (4.16)$$

## 4.2. Gürbüz Optimizasyon Probleminin Tanımı

Basit geometrili bu tip bir problem için gürbüz optimizasyon problemini, tek tasarım değişkeni olan kalıp yarıçapına ( $R_d$ ) bağlı olarak, Denklem (4.17-4.19)'da verildiği gibi formüle edebiliriz:

$$\text{bul} \quad R_d \quad (4.17)$$

$$\text{küçült} \quad w_1 \frac{\mu_{\Delta\theta}(R_d)}{\mu_{\Delta\theta}(R_d = (R_d)_{nom})} + w_2 \frac{\sigma_{\Delta\theta}(R_d)}{\sigma_{\Delta\theta}(R_d = (R_d)_{nom})} \quad (4.18)$$

$$\text{öyle ki} \quad \Pr \left[ \frac{\Delta t(R_d)}{t_0} \leq \frac{\Delta t_{spec}}{t_0} \right] \geq 0.99 \quad (4.19)$$



Denklem (4.17-4.19)'da geri yaylanmanın hem ortalama değeri hem de standart sapması ( $\mu_{\Delta\theta}$  ve  $\sigma_{\Delta\theta}$ ) minimize edilmektedir.  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık faktörleri, geri yaylanmanın ortalama değeri ile standart sapma değerinin önem sırasına göre belirlenir ve  $w_1+w_2=1$  eşitliğini sağlar. Örneğin, eğer geri yaylanmanın ortalama değerinin küçültülmesi, standart sapmasının küçültülmesinden daha önemli ise, ağırlık faktörleri  $w_1>w_2$  olacak şekilde belirlenir.  $(R_d)_{nom}$  kalıp yarıçapı için nominal değeri belirtir. Sac incelmesi kısıtına bağlı olarak %5, %10 ve %15'lik sac incelmesi değerlerine karşılık gelecek şekilde  $(R_d)_{nom}$  değeri sırasıyla 0.85, 0.54 ve 0.37 mm olarak belirlenmiştir. U-büküm probleminde, tek tasarım değişkeni kullandığımızdan ve sac incelmesi ile geri yaylanma birbirlerine zıt davranış gösterdiklerinden dolayı, Denklem (4.19)'daki kısıt daima "aktif" olmaktadır. Yani, kısıt fonksiyonu için daima eşitlik sağlanmaktadır. Bu durumda, kısıt fonksiyondan elde edilen  $R_d$  değeri, amaç fonksiyonundan bağımsız olarak gürbüz optimizasyon probleminin çözümü olmaktadır.

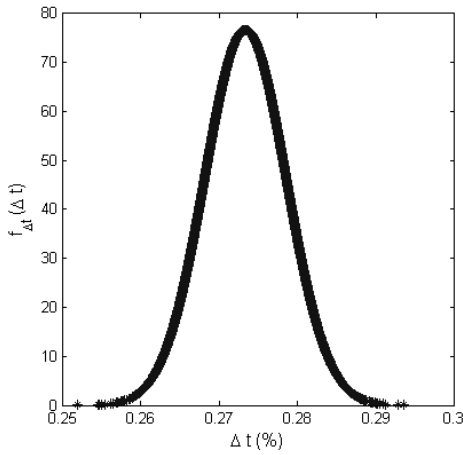
Bu çalışmada, Denklem (4.19)'daki olasılıksal kısıt için güvenilirlik değeri %99 olarak seçilmiştir. Yani, üretilen 100 adet U-profil 'den sadece bir tanesinde, sac incelme değeri önceden belirlenen bir limit değerden (%5, %10 veya %15 gibi) daha yüksek olabilir. Üç farklı sac incelmesi değeri göz önüne alınarak, izin verilebilir bu incelme değerlerinin optimum sonuç üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sac incelmesi değerinin normal dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir. Bahsedilen %99 güvenilirlik kısıtını sağlayan  $R_d$  değeri, Denklem (4.20)'de belirtildiği şekilde elde edilebilir. Kısıt olarak kullanılacak % 99 güvenilirlik değeri standart normal dağılım fonksiyonunda  $\phi(z) = 0.99$  şeklinde ifade edilmektedir ve  $z = 2.326$  değerine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla kullanacağımız olasılıksal kısıt denklemini;

$$\frac{\frac{\mu_{\Delta t}(R_d) - \Delta t_{spec}}{\sigma_{\Delta t}(R_d)}}{t_0} = z \quad (z = 2.326 \Rightarrow \phi(z) = 0.99) \quad (4.20)$$

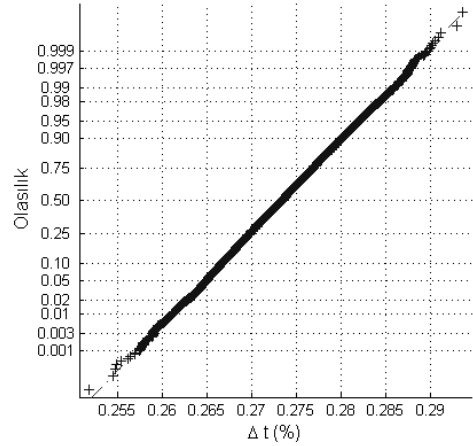
şeklinde kolaylıkla ifade edilebilecektir.

Bu hesaplamayı yapabilmek için sac incelmesinin ortalama ve standart sapma değerlerinin ( $\mu_{\Delta t}$  ve  $\sigma_{\Delta t}$ )  $R_d$  'ye bağılı olarak bilinmesi gerekir. Vekil modeller oluşturularak  $\mu_{\Delta t}$  ve  $\sigma_{\Delta t}$  değerleri  $R_d$  'ye bağılı olarak elde edilebilir. Vekil modeller oluşturulduktan sonra Denklem (4.19)'u sağılayan  $R_d$  değeri kolayca hesaplanabilir.

Burada sac incelmesinin olasılıksal dağılımının normal olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla 10,000 adet örnekleme ile Monte Carlo benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimler sonucu elde edilen sac incemesi verisinin olasılık dağılımı Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Şekil 4.4'te verilen normal olasılık grafiğinden de görüldüğü üzere sacdaki incelmenin olasılık dağılımı normal dağılıma yakındır.



Şekil 4.3. Sac incelmesinin Monte Carlo benzetimi sonucu elde edilen olasılık dağılımı ( $f_M(\Delta t)$ ), sac incelmesinin olasılık yoğunluk fonksiyonudur.)



Şekil 4.4. Sac incemesi için normal olasılık grafiği. *Örnekleme sonuçlarının normal dağılım grafiğinde 45°'ye yakın seyir izlemesi, normal dağılıma yakınlığın ölçütüdür.*

### 4.3. Optimizasyon Probleminin Çözümü

Üç farklı müsaade edilebilir sac incemesi değeri dikkate alınarak optimizasyon probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde sırasıyla %5, %10 ve %15'lik sac incemesi değerleri için yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

#### 4.3.1. % 5'lik sac incelmesi kısıtı için çözüm

%5'lik sac incelmesi değerini %99 güvenilirlikle sağlayacak  $R_d$ 'yi belirleyebilmek için, öncelikle geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalama değeri ve standart sapması için  $R_d$  cinsinden vekil modeller oluşturulmuştur. Vekil model oluşturabilmek için ilk olarak bir  $R_d$  aralığı belirlenmiş ve daha sonra geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalamasını ve standart sapmasını hesaplayabilmek amacıyla Monte Carlo benzetimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak elde edilen bu ortalama ve standart sapma değerleri ile  $R_d$  arasında vekil modeller meydana getirilmiştir. Çizelge 4.1'de verildiği gibi, 0.7 ile 1.0 mm aralığında 7 adet  $R_d$  değeri seçilmiş ve Monte Carlo benzetimleri ile sac incelmesinin ve geri yaylanmanın ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır. Vekil modeller oluşturulduktan sonra %5'lik sac incelmesini sağlayan  $R_d$  değeri ve bu değere karşılık gelen geri yaylanma miktarı kolaylıkla belirlenebilir.

Çizelge 4.1. 0.7-1.0 mm aralığındaki  $R_d$  değerleri için Monte Carlo benzetimi (10,000 adet örnekleme) sonuçları

No	$R_d$ (mm)	Geri yaylanma (sb) (°)			Sac incelmesi (st) (%)		
		Ort. <sup>(a)</sup>	Std. <sup>(b)</sup>	COV <sup>(c)</sup>	Ort.	Std.	COV
1	0.7	2.3256	0.105	0.04515	6.278	0.08	0.01274
2	0.75	2.3438	0.1075	0.04587	5.7591	0.0752	0.01306
3	0.8	2.3622	0.1105	0.04678	5.3044	0.0704	0.01327
4	0.85	2.3831	0.1124	0.04717	4.8985	0.0668	0.01364
5	0.9	2.4039	0.115	0.04784	4.539	0.063	0.01388
6	0.95	2.4216	0.1175	0.04852	4.2178	0.0596	0.01413
7	1	2.4475	0.1201	0.04907	3.9297	0.0564	0.01435

<sup>(a)</sup>Ortalama değer; <sup>(b)</sup>Standart sapma ; <sup>(c)</sup>Varyasyon katsayısı

Çizelge 4.1'deki veriler için, ikinci dereceden polinom yanıt yüzey (PYY2), radyal-tabanlı fonksiyonlar (RTF) ve Kriging (sabit trend modeli, KR0 ve birinci dereceden

trend modeli, KR1) vekil model türleri oluşturulmuştur. Oluşturulan vekil modellerin doğruluk dereceleri, veri noktalarında yapılan çapraz doğrulama yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu yöntem ile 7 adet veri noktasında, önce her bir nokta veri havuzundan geçici olarak silinmiş, bir vekil model oluşturulmuş ve bu vekil model ile silinen veri noktasında tahmin yapılmış ve hata hesaplanmıştır. Tüm veri noktaları için bu işlem yapıldıktan sonra, çapraz doğrulama hatalarının karekök ortalama hata karesi (KOHK), ortalama mutlak hata (OMH) ve maksimum mutlak hata (MMH) değerleri hesaplanmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.2 ve 4.3'te sunulmuştur.

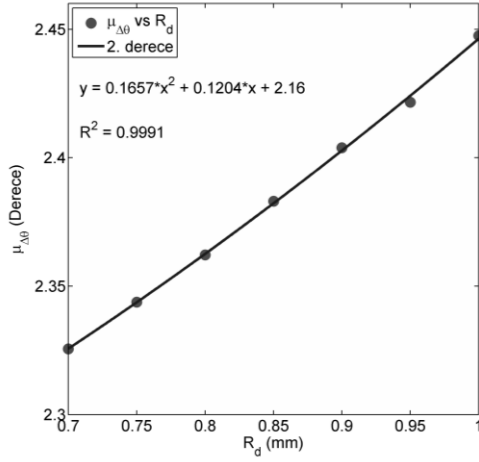
Çizelge 4.2'de geri yaylanmanın ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin doğruluk dereceleri verilmiştir. Geri yaylanmanın ortalama değeri için PYY2, standart sapması için ise KR1 en uygun vekil model türü olarak belirlenmiştir. Standart sapma için oluşturulan vekil modeller içinde ikinci en uygun model PYY2'dir. PYY2 vekil modellerinin hem oluşturulması hem de yorumlanması (matematiksel ifadesi daha kolay ve nettir) diğer vekil model tiplerine göre daha kolaydır. Dolayısıyla, geri yaylanmanın hem ortalama değeri hem de standart sapması için PYY2 kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.2'de sunulan hata metrikleri Çizelge 4.1'de sunulan değerlerle karşılaştırıldığında, oluşturulan vekil modellerin oldukça doğru olduğu görülmektedir. Oluşturulan PYY2 modelleri Şekil 4.5 ve 4.6'da sunulmuştur. Elde edilen yüksek  $R^2$  değerleri (şekiller üzerinde gösterilmiştir) de PYY2'nin doğruluğunu tescil etmektedir.

Geri yaylanmanın ortalama değeri ve standart sapmasına benzer olarak sac incelmesinin ortalama değeri ve standart sapması için de vekil modeller oluşturulmuştur. Çizelge 4.3'te sac incelmesinin ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin doğruluk dereceleri verilmiştir. Sac incelmesinin ortalama değeri için RTF, standart sapması için ise PYY2 en uygun vekil model türü olarak belirlenmiştir.

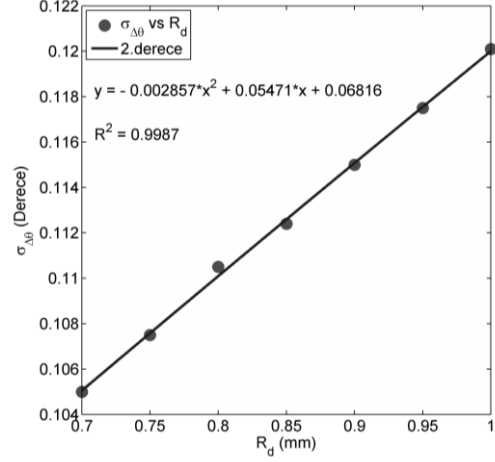
Çizelge 4.2. Geri yaylanmanın ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti. *En küçük hata metriği kalın punto ile gösterilmiştir.*

Vekil model	Geri yaylanma ortalaması			Geri yaylanma standart sapması		
	KOHK <sup>(a)</sup>	OMH <sup>(b)</sup>	MMH <sup>(c)</sup>	KOHK <sup>(a)</sup>	OMH <sup>(b)</sup>	MMH <sup>(c)</sup>
PYY2	<b>0.0024</b>	<b>0.0017</b>	<b>0.0048</b>	0.0003	0.0003	0.0006
RTF	0.0053	0.0035	0.0105	0.0048	0.0032	0.0088
KR0	0.0046	0.0027	0.0115	0.0013	0.0010	0.0029
KR1	0.0031	0.0024	0.0060	<b>0.0002</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0005</b>

(a)KOHK: karekök ortalama hata karesi; (b)OMH: ortalama mutlak hata; (c)MMH: maksimum mutlak hata

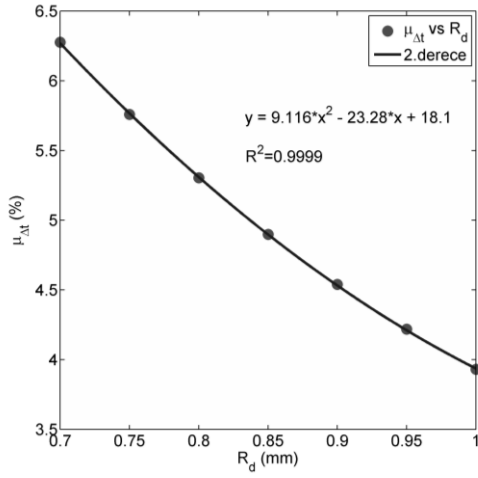


Şekil 4.5. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi

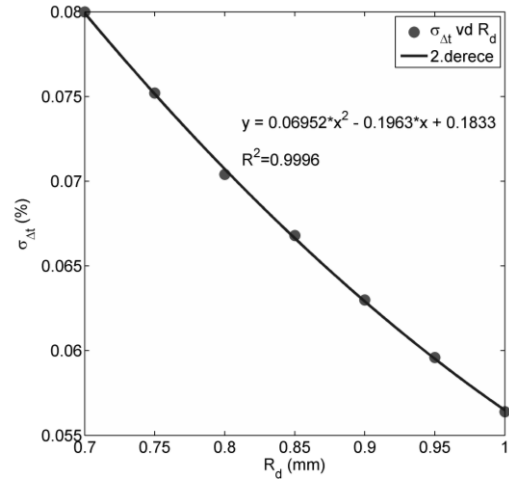


Şekil 4. 6. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi

Daha önce de bahsedildiği gibi, PYY2 modellerinin hem oluşturulması hem de yorumlanması daha kolay olduğundan, sac incelmesinin hem ortalama değeri hem de standart sapması için PYY2 kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 4.7 ve 4.8).



Şekil 4. 7. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi



Şekil 4.8. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi

Geri yaylanma ve sac incelmesi için oluşturulan PYY2 vekil modelleri Denklem (4.21-24) ile gösterilmiştir. Bunlar;

0.7 mm ≤ R<sub>d</sub> ≤ 1.0 mm olduğunda ortalama geri yaylanma değeri için,

$$\mu_{\Delta\theta} = 0.1657R_d^2 + 0.1204R_d + 2.16 ; R^2 = 0.9991 \quad (4.21)$$

0.7 mm ≤ R<sub>d</sub> ≤ 1.0 mm olduğunda geri yaylanmanın standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta\theta} = -0.002857R_d^2 + 0.05471R_d + 0.06816; R^2 = 0.9987 \quad (4.22)$$

0.7 mm ≤ R<sub>d</sub> ≤ 1.0 mm olduğunda sac incelmesinin ortalama değeri (%) için,

$$\mu_{\Delta t} = 9.116R_d^2 - 23.28R_d + 18.1; R^2 = 0.9999 \quad (4.23)$$

0.7 mm ≤ R<sub>d</sub> ≤ 1.0 mm olduğunda sac incelmesinin standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta t} = 0.06592R_d^2 - 0.1963R_d + 0.1833; R^2 = 0.9996 \quad (4.24)$$

Çizelge 4.3. Sac incelmesinin ortalama değeri ve standart sapması için oluşturulan vekil modellerin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti. *En küçük hata metriği kalın punto ile gösterilmiştir.*

Vekil model	Sac incelmesinin ortalaması			Sac incelmesinin standart sapması		
	KOHK <sup>(a)</sup>	OMH <sup>(b)</sup>	MMH <sup>(c)</sup>	KOHK <sup>(a)</sup>	OMH <sup>(b)</sup>	MMH <sup>(c)</sup>
PYY2	0.0175	0.0140	0.0313	<b>0.0003</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0005</b>
RTF	<b>0.0138</b>	<b>0.0092</b>	<b>0.0257</b>	0.0037	0.0025	0.0068
KR0	0.0139	0.0093	0.0294	0.0013	0.0011	0.0011
KR1	0.0186	0.0126	0.0388	0.0008	0.0006	0.0017

<sup>(a)</sup> KOHK: karekök ortalama hata karesi; <sup>(b)</sup> OMH: ortalama mutlak hata; <sup>(c)</sup> MMH: maksimum mutlak hata

Denklem (4.23 ve 4.24) gürbüz optimizasyon kısıt denklemi olan Denklem (4.20)'de kullanılarak %5'lik sac incelmesi değerini %99'luk güvenilirlikle sağlayan kalıp yarıçapı değeri  $R_d = 0.96mm$  olarak hesaplanmıştır. Bu yarıçap değeri için sac incelmesinin ortalama değeri PYY2 ile yaklaşık %4.15 olarak hesaplanmıştır.  $R_d = 0.96mm$  için Monte Carlo benzetimi yapıldığında (10,000 örnekleme), sac incelmesinin ortalama değeri yaklaşık %4.16 olarak elde edilmiştir. Bu da, kullanılan PYY2 modellerinin doğru sonuç verdiğini göstermektedir.

#### 4.3.2. %10'luk sac incelmesi için çözüm

%5'lik sac incelmesi çalışmasına benzer olarak, %10'luk sac incelmesi değerini güvenli bir şekilde sağlayacak  $R_d$ 'yi belirleyebilmek için yeni PYY2 modelleri oluşturulmuştur. Çizelge 4.4'te verildiği gibi, kalıp yarıçapı  $R_d$  için 0.48 ile 0.6 mm aralığında 7 adet değer belirlenmiştir. %5'lik sac incelmesi için yapılan çalışma ışığında, tüm yanıtlar için PYY2 modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller Şekil 4.9-4.12'de sunulmuştur. %5'lik sac incelme durumunda da olduğu gibi, yüksek  $R^2$  değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. 0.48-0.6 mm aralığındaki  $R_d$  değerleri için Monte Carlo benzetimi  
(10,000 örnekleme)

No	$R_d$ (mm)	Geri yaylanma (sb) (°)			Sac incelmesi (st) (%)		
		Ort. <sup>(a)</sup>	Std. <sup>(b)</sup>	COV <sup>(c)</sup>	Ort. <sup>(a)</sup>	Std. <sup>(b)</sup>	COV <sup>(c)</sup>
1	0.48	2.2628	0.0943	0.04167	9.6877	0.1065	0.01099
2	0.5	2.2668	0.0953	0.04204	9.2721	0.1037	0.01118
3	0.52	2.2714	0.0962	0.04235	8.8833	0.1009	0.01136
4	0.54	2.2762	0.0972	0.0427	8.5191	0.0983	0.01154
5	0.56	2.2815	0.0981	0.043	8.1773	0.0957	0.0117
6	0.58	2.287	0.0991	0.04333	7.856	0.0932	0.01186
7	0.6	2.2928	0.1001	0.04366	7.5537	0.0908	0.01202

<sup>(a)</sup>Ortalama; <sup>(b)</sup>Standart sapma; <sup>(c)</sup>Varyasyon katsayısı

Çizelge 4.4'teki veriler kullanılarak geri yaylanma ve sac incelmesi için oluşturulan PYY2 modelleri Denklem (4.25-4.28)'de belirtilmiştir. Bunlar;

0.48 mm  $\leq R_d \leq$  0.60 mm olduğunda ortalama geri yaylanma değeri için,

$$\mu_{\Delta\theta} = 0.4315R_d^2 - 0.2152R_d + 2.267 ; R^2 = 0.9999 \quad (4.25)$$

0.48 mm  $\leq R_d \leq$  0.60 mm olduğunda geri yaylanmanın standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta\theta} = 0.008929R_d^2 + 0.03839R_d + 0.07384 ; R^2 = 0.9998 \quad (4.26)$$

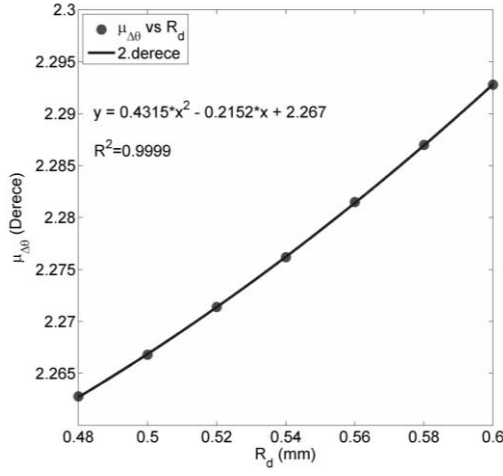
0.48 mm  $\leq R_d \leq$  0.60 mm olduğunda sac incelmesinin ortalama değeri (%) için,

$$\mu_{\Delta t} = 28.24R_d^2 - 48.25R_d + 26.34 ; R^2 = 0.9999 \quad (4.27)$$

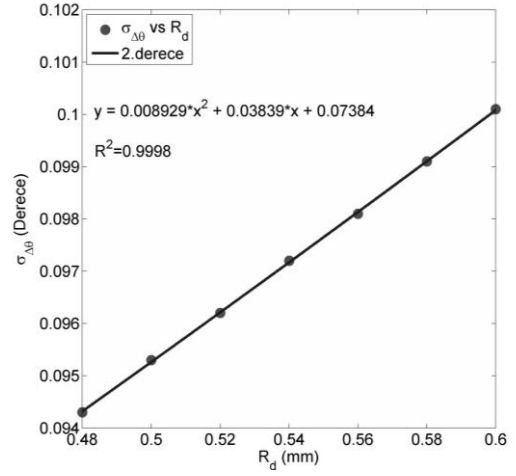
0.48 mm  $\leq R_d \leq$  0.60 mm olduğunda sac incelmesinin standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta t} = 0.1042R_d^2 - 0.2434R_d + 0.1993 ; R^2 = 0.9999 \quad (4.28)$$

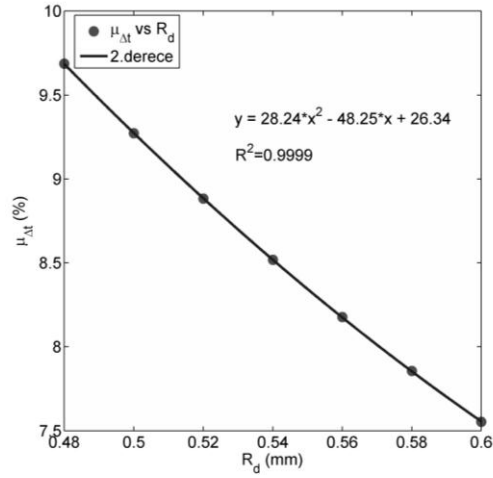




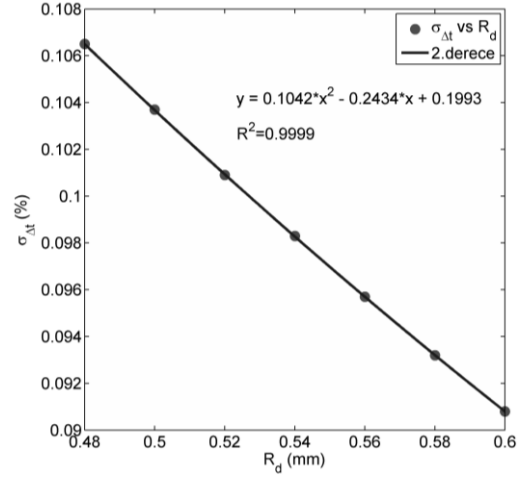
Şekil 4.9. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi



Şekil 4.10. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi



Şekil 4.11. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi



Şekil 4.12. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi

Denklem (4.27 ve 4.28)'de gösterilen PYY2 denklemleri, Denklem (4.20)'de kullanılarak %10'luk sac incelmesi değerini %99'luk güvenilirlikle sağlayan kalıp yarıçapı  $R_d = 0.56mm$  olarak hesaplanmıştır. Bu yarıçap değeri için sac incelmesinin

ortalama değeri PYY2 ile yaklaşık %8.18 olarak hesaplanmıştır.  $R_d = 0.56mm$  için Monte Carlo benzetimi yapıldığında (10,000 örnekleme), sac incelmesinin ortalama değeri yaklaşık %8.18 olarak elde edilmiştir.

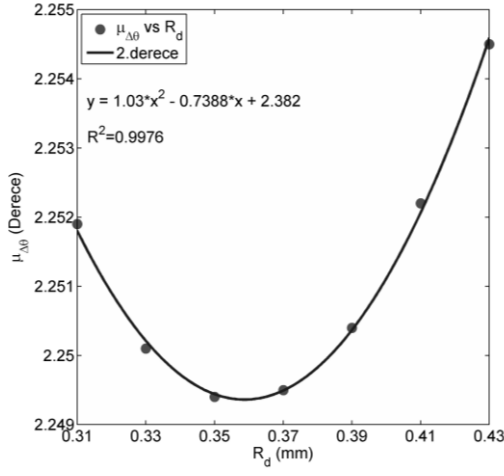
#### 4.3.3. %15'lik sac incelmesi için çözüm

Son olarak, %15'lik sac incelmesi değerini güvenli bir şekilde sağlayacak  $R_d$ 'yi belirleyebilmek için yeni PYY2 modelleri oluşturulmuştur. Çizelge 4.5'te verildiği gibi, kalıp yarıçapı  $R_d$  için 0.31 ile 0.43 mm aralığında 7 adet değer belirlenmiştir. Yine, tüm yanıtlar için PYY2 modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller Şekil 4.13-4.16'da sunulmuştur. Oluşturulan tüm vekil modeller için, yüksek  $R^2$  değerleri elde edilmiştir.

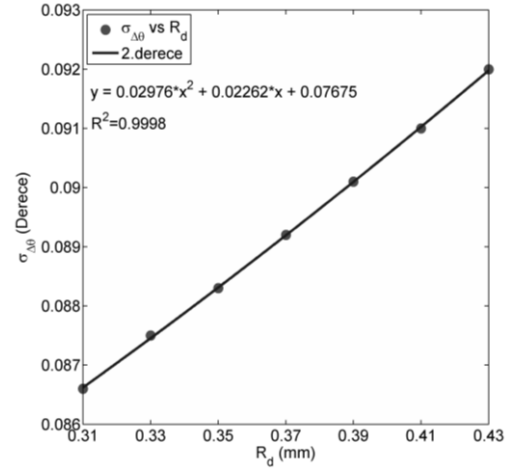
Çizelge 4.5. 0.31-0.43 mm aralığındaki  $R_d$  değerleri için Monte Carlo benzetimi (10000 adet örnekleme) sonuçları

No	$R_d$ (mm)	Geri yaylanma (sb) (°)			Sac incelmesi (st) (%)		
		Ort. <sup>(a)</sup>	Std. <sup>(b)</sup>	COV <sup>(c)</sup>	Ort.	Std.	COV
1	0.31	2.2519	0.0866	0.03846	14.8042	0.1342	0.00906
2	0.33	2.2501	0.0875	0.03889	14.0026	0.1306	0.00933
3	0.35	2.2494	0.0883	0.03925	13.2682	0.1270	0.00957
4	0.37	2.2495	0.0892	0.03965	12.5933	0.1236	0.00981
5	0.39	2.2504	0.0901	0.04004	11.9711	0.1204	0.01006
6	0.41	2.2522	0.091	0.0404	11.3958	0.1172	0.01028
7	0.43	2.2545	0.092	0.04081	10.8626	0.1139	0.01049

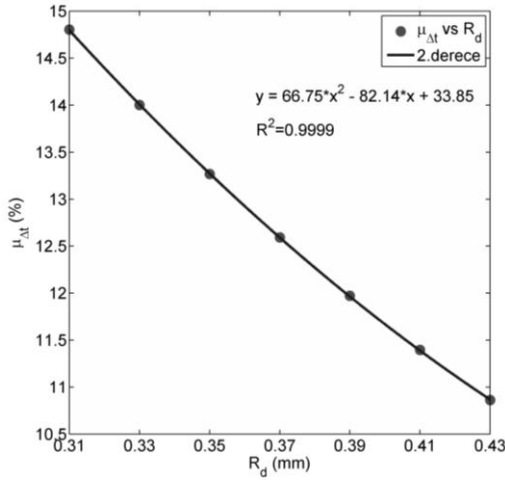
<sup>(a)</sup>Ortalama değer; <sup>(b)</sup>Standart sapma ; <sup>(c)</sup>Varyasyon katsayısı



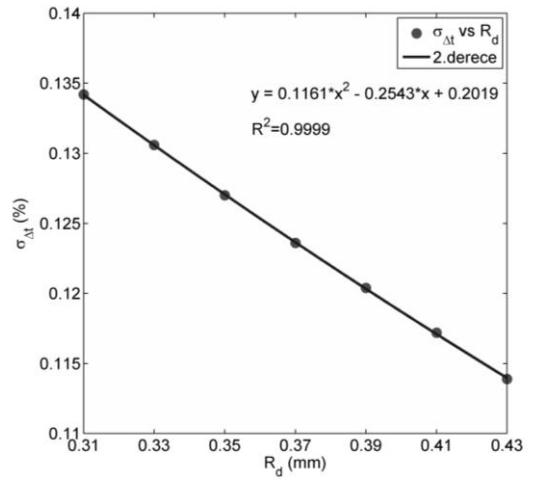
Şekil 4.13. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma ortalama değeri değişimi



Şekil 4.14. Kalıp yarıçapına bağlı olarak geri yaylanma standart sapmasının değişimi



Şekil 4.15. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi ortalama değerinin değişimi



Şekil 4.16. Kalıp yarıçapına bağlı olarak sac incelmesi standart sapmasının değişimi

Çizelge 4.5'teki veriler kullanılarak geri yaylanma ve sac incelmesi için oluşturulan PYY2 modelleri Denklem (4.29-4.32)'de belirtilmiştir. Bunlar;

0.31 mm  $\leq R_d \leq$  0.43 mm olduğunda ortalama geri yaylanma değeri için,

$$\mu_{\Delta\theta} = 1.03R_d^2 - 0.7388R_d + 2.382 ; R^2 = 0.9976 \quad (4.29)$$

0.31 mm  $\leq R_d \leq$  0.43 mm olduğunda geri yaylanmanın standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta\theta} = 0.02976R_d^2 + 0.02262R_d + 0.07675 ; R^2 = 0.9998 \quad (4.30)$$

0.31 mm  $\leq R_d \leq$  0.43 mm olduğunda sac incelmesinin ortalama değeri (%) için,

$$\mu_{\Delta t} = 66.75R_d^2 - 82.14R_d + 33.85 ; R^2 = 0.9999 \quad (4.31)$$

0.31 mm  $\leq R_d \leq$  0.43 mm olduğunda sac incelmesinin standart sapması için,

$$\sigma_{\Delta t} = 0.1161R_d^2 - 0.2543R_d + 0.2019 ; R^2 = 0.9999 \quad (4.32)$$

Denklem (4.31 ve 4.32)'de gösterilen PYY2 denklemleri, Denklem (4.20)'de kullanılarak %15'lik sac incelmesi değerini %99'luk güvenilirlikle sağlayan kalıp yarıçapı  $R_d = 0.38mm$  olarak hesaplanmıştır. Bu yarıçap değeri için sac incelmesinin ortalama değeri PYY2 ile yaklaşık %12.27 olarak hesaplanmıştır.  $R_d = 0.38mm$  için Monte Carlo benzetimi yapıldığında (10000 örnekleme), sac incelmesinin ortalama değeri yaklaşık %12.28 olarak elde edilmiştir.

4.3.1'den 4.3.3'e kadar olan bölümlerde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda görülmüştür ki müsaade edilebilir sac incelmesi değeri arttıkça optimum kalıp yarıçapı değeri küçüldüğü böylece geri yaylanmanın hem büyüklüğü hem de varyasyonu azaldığı görülmüştür. Çizelge 4.6'da standart sapma ifadesi yerine varyasyon katsayısı (standart sapmanın ortalama değere oranı) ifadesinin kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. Müsaade edilebilir sac incelmeye bağı olarak kalıp yarıçapı ile geri yaylanmanın ve sac incelmeye büyüklük ve varyasyonunun değışimi

Müsaade edilebilir sac incelmeye (%)	Kalıp yarıçapı ( $R_d$ ) (mm)	Geri yaylanma (sb) (°)		Sac incelmeye (st) (%)	
		Ortalama	COV <sup>(a)</sup>	Ortalama	COV <sup>(a)</sup>
5	0.96	2.427	0.049	4.160	0.014
10	0.56	2.282	0.043	8.177	0.012
15	0.38	2.250	0.040	12.282	0.010

<sup>(a)</sup>Varyasyon katsayısı

#### 4.4 Deterministik ve Gürbüz Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Gürbüz optimizasyonun deterministik optimizasyona göre sağladığı avantajları vurgulayabilmek için (4.17)-(4.19) deterministik yaklaşımla, tüm rastsal değışkenler ortalama değeri aldıklarında, çözülmüştür. Gürbüz optimizasyon ve deterministik optimizasyon ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7’de karşılaştırılmıştır. Beklenildiği gibi deterministik optimizasyon sonucunda sac incelmeye güvenirlilik değeri izin verilen incelmeye değeri olduğunda düşük olduğu (%50 civarında) görülmüştür. Bu durum, üretim sonrasında sac levhalarda meydana gelecek kalınlık incelmeye değeri %50 ihtimalle izin verilen değeri daha düşük çıkacağını göstermektedir. Diğer yandan bu güvenirlilik değeri gürbüz optimizasyon süreci ile %99’a yükselmektedir. Yani her 100 adet parçadan yalnızca 1 tanesinin izin verilen sac incelmeye değeri geçme ihtimali vardır. Gürbüz optimizasyon durumu içi elde edilen optimum  $R_d$  değeri deterministik optimizasyon ile belirlenen  $R_d$  değeri büyü olduğu görülmüştür. Dolayısıyla gürbüz optimizasyona karşılık gelen geri yaylanma değeri deterministik olana kıyasla daha yüksek çıkmaktadır. Bu noktada sac incelmeye güvenirliliğini yüksek tutabilmek adına biraz daha büyük geri yaylanma değeriyle karşılaşabilme durumu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.7. Deterministik ve gürbüz optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

$\Delta t$ [%]	Deterministik Opt.			Gürbüz Opt.		
	$R_d$ [mm]	Güvenilirlik [%]	$\Delta\theta$ [°]	$R_d$ [mm]	Güvenilirlik [%]	$\Delta\theta$ [°]
5	0.83	50.9	2.36	0.96	99.0	2.42
10	0.47	53.6	2.25	0.56	99.0	2.28
15	0.31	57.5	2.24	0.38	99.0	2.25

#### 4.5. Hassasiyet Analizi

Bu bölümde basit bir hassasiyet analizi ile geri yaylanmaya en çok etki eden rastsal değişken belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ilgilendiğimiz problemdeki beş adet rastsal değişken ( $\sigma_y$ , akma gerilmesi;  $K$ , pekleşme katsayısı;  $R$ , normal anizotropi;  $n$ , pekleşme üsteli ve  $t$ , sac kalınlığı) için bu değişkenlerin daha önceden belirlenen ortalama değerlerine ek olarak alt ve üst sınır değerleri belirlenmiştir. Bu sınırlar normal ve düzgün dağılım gösteren değişkenler için  $\mu \pm 3\sigma$  olarak ele alınmıştır ve değişkenlere ait tüm değerler Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

Her bir rastsal değişkenin geri yaylanma üzerine olan etkisi şu şekilde belirlenmiştir: (i) İncelenecek olan rastsal değişkenin değeri sırasıyla  $\mu - 3\sigma$  ve  $\mu + 3\sigma$  olarak seçilirken diğer rastsal değişkenlerin değerleri ortalama değerlerinde tutulmuştur. (ii) Seçilen bu iki değere karşılık gelen geri yaylanma değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.9). (iii) Hesaplanan bu geri yaylanma değerleri arasındaki fark o rastsal değişkenin etkisini belirleyen bir ölçüt olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.8’deki ikinci kolon, ilgilenilen rastsal değişkenin  $\mu - 3\sigma$  değerini diğer rastsal değişkenlerin ise ortalama değerlerin aldıkları durumdaki geri yaylanma sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4.8. Rastсал değişkenlerin ortalama ve sınır değerleri

	$\mu - 3\sigma$	$\mu$	$\mu + 3\sigma$
$\sigma_Y$ (MPa)	295.87	389.30	482.73
$K$ (MPa)	1023.76	1060.49	1097.23
$R$	1.03	1.135	1.24
$n$	0.2004	0.2054	0.2104
$t$ (mm)	0.77	0.8	0.83

Örneğin, akma gerilmesi  $\sigma_Y = \mu - 3\sigma = 295.87 \text{ MPa}$  değerini ve diğer rastсал değişkenler de ortalama değerlerini aldıklarında geri yaylanma  $\theta = 2.09^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, Çizelge 4.8'deki üçüncü kolon, ilgilenilen rastсал değişkenin  $\mu + 3\sigma$  değerini diğer rastсал değişkenlerin ise ortalama değerlerini aldıkları durumdaki geri yaylanma sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 4.9'daki dördüncü kolon, aynı çizelgedeki ikinci ve üçüncü kolonlar arasındaki farkı gösterir. Beşinci kolon ise dördüncü kolonun normalize edilmiş değerlerini göstermektedir. Çizelge 4.9'daki beşinci kolondan da görüleceği üzere, beş farklı parametreden biri olan akma gerilmesinin ( $\sigma_Y$ ) sonuca en çok etki eden parametre olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.9. Rastсал değişkenlerin geri yaylanma üzerine etkisi.  $\mu_{\Delta\theta} = 2.42^\circ$

Değişken	$\Delta\theta_{\mu-3\sigma}$ ( $^\circ$ )	$\Delta\theta_{\mu+3\sigma}$ ( $^\circ$ )	$ \Delta\theta_{\mu+3\sigma} - \Delta\theta_{\mu-3\sigma} $ ( $^\circ$ )	Normalize etkiler
$\sigma_Y$	2.09	2.75	0.66	68.1
$K$	2.38	2.46	0.08	8.3
$R$	2.38	2.47	0.09	9.2
$n$	2.43	2.41	0.02	2.1
$t$	2.48	2.36	0.12	12.3

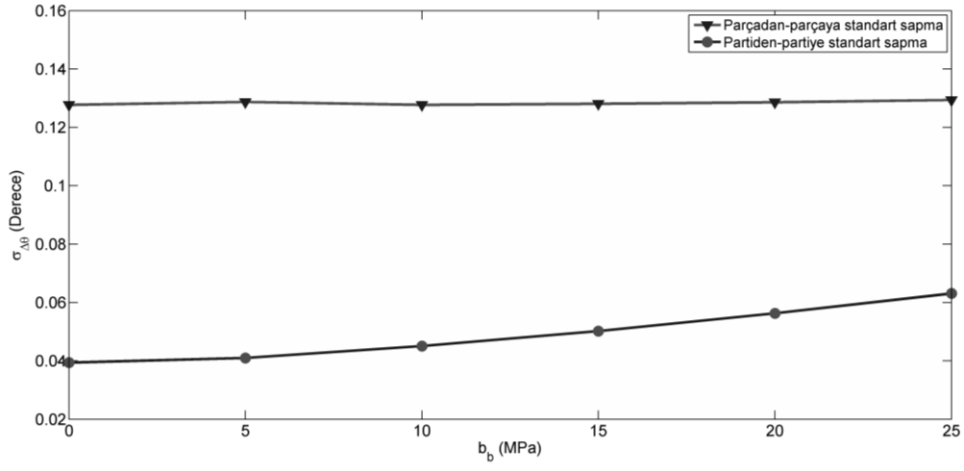
#### 4.6. Parçadan-Parçaya ve Partiden-Partiye Geri Yaylanma Varyasyonu Hesabı

Bölüm 3.3'te anlatılan yöntemle gerçekleştirilen çift döngülü Monte Carlo benzetimlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir. Akma gerilmesinin “parti sınırı” değeri ( $b_b$ ) arttıkça, *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonunun ( $\sigma_b$ ) *parçadan-parçaya* geri yaylanma varyasyonuna ( $\sigma_p$ ) olan oranının da arttığı görülmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur; çünkü her bir partiye ait akma gerilmesi standart sapma değerinin belirlendiği değer aralığı genişledikçe partiler arasındaki akma gerilmesi standart sapma değerinin farklılığı artacaktır. Dolayısıyla farklı partilerden üretime girecek sac levhaların akma gerilmesi değerleri de o denli farklılık gösterecek ve bu durumda da *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonunda artış meydana gelecektir. Geri yaylanma standart sapma değerinin  $R_d = 0.96mm$  için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi Şekil 4.17'de gösterilmiştir.  $R_d = 0.56mm$  ve  $R_d = 0.38mm$  için elde edilen sonuçlar da  $R_d = 0.96mm$  için elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir (Şekil 4.18 ve 4.19).

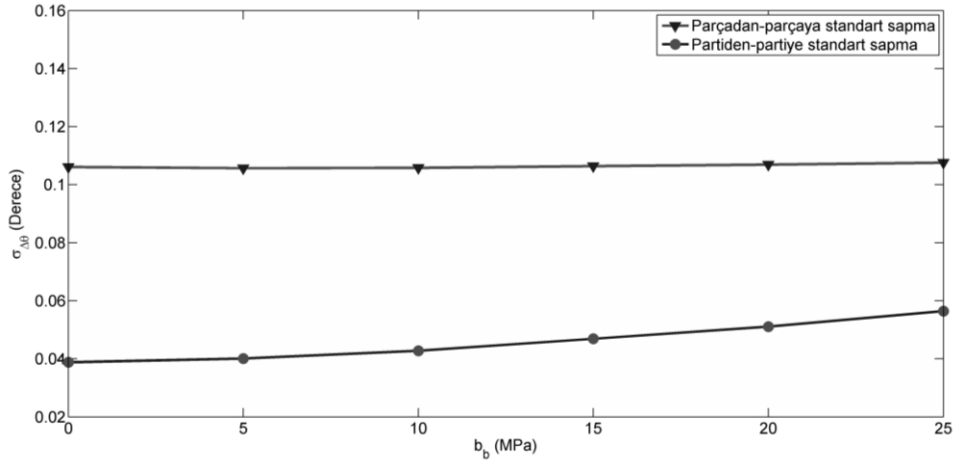
Çizelge 4.10. Çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile elde edilen sonuçlar

$R_d$ [mm]	$b_b$	$\sigma_p$	$\sigma_b$	Toplam	% $\sigma_p$	% $\sigma_b$
0.38	0	0.0964	0.0398	0.1362	70.8	29.2
	5	0.0962	0.0407	0.1369	70.3	29.7
	10	0.0963	0.0428	0.1391	69.2	30.8
	15	0.0970	0.0463	0.1433	67.7	32.3
	20	0.0975	0.0497	0.1472	66.2	33.8
	25	0.0981	0.0539	0.1520	64.5	35.5
0.56	0	0.1061	0.0388	0.1449	73.2	26.8
	5	0.1057	0.0401	0.1458	72.5	27.5
	10	0.1058	0.0428	0.1486	71.2	28.8
	15	0.1064	0.0469	0.1533	69.4	30.6
	20	0.1069	0.0511	0.1580	67.7	32.3
	25	0.1076	0.0564	0.1640	65.6	34.4
0.96	0	0.1277	0.0394	0.1671	76.4	23.6
	5	0.1287	0.0410	0.1697	75.8	24.2
	10	0.1277	0.0451	0.1728	73.9	26.1
	15	0.1281	0.0502	0.1783	71.8	28.2
	20	0.1286	0.0563	0.1849	69.6	30.4
	25	0.1294	0.0631	0.1925	67.2	32.8

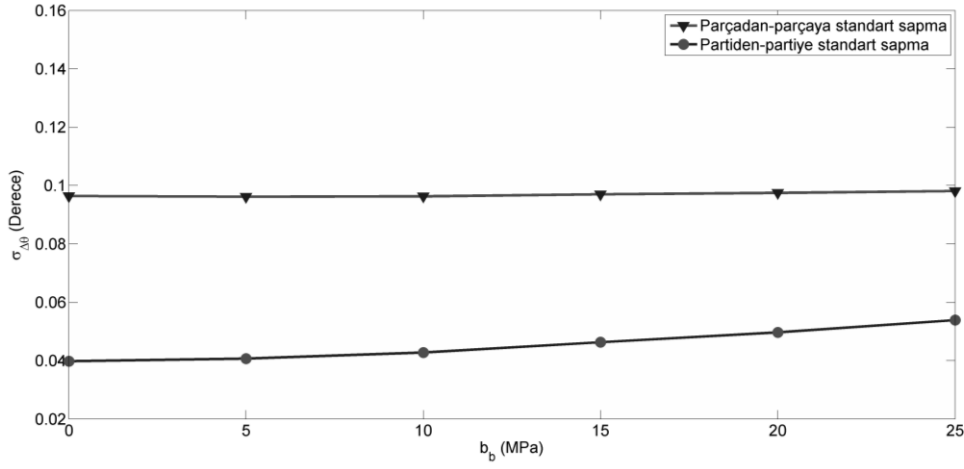




Şekil 4.17. Geri yılanma standart sapma değerinin  $R_d = 0.96mm$  için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.18. Geri yılanma standart sapma değerinin  $R_d = 0.56mm$  için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi



Şekil 4.19. Geri yaylanma standart sapma değerinin  $R_d = 0.38mm$  için belirlenen parti sınırı değerine bağlı olarak değişimi

#### 4.7. Tartışma

Bu bölümde DP600 çeliklerinde U-büküm işlemi sonucu meydana gelen geri yaylanmanın miktarı ve varyasyonunun bir gürbüz optimizasyon çerçevesi içerisinde minimize edilme süreci anlatılmıştır. Geri yaylanma değerini hesaplayabilmek için analitik model kullanılmıştır. Sac incilmesi olasılıksal bir kısıt olarak ifade edilmiş ve bu kısıta bağlı olarak geri yaylanmanın hem büyüklüğünü hem de varyasyonunu minimize edecek gürbüz optimizasyon formülasyonu oluşturulmuştur. Olasılıksal kısıt için güvenilirlik değeri %99 olarak belirlenmiştir. Monte Carlo benzetimi aracılığıyla geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalama değeri ve varyasyonu hesaplanmıştır.

Eğer Monte Carlo benzetimleri doğrudan gürbüz optimizasyon sürecine entegre edilseydi hesaplama yükü çok fazla olacaktı. Bu hesaplama yükünü azaltabilmek amacıyla geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalama değer ve varyasyon tahmini için vekil modeller oluşturulmuştur. Dört farklı vekil model tipi kullanılmıştır. Bunlar; ikinci dereceden polinom yanıt yüzey (PYY2), radyal-tabanlı fonksiyonlar (RTF) ve Kriging'dir (sabit eğilim modeli, KR0 ve birinci dereceden eğilim modeli,

KR1). PYY2 geri yaylanmanın ortalama değeri için en uygun, varyasyonu için ise ikinci en uygun vekil model tipi olarak belirlenmiştir. PYY2 vekil modellerinin hem oluşturulması hem de yorumlanması diğer vekil model tiplerine göre daha kolay olduğundan optimizasyon sürecinde PYY2 vekil modelleri kullanılmıştır.

Üç farklı müsaade edilebilir sac incelmesi değeri (%5, %10, %15) dikkate alınmış ve bu değerlerin optimizasyon sonuçları üzerine olan etkisi incelenmiştir. Müsaade edilebilir sac incelmesi değeri arttıça optimum kalıp yarıçapı ( $R_d$ ) değerinin küçüldüğü böylece geri yaylanmanın hem büyüklüğü hem de varyasyonu azaldığı görülmüştür.

Aynı problemin gürbüz ve deterministik optimizasyon ile yapılan çözümleri karşılaştırılmıştır. Gürbüz optimizasyonda değişkenlerin sahip olduğu olasılıksal değişimler göz önünde bulundurulduğunda deterministik sürece kıyasla sac incelmesini güvenli bölgede tutulmasını sağlayacak kalıp yarıçapının hesaplanan optimum değerleri, sac incelmesi güvenilirliğini % 50’li mertebelerden %99’a doğru yükseltmiştir. Bunun sonucu olarak da, gürbüz optimizasyonda deterministik optimizasyona göre biraz daha yüksek geri yaylanma değerleri elde edilmiştir. Yani, sac incelmesinin belli bir değerin altında tutma ihtimalini yükseltebilmek için geri yaylanmadan biraz ödün vermek gerekmektedir.

Basit bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiş ve *akma gerilmesi* en etkili rastsal değişken olarak belirlenmiştir.

Çift döngülü Monte Carlo benzetimi yöntemi kullanılarak farklı malzeme özelliklerine sahip partilerin ve farklı parçaların geri yaylanma varyasyonu üzerine olan etkisi incelenmiştir. Akma gerilmesinin *partiden-partiye* olan varyasyon değeri arttıça, *parçadan-parçaya* geri yaylanma varyasyonunun değişmediği, fakat *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu arttığı görülmüştür.

## 5. U-BÜKÜM PROBLEMİ (SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ)

Geri yaylanmanın hesaplanabilmesi için deneysel, analitik ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) şeklinde olmak üzere çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bir önceki bölümde U-büküm için analitik yöntem ile hesaplanan geri yaylanma değeri bu bölümde SEY ile hesaplanmıştır [86]. Bu bölümdeki sonlu elemanlar analizi (SEA) çalışmaları (Bölüm 5.1 ve 5.2), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini sürdürmekte olan Fırat Özer tarafından gerçekleştirilmiştir [86]. Geri yaylanmanın hesabı üzerine yapılan çalışmalarda ticari SEA programları sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, analiz sonuçlarının doğruluğu entegrasyon noktası sayısına, eleman formülasyonuna, zaman aralığına ve temas algoritmasına büyük ölçüde bağlıdır [8,87]. Bu bölümde anlatılan çalışmada birleşik açık-kapalı (coupled explicit-implicit) çözüm algoritması kullanılarak geri yaylanma değerleri hesaplanmıştır.

Birçok mühendislik probleminin SEY ile yapılan çözümleri için yüksek hesaplama süreleri ortaya çıkmaktadır. Çok sayıda analize ihtiyaç duyan olağan mühendislik uygulamaları (birçok alternatif tasarımın olurluluğunun hesaplanması, tasarım uzayının araştırılması, hassasiyet analizi ve tasarım optimizasyonu gibi) söz konusu olduğunda SEY ile bu tip uygulamalar pratik bir biçimde gerçekleştirilememektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere bu gibi hesaplama yükünün çok fazla arttığı durumlarda vekil modeller kullanılarak çok daha kısa sürelerde tahminler yapılabilir. Bu bölümde yapılan çalışmada geri yaylanma açılarının, yan duvar kıvrımının (sidewall curl) ve sac kalınlığındaki incelmeyi tahmini için vekil modeller oluşturulmuştur. Bir önceki bölümde de kullanılan PYY, RTF ve KR vekil model yöntemleri kullanılarak sonuçlar hesaplanmıştır.

Bu çalışmada geri yaylanma açılarının, yan duvar kıvrımının ve sac kalınlığındaki incelmeyi oluşumunu etkileyen 12 adet parametre dikkate alınmıştır. Bu parametreler, sac tutucu kuvveti (blank holder force,  $BHF$ ), son durumdaki sac tutucu kuvvetinin ( $BHF2$ ) başlangıçtaki sac tutucu kuvvetine ( $BHF1$ ) oranı ( $BHF2/BHF1$ ), sürtünme katsayısı ( $f_s$ ), pekleşme katsayısı ( $K$ ), pekleşme üsteli ( $n$ ),

açıklık değerinin sac kalınlığına oranı ( $c/t$ ), kalıp yarıçapı ( $R_d$ ), zımba yarıçapı ( $R_p$ ), sac kalınlığı ( $t$ ) ve üç farklı yöndeki ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) anizotropi katsayılarıdır ( $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ ). Vekil modelleri oluşturmak için öncelikle Latin hiperküp örnekleme yöntemi [88] kullanılarak tasarım noktaları oluşturulmuştur. Daha sonra bu tasarım noktalarında meydana gelen yanıt değerlerini hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla geri yaylanma analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, elde edilen yanıt değerleri kullanılarak vekil modeller oluşturulmuştur. Çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak her bir vekil model türü için OMH değeri hesaplanmış ve elde edilen bu değerler kıyaslanarak en yüksek doğruluğa sahip vekil model türü belirlenmiştir. OMH ölçeğine ek olarak gerçek yanıt değerleri ile tahmin edilen yanıt değerleri arasındaki ilişki de belirtilmiştir.

Vekil modellerin oluşturulmasından sonra hassasiyet analizi gerçekleştirilmiş ve 12 adet parametre içinden sonuçlar üzerinde en etkili olanları belirlenmiştir. Sonrasında bir gürbüz optimizasyon problemi tanımlanmış ve çözümü gerçekleştirilmiştir. Son olarak, çift döngülü Monte Carlo benzetimi kullanılarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır.

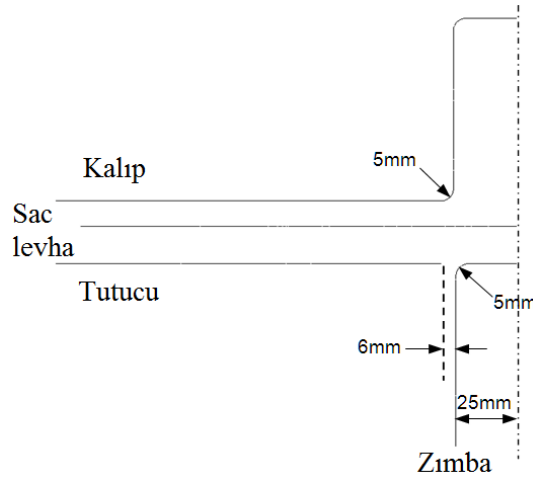
### 5.1. U-Büküm

U-büküm işleminin geometrik özellikleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Burada bahsedilen işlem Numisheet 93'te belirtilenle benzerdir. Ancak, bu çalışmada U-büküm işlemi için kullanılacak malzeme bir çift fazlı çeliktir (DP600). Çizelge 5.1'de büküm işleminin parametreleri ve büküm işleminde kullanılan sacın boyutları belirtilmiştir.

LS-DYNA programı aracılığıyla şekil verme sürecinin ve geri yaylanmanın sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sac kalınlığı 0.8 mm iken 7 adet entegrasyon noktası kullanılarak büküm işleminin analizi yapılmıştır. Hesaplama süresi ve doğruluk miktarı dikkate alındığında kullanılan bu entegrasyon noktası adedi uygun bir değer olmaktadır.

Çizelge 5.1. Büküm işleminin parametreleri ve sacın boyutları [86]

Kurs boyu [mm]	$f_s$	$BHF$ [kN]	$c$ [mm]	Sac boyutları [mm]	$t$ [mm]	Kalıp hızı [mm/sn]
70	0.12449	46.4-71	1	35x350	0.8	20



Şekil 5.1. U-büküm işleminin geometrik özellikleri [86]

Parametrik analizler gerçekleştirilirken birçok farklı sac kalınlığı değeri kullanılmıştır. Sac levhanın kalınlığı 0.9 mm'ye yükseltildiğinde daha fazla entegrasyonu noktası kullanımına gerek duyulmaktadır. 0.9 mm'lik sac için 7 entegrasyon noktası kullanıldığında analiz sonuçlarında beklenmeyen değerlerle karşılaşmıştır (Şekil 5.2). Sonuç olarak, sac kalınlığındaki değişime bağlı olarak tutarlı parametrik analizler gerçekleştirebilmek için entegrasyon noktası adedi 11 olarak seçilmiştir.

## 5.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması

Sac levhanın göstermiş olduğu anizotropik davranışa (Çizelge 5.2) bağlı olarak malzeme modeli üç parametrelili Barlat (three parameter Barlat) akma kriteri olarak belirlenmiştir. Bahsedilen şekil verme işlemi için 10 adet farklı parça haddeleme yönleri doğrultusunda şekillendirilmiştir.



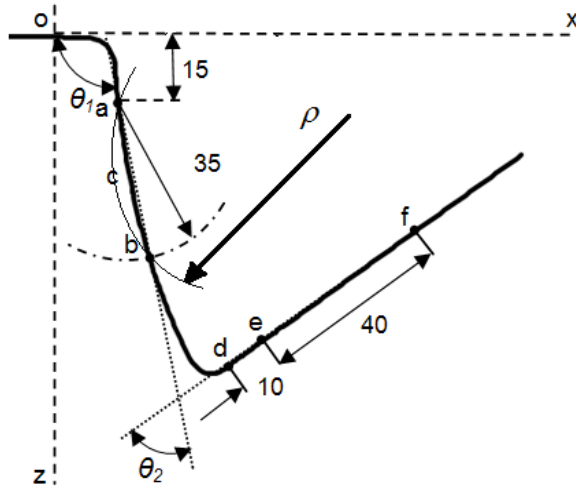
Şekil 5.2. 0.9 mm kalınlığındaki DP600 sac levhanın 7 (solda) ve 11 (sağda) entegrasyon noktası kullanılarak yapılan geri yaylanma benzetimlerinin karşılaştırılması [86]

Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen geri yaylanma açıları ( $\theta_1$  ve  $\theta_2$ ) ve yan duvar kıvrımı yarıçapı ( $\rho$ ) Numisheet93'te gösterilen prosedüre bağlı olarak ölçülmüştür (Şekil 5.3).  $\theta_1$ , "ab" doğrusu ile (Şekil 5.3'te gösterilen büküm parçasının alt noktasından 15 mm yukarıdaki "a" noktasından başlayıp, merkezi "a" noktası olan 35 mm yarıçaplı çemberin parçanın yan duvarıyla kesiştiği noktada biten doğru) yataydaki "ox" doğrusunun arasındaki açıdır.  $\theta_2$ , "ab" ve "ef" doğruları arasındaki açının ölçülmesiyle elde edilir.  $\rho$  ise "abc" yayına uyan çemberin yarıçapına eşittir.

Çizelge 5.2. DP600 malzemesine ait mekanik özellikler [86]

$\sigma_y$ [MPa]	$E$ [GPa]	$\nu$	$K$ [MPa]	$n$	$\epsilon_o$	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$
350	210	0.3	1076	0.189	0.002628	0.97	1.07	1.17

Farklı entegrasyon noktası sayıları, eleman boyutları ve kalıp hızları incelenerek sonlu elemanlar analizlerinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğu ve hesaplama süresi dikkate alındığında 1 mm'lik dörtgen (quadrilateral) elemanlar seçildiğinde, 7 adet entegrasyon noktası kullanıldığında ve 1000 mm/sn'lik kalıp hızı uygulandığında sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel sonuçların birbirine uyum gösterdiği görülmüştür. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Çizelge 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Geri yaylanma ölçüm yöntemi. Ölçüler [mm] cinsindedir. [86]



Çizelge 5.3. Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

[86]

Ölçüm	Yan duvar açısı ( $\theta_1$ )	Flanş açısı ( $\theta_2$ )	Yan duvar kıvrımı ( $\rho$ )
Deney (ortalama)	99.29	81.72	209.02
LS-DYNA (SEA)	100.92	81.43	207.94

### 5.3. Vekil Model Oluşturulması

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere hesaplama yükü fazla olan sonlu elemanlar benzetimlerini doğrudan doğruya tasarım uzayının araştırılması, hassasiyet analizi ve tasarım optimizasyonu gibi mühendislik çalışmalarına uygulamaktansa ilgilenilen problem (yan duvar açısı ( $\theta_1$ ), flanş açısı ( $\theta_2$ ), yan duvar kıvrımı ( $\rho$ ) ve sac kalınlığı incelenmesi ( $\Delta t$ )) için matematiksel bağıntılar oluşturmak hem hesaplama yükünü oldukça azaltır hem de problemin girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkinin çok daha kolay anlaşılmasını sağlar. Bu amaçla, öncelikle bir deney tasarımı yöntemi seçilerek tasarım noktaları oluşturulmuştur. Daha sonra bu noktalardaki yanıt değerleri sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanmıştır. Son olarak, bir önceki adımda elde edilen yanıt değerleri kullanılarak farklı tipte vekil modeller oluşturulmuştur.

#### 5.3.1. Tasarım noktalarının oluşturulması

Latin hiperküp örnekleme yöntemi kullanılarak 120 adet tasarım noktası süreç değişkenlerinin her birinin kendisine ait minimum ve maksimum değerler (Çizelge 5.4) arasında düzgün dağılıma sahip olduğu kabul edilerek oluşturulmuştur.

Çizelge 5.4. Süreç değişkenleri için minimum ve maksimum değerler

Değişken	Min.	Maks.
$BHF$ [kN]	40	50
$BHF2/BHF1$	1.3	1.5
$f_s$	0.10	0.15
$K$ [MPa]	1000	1150
$n$	0.12	0.20
$c/t$	1.0	1.2
$R_d$ [mm]	3	7
$R_p$ [mm]	3	7
$t$ [mm]	0.7	0.9
$R_0$	0.8900	0.9850
$R_{45}$	0.9750	1.1730
$R_{90}$	0.9764	1.1823

### 5.3.2. Vekil modeller

Deney tasarımı türü seçildikten sonra oluşturulan tasarım noktalarında  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  değerleri LS-DYNA programı ile hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak PYY1, PYY2, kademeli polinom regresyon (birinci ve ikinci dereceden, sırasıyla KPR1 ve KPR2), RTF ve KR (sıfırıncı ve birinci dereceden eğilim modelleri, sırasıyla KR0 ve KR1) vekil modelleri oluşturulmuştur.

### 5.4. Vekil Modellerin Doğruluğunun Hesaplanması

Oluşturulan vekil modellerin doğruluğu her bir modele ait OMH değeri hesaplanarak elde edilmiştir. OMH değeri hesaplanırken çapraz doğrulama yönteminden faydalanılmıştır (Denklem 5.1).

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

Burada  $n$  tasarım noktası sayısını,  $y^i$  çapraz doğrulama için ayrılan her bir  $x_i$  noktasına karşılık gelen gerçek yanıt değerini,  $\hat{y}^{(i)}$  ise vekil model kullanılarak tahmin edilen yanıt değerini ifade etmektedir.

Oluşturulan vekil modellere ait OMH değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.5'te verilmiştir. PYY1 vekil modelinin  $\theta_1$  tahmini için, KPR1'in hem  $\rho$  hem de  $\Delta t$  tahmini için, KR1 vekil modelinin ise  $\theta_2$  tahmini için en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Ancak, vekil modelleri oluşturmak ve tahmin değerlerini elde etmek için geçen hesaplama süreleri göz önüne alındığında KR vekil model tipi için geçen süre PYY vekil model tipi için geçen süreden çok daha fazladır [18]. Buna ek olarak, Çizelge 5.5'e bakıldığında PYY1 ve KR1 için hesaplanan hata değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülür. Bahsedilen bu iki nedenden ötürü hem  $\theta_1$  hem de  $\theta_2$  için tahmin modeli olarak PYY1 seçilmiştir.

Çizelge 5.5.  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (%)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
$\theta_1$ için vekil modellerin hata miktarı							
<b>OMH</b>	<b>17,54</b>	34,58	17,68	56,27	22,41	28,06	17,55
$\theta_2$ için vekil modellerin hata miktarı							
<b>OMH</b>	16,83	37,99	17,19	41,03	24,41	24,87	<b>16,78</b>
$\rho$ için vekil modellerin hata miktarı							
<b>OMH</b>	19,67	59,67	<b>18,34</b>	58,21	25,74	23,86	19,71
$TR$ için vekil modellerin hata miktarı							
<b>OMH</b>	8,73	14,50	<b>8,60</b>	18,95	16,59	25,41	8,68

## 5.5. Hassasiyet Analizi

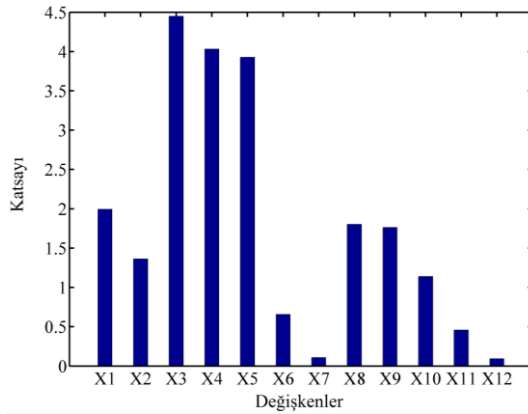
PYY1 vekil model tipinin kullanılması kararlaştırıldıktan sonra sürece en çok etki eden parametreler polinomlardaki değişkenlerin katsayıları incelenerek belirlenebilir (lineer olmayan denklem için global hassasiyet analizine ihtiyaç duyulur).

Polinomlar oluşturulurken girdi değerleri 0 ila 1 arasında normalize edilmiştir. Böylece her bir değişkenin katsayısı birbiriyle kıyaslanarak o değişkenin önemli bir parametre olup olmadığı belirlenebilir. Çizelge 5.6'da  $X1$ ,  $X2$ , vb. şekilde gösterilen değişkenlere karşılık gelen tanımlar gösterilmiştir.

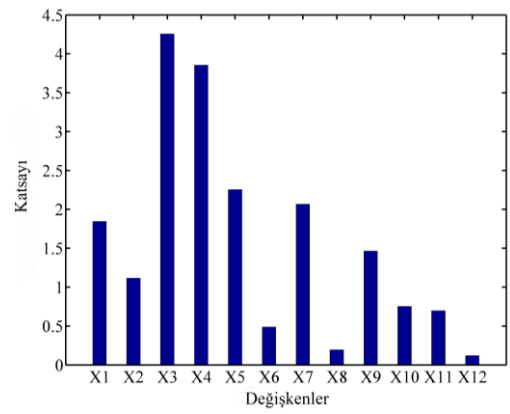
Çizelge 5.6. Değişkenlere karşılık gelen tanımlar

Değişken	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$	$X6$	$X7$	$X8$	$X9$	$X10$	$X11$	$X12$
Tanım	$BHF$	$BHF2/BHF1$	$f_s$	$K$	$n$	$c/t$	$R_d$	$R_p$	$t$	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$

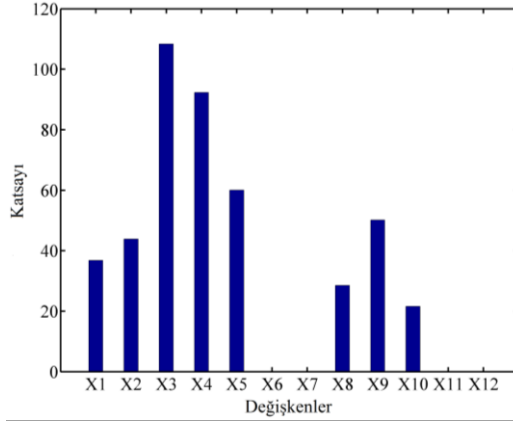
Şekil 5.4'ten  $f_s$  ( $X3$ ),  $K$  ( $X4$ ) ve  $n$  ( $X5$ ) parametrelerinin  $\theta_1$  tahmini için en etkili parametreler olduğu görülebilir. Şekil 5.5,  $f_s$  ( $X3$ ),  $K$  ( $X4$ ),  $n$  ( $X5$ ) ve  $R_d$  ( $X7$ ) parametrelerinin  $\theta_2$  tahmini için en önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Şekil 5.6'dan da görüldüğü üzere  $\theta_1$  tahmini için en etkili olan parametreler  $\rho$  için de aynı olmaktadır.  $\Delta t$  tahmini için  $f_s$  ( $X3$ ) ve  $R_d$  ( $X7$ ) en etkili parametrelerdir (Şekil 5.7).



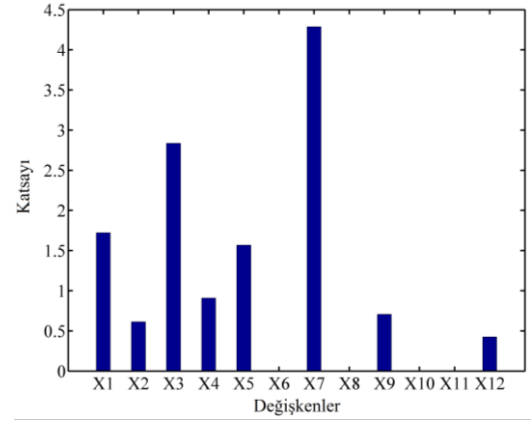
Şekil 5.4.  $\theta_1$  için değişkenlerin etkileri



Şekil 5.5.  $\theta_2$  için değişkenlerin etkileri



Şekil 5.6.  $\rho$  için değişkenlerin etkileri



Şekil 5.7.  $\Delta t$  için değişkenlerin etkileri

## 5.6. Gürbüz Optimizasyon Probleminin Tanımı

Yan duvar açısı ( $\theta_1$ ) için bir gürbüz optimizasyon problemi, tasarım değişkeni olarak belirlenen dört adet parametreye ( $c/t$ ,  $R_d$ ,  $R_p$  ve  $t$ ) bağlı olarak (5.2)-(5.8)'de belirtildiği gibi ifade edilebilir. Geriye kalan sekiz adet parametre ( $BHF$ ,  $BHF2/BHF1$ ,  $f_s$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ ) U-büküm süreci içerisinde belirsizliğe sahip parametrelerdir. Bu rastsal değişkenlerin her birinin normal dağılıma sahip olduğu varsayılmış ve dağılım özellikleri Çizelge 5.7'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.7. Rastsal değişkenler için dağılım özellikleri (Normal dağılım)

	$\mu$	$\sigma$
$BHF$ [kN]	45	1
$BHF2/BHF1$	1.40	0.02
$f_s$	0.125	0.005
$K$ [MPa]	1075	15
$n$	0.160	0.008
$R_0$	0.9375	0.0095
$R_{45}$	1.0740	0.0200
$R_{90}$	1.0794	0.0200

$$\text{bul } c/t, R_d, R_p, t \quad (5.2)$$

$$\text{küçült } w_1 \frac{\mu_{\theta_1}(c/t, R_d, R_p, t)}{\mu_{\bar{\theta}_1}} + w_2 \frac{\sigma_{\theta_1}(c/t, R_d, R_p, t)}{\sigma_{\bar{\theta}_1}} \quad (5.3)$$

$$\text{öyle ki } \mu_{TR}(c/t, R_d, R_p, t) + k\sigma_{TR}(c/t, R_d, R_p, t) \leq t_{spec} \quad (5.4)$$

$$1 \leq c/t \leq 1.2 \quad (5.5)$$

$$3mm \leq R_d \leq 7mm \quad (5.6)$$

$$3mm \leq R_p \leq 7mm \quad (5.7)$$

$$0.7mm \leq t \leq 0.9mm \quad (5.8)$$

Burada ağırlık katsayıları  $w_1 = w_2 = 0.5$  olarak seçilmiştir. %99'luk kısıt olasılığı için  $k = 3$  olarak belirlenmiştir. Tasarım değişkenleri için alt ve üst sınır değerleri (5.5)-(5.8)'de belirtilmiştir.  $t_{spec}$  kritik sac incelmesi değerini ifade etmektedir. Bu bölümde üç farklı kritik sac incelme değeri (%5, %10, %15) için optimizasyon problemi çözülmüştür.  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\Delta t}$ , ve  $\sigma_{\Delta t}$  değerlerini belirleyebilmek amacıyla  $\theta_1$  ve  $TR$  için 120 örnekleme noktası kullanılarak oluşturulan PYY1 ve KPR1 vekil model denklemleri kullanılarak bir Monte Carlo benzetimi (her bir rastsal değişken için 10000 örnekleme) oluşturulmuştur. Bu benzetim sonucunda elde edilen sonuçlara PYY1 ve KPR1 vekil model yöntemleri uygulanarak dört adet tasarım değişkenine bağlı olarak ifade edilen  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\Delta t}$ , ve  $\sigma_{\Delta t}$  ifadeleri elde edilmiştir (Denklem 5.9-5.12).

$$\mu_{\theta_1} = -4.2036(c/t) - 0.0053R_d - 0.4793R_p + 9.6602t + 10.6421 \quad (5.9)$$

$$\sigma_{\theta_1} = 0.1862(c/t) + 0.0129R_d - 0.0032R_p - 0.1237t + 0.8476 \quad (5.10)$$

$$\mu_{\Delta t} = -1.0887R_d - 4.1463t + 14.6025 \quad (5.11)$$

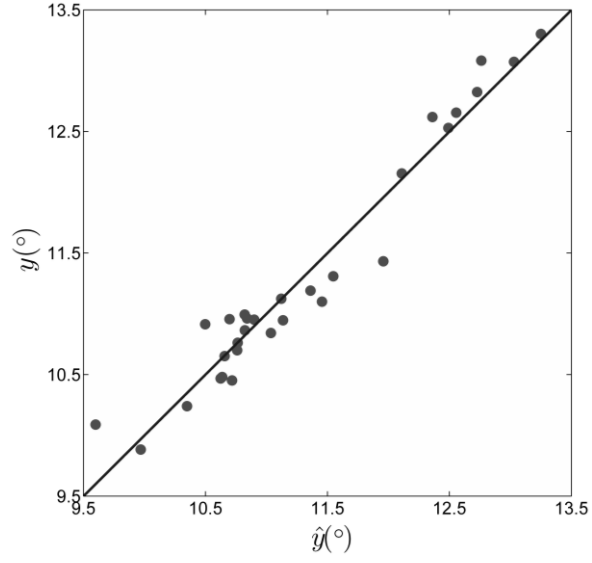
$$\sigma_{\Delta t} = 0.0997(c/t) + 0.0068R_d - 0.0861t + 0.4355 \quad (5.12)$$

Bu vekil modellere ait hata miktarları Bölüm 5.4'te belirtilen şekilde hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8'de sunulmuştur. Ayrıca  $\mu_{\theta_1}$  ve  $\mu_{\Delta t}$  için vekil modeller aracılığıyla hesaplanan yanıt değerleri ile Monte Carlo benzetimleri sonucu elde edilen gerçek yanıt değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmiştir.

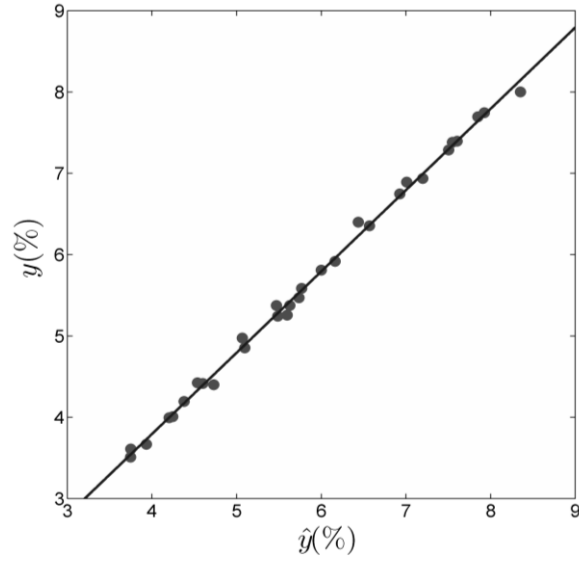
Monte Carlo benzetimini gerçekleştirebilmek için öncelikle tasarım değişkenlerinin Çizelge 5.4'te belirtilen alt ve üst sınır değerleri kullanılarak MATLAB® programında “*lhsdesign*” (Latin hiperküp örnekleme yöntemi) komutu ile 30 adet tasarım noktası meydana getirilmiştir. Daha sonra her tasarım noktası için rastsal değişkenlerin her biri, normal dağılım özelliklerinden (Çizelge 5.7) faydalanarak, 10,000 kez oluşturulmuştur. Yani her tasarım noktası için 10,000 defa yan duvar açısı ( $\theta_1$ ) ile sac kalınlığı incilmesi ( $\Delta t$ ) hesaplanmış ve sonrasında bu 10,000 adet verinin ortalaması ve standart sapması alınarak her bir tasarım noktasına ait ortalama değer ve standart sapma değeri belirlenmiştir. Son olarak, tasarım noktaları ile Monte Carlo benzetimi sonucunda elde edilen yanıt değerleri arasındaki ilişki PYY1 ( $\theta_1$  için) ve KPR1 ( $\Delta t$ ) vekil model yöntemleri ile elde edilmiştir (Denklem 5.9-5.12).

Çizelge 5.8.  $\mu_{\theta_1}$ ,  $\sigma_{\theta_1}$ ,  $\mu_{\Delta t}$ , ve  $\sigma_{\Delta t}$  tahmini için hata miktarları (%)

	PYY1		KPR1
$\mu_{\theta_1}$ için OMH	1.80	$\mu_{\Delta t}$ için OMH	1.53
$\sigma_{\theta_1}$ için OMH	2.52	$\sigma_{\Delta t}$ için OMH	2.34



Şekil 5.8.  $\mu_{\theta_1}$  için gerçek ( $y$ ) ve tahmin ( $\hat{y}$ ) yanıt değerleri arasındaki ilişki



Şekil 5.9.  $\mu_{\Delta_1}$  için gerçek ( $y$ ) ve tahmin ( $\hat{y}$ ) yanıt değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.8 ve 5.9'dan da görüleceği üzere  $\mu_{\theta_1}$  ve  $\mu_{\Delta_1}$  için kullanılan vekil modeller aracılığıyla gerçek yanıt değerlerine oldukça yakın tahminlerde bulunulmuştur.



## 5.7. Optimizasyon Probleminin Çözümü

MATLAB® programında “*fmincon*” komutu (ardışık ikinci dereceden programlama) kullanılarak üç farklı kritik sac incelme değeri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9’de sunulmuştur.

Çizelge 5.9. Gürbüz optimizasyon probleminin çözümü ( $w_1 = w_2 = 0.5$ )

$t_{spec}$ [%]	$c/t$	$R_d$ [mm]	$R_p$ [mm]	$t$ [mm]
5	1.2	7	7	0.86
10	1.2	3	7	0.70
15	1.2	3	7	0.70

Tasarım değişkenlerin optimum değerlerini (Çizelge 5.9) kullanarak olasılıksal bir kısıt olarak belirlenen  $\Delta t$  için doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Yani eldeki optimum tasarım değişkeni değerleri Monte Carlo benzetiminde (10000 örnekleme) kullanmış, her  $t_{spec}$  değeri için incelme değerinin yüzde kaç güvenilirlikle sağlandığı belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle Denklem (5.4)’te %99 olarak belirlenen değer, sac incelmesinin kritik sac incelmesi değerinden düşük olma olasılığı, sağlanıp sağlanamadığı incelenmiş ve Çizelge 5.10’da sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca vekil modeller aracılığıyla  $\Delta t$  için elde edilen tahmin değerlerinin de ( $\Delta \hat{t}$ ) kritik sac incelmesi değerini ne kadarlık bir olasılıkla sağladığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.10. Optimum tasarım değişkenleri için doğrulama sonuçları

$t_{spec}$ (%)	$P(\Delta t < t_{spec})$	$P(\Delta \hat{t} < t_{spec})$
5	%98.56	%99.87
10	%99.39	%99.88
15	%100	%100

Optimum tasarım değişkeni değerleri kullanılarak %5 ve %10'luk kritik sac incelmeleri için hesaplanan geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 5.11 ve 5.12'de belirtilmiştir. Aynı çizelgede farklı ağırlık katsayısı değerleri için de sonuçlar sunulmuştur. Gürbüz optimizasyon sürecinden beklenildiği gibi  $w_2$  katsayısını yükselttikçe geri yaylanmanın standart sapması azalmakta fakat bu sefer de geri yaylanmanın ortalama değeri minimumdan uzaklaşmaktadır. Burada tercih tasarımcıya kalmaktadır. Sistemden beklenen performans hangi yönde şekillendirilmek isteniyorsa (ortalama değer mi yoksa standart sapmanın mı daha düşük olması ya da her ikisinin de mi düşük olması arzu edilmekte) o duruma uygun ağırlık katsayıları seçilerek tasarım gerçekleştirilir.

Çizelge 5. 11.  $t_{spec}=\%5$  için gürbüz optimizasyon sonuçlarının nominal sonuçlar ile karşılaştırılması ( $\mu_{\Delta\theta}$ 'nin birimi derece [ $^{\circ}$ ],  $R_p$ ,  $R_d$  ve  $t$ 'nin ise [mm]'dir.)

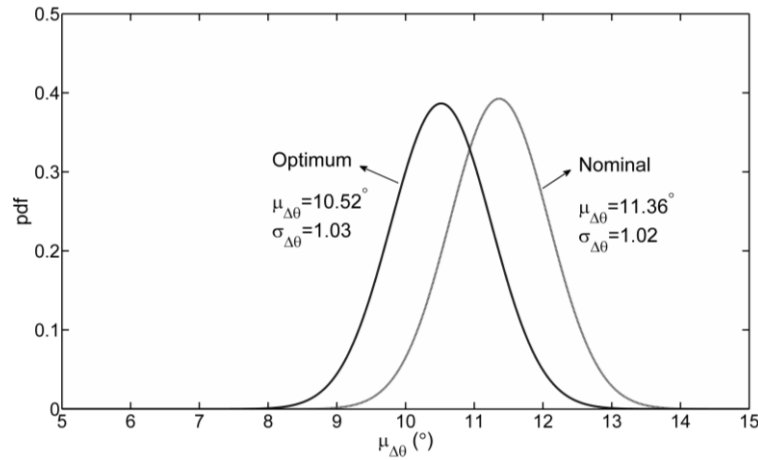
		$\mu_{\Delta\theta}$	$\sigma_{\Delta\theta}$	$c/t$	$R_d$	$R_p$	$t$
Nominal sonuçlar		11.36	1.02	1.1	5.0	5.0	0.80
Optimizasyon sonuçları ( $t_{spec}=\%5$ için)	$w_1=1.0; w_2=0.0$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	$w_1=0.9; w_2=0.1$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	$w_1=0.8; w_2=0.2$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	$w_1=0.7; w_2=0.3$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	$w_1=0.6; w_2=0.4$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	<b><math>w_1=0.5; w_2=0.5</math></b>	<b>10.52</b>	<b>1.03</b>	<b>1.2</b>	<b>7.0</b>	<b>7.0</b>	<b>0.86</b>
	$w_1=0.4; w_2=0.6$	10.52	1.03	1.2	7.0	7.0	0.86
	$w_1=0.3; w_2=0.7$	11.23	0.99	1.0	7.0	7.0	0.85
	$w_1=0.2; w_2=0.8$	11.23	0.99	1.0	7.0	7.0	0.85
	$w_1=0.1; w_2=0.9$	11.74	0.98	1.0	6.8	7.0	0.90
	$w_1=0.0; w_2=1.0$	11.74	0.98	1.0	6.8	7.0	0.90

Çizelge 5.12.  $t_{spec}=\%10$  için gürbüz optimizasyon sonuçlarının nominal sonuçlar ile karşılaştırılması ( $\mu_{\Delta\theta}$ 'nin birimi derece [ $^{\circ}$ ],  $R_p$ ,  $R_d$  ve  $t$ 'nin ise [mm]'dir.)

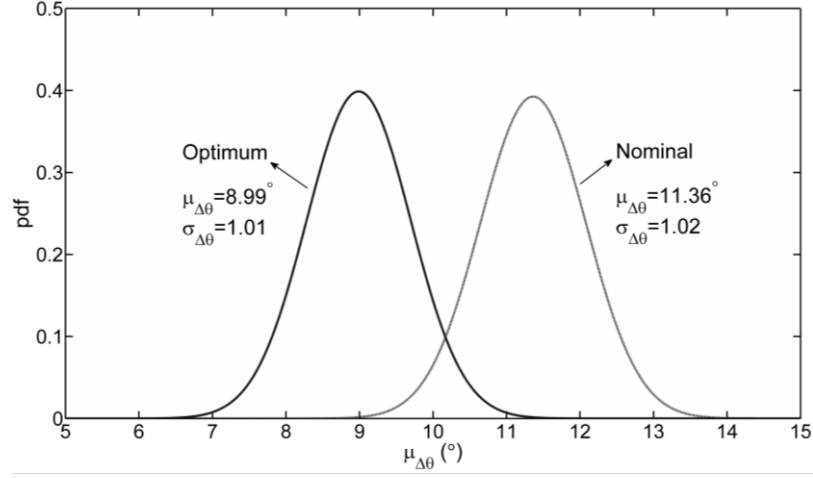
		$\mu_{\Delta\theta}$	$\sigma_{\Delta\theta}$	$c/t$	$R_d$	$R_p$	$t$
Nominal sonuçlar		11.36	1.02	1.1	5.0	5.0	0.8
Optimizasyon sonuçları ( $t_{spec}=\%10$ için)	$w_1=1.0; w_2=0.0$	8.99	1.00	1.2	3.1	7.0	0.7
	$w_1=0.9; w_2=0.1$	8.99	1.01	1.2	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.8; w_2=0.2$	8.99	1.01	1.2	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.7; w_2=0.3$	8.99	1.01	1.2	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.6; w_2=0.4$	8.99	1.01	1.2	3.0	7.0	0.7
	<b><math>w_1=0.5; w_2=0.5</math></b>	<b>8.99</b>	<b>1.01</b>	<b>1.2</b>	<b>3.0</b>	<b>7.0</b>	<b>0.7</b>
	$w_1=0.4; w_2=0.6$	8.99	1.01	1.2	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.3; w_2=0.7$	9.83	0.96	1.0	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.2; w_2=0.8$	9.83	0.96	1.0	3.0	7.0	0.7
	$w_1=0.1; w_2=0.9$	11.76	0.94	1.0	3.0	7.0	0.9
$w_1=0.0; w_2=1.0$	11.76	0.94	1.0	3.0	7.0	0.9	

Çizelge 5.11 ve 5.12'de  $w_1=w_2=0.5$  için belirtilen  $\mu_{\Delta\theta}$  ve  $\sigma_{\Delta\theta}$  değerlerinin nominal

$\mu_{\Delta\theta}$  ve  $\sigma_{\Delta\theta}$  değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5.10 ve 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10.  $t_{spec}=\%5$  için optimum ( $w_1=w_2=0.5$ ) ve nominal tasarımların karşılaştırılması



Şekil 5.11.  $t_{spec}=\%10$  için optimum ( $w_1=w_2=0.5$ ) ve nominal tasarımların karşılaştırılması

%5'lik kritik sac incelmesi için sonuçlar incelendiğinde,  $w_1=w_2=0.5$  durumu için elde edilen standart sapma değerinin nominal değerden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum  $w_2$  katsayısının 0.5'ten daha yüksek bir değer alınması gerektiğini belirtir. Şayet  $w_2$  katsayısı en az 0.7 olacak şekilde belirlenirse elde edilen standart sapma değerinin nominal değerinden daha düşük çıktığı görülmektedir.

%10'luk kritik sac incelmesi için sonuçlar değerlendirilirse,  $w_2$  katsayısının tüm değerleri için standart sapma değeri nominal değerden düşük çıkmaktadır. Bu durumda dikkate alınması gereken durum, geri yaylanmanın ortalama değerinin hangi  $w_1$  katsayıları için nominal değerden düşük olduğudur.  $w_1$  katsayısı en az 0.2 olacak şekilde belirlendiğinde ortalama geri yaylanma değeri nominal değerden her durum için küçük çıkmaktadır.

%15'lik kritik sac incelmesi için yapılan tasarım ile %10'luk sac incelmesi için yapılan tasarım aynı olduğundan, yukarıda yapılan tartışma %15'lik sac incelmesi için de geçerlidir.

Gürbüz optimizasyon sonucu elde edilen standart sapma değerlerine genel olarak bakıldığında optimizasyon süreci ile birlikte standart sapma için aslında çok düşük miktarda bir azalma sağlandığı görülebilir ( $t_{spec}=\%5$  için maksimum  $\%2.9$ 'luk,  $t_{spec}=\%10$  için maksimum  $\%7.7$ 'lik bir azalma mevcuttur). Bu durumun tasarım uzayının ilgilenilen kısmının büyüklüğü ile alakalı olduğu söylenebilir. Yani tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri değiştirildiğinde elde edilecek olan standart sapma değeri de değişecektir.  $t_{spec}=\%10$  için ilgilenilen problem çözüldüğünde kısıt fonksiyonunun aktif olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle tasarım değişkenleri sınır noktalarında değer almaktadır.  $t_{spec}=\%5$  için de aynı durum geçerlidir.  $c/t$ ,  $R_d$  ve  $R_p$  değerleri için üst sınır değerlerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. İlgilenilen problem için tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerlerinin büyük önem arz ettiği ve geri yaylanmanın standart sapma değerine önemli ölçüde etki edebildiği görülmüştür.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, tasarım değişkenleri için belirlenen alt ve üst sınır değerlerinin geri yaylanma standart sapmasını belirgin ölçüde azaltacak kadar yeterli bir aralığa sahip olmadığı konusunda tasarımcı bilgilendirilebilir.

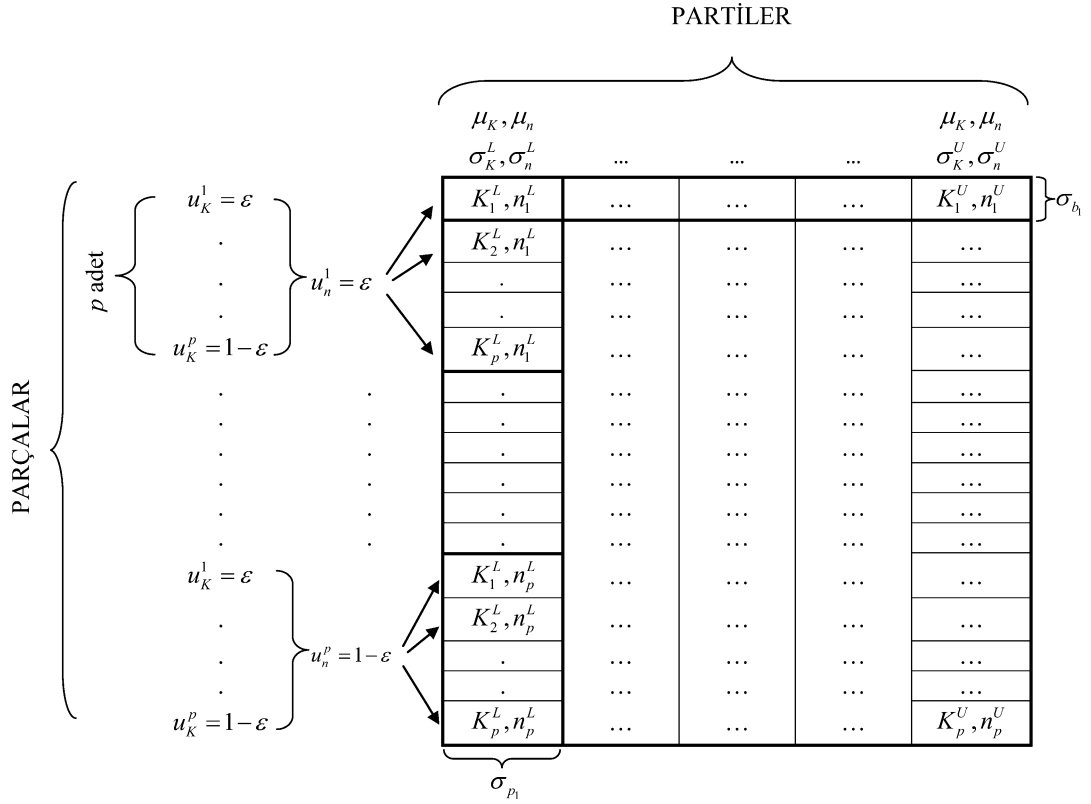
#### **5.8. Parçadan-Parçaya ve Partiden-Partiye Geri Yaylanma Varyasyonu Hesabı**

Bölüm 3'te anlatılan çift döngülü Monte Carlo benzetimi yönteminden faydalanarak optimum kalıp yarıçapı değerleri için geri yaylanma değerinin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan varyasyonu hesaplanmıştır (Çizelge 5.13). Bölüm 3.3'te anlatılandan farklı olarak bu bölümdeki çalışmada, Monte Carlo benzetimi içerisinde *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* değişim gösterdiği kabul edilen akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ) yerine pekleşme katsayısının ( $K$ ) ve pekleşme üstelinin ( $n$ ) *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan değişimleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.13. Optimum kalıp yarıçapı değerleri için çift döngülü Monte Carlo benzetimi ile hesaplanan *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu değerleri

$R_d$ [mm]	$(b_b)_K$	$(b_b)_n$	$\sigma_p$	$\sigma_b$	Toplam	$\% \sigma_p$	$\% \sigma_b$
3	0.0	0.000	0.8661	0.6392	1.5052	57.5	42.5
	2.5	0.013	0.9909	0.7948	1.7857	55.5	44.5
	5.0	0.026	1.1071	0.9726	2.0797	53.2	46.8
	7.5	0.040	1.1978	1.1570	2.3549	50.9	49.1
	10.0	0.053	1.1974	1.2924	2.4898	48.1	51.9
	12.5	0.066	1.1248	1.4038	2.5286	44.5	55.5
7	0.0	0.000	1.5355	1.1600	2.6955	57.0	43.0
	2.5	0.013	1.7674	1.4422	3.2096	55.1	44.9
	5.0	0.026	1.9889	1.7595	3.7483	53.1	46.9
	7.5	0.040	2.1591	2.0842	4.2433	50.9	49.1
	10.0	0.053	2.1597	2.3214	4.4811	48.2	51.8
	12.5	0.066	2.0254	2.5098	4.5352	44.7	55.3

$K$  ve  $n$  değerlerinin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan değişimlerinin modellenme yöntemi Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Bu iki parametrenin *partiden-partiye* olan değişimleri her bir parametre için “parti sınırı” değeri belirlenerek modellenmiştir (Çizelge 5.14).



Şekil 5.12.  $K$  ve  $n$  parametrelerin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* değişiminin modellenmesi (burada  $\epsilon=10^{-4}$  kullanılmıştır.)

*Parçadan-parçaya* olan değişimin modellenme süreci ise adım adım şu şekilde açıklanabilir:

- i) Bir parti içerisindeki her  $p$  adet parça için  $K$  değerinin birikimli dağılım fonksiyonu 0 ile 1 arasında değiştirilir (Pekleşme katsayısına gerçek değerler atayabilmek için birikimli dağılım fonksiyonu değeri 0 yerine  $\epsilon = 10^{-4}$  olarak alınır. Aynı şekilde 1 yerine de  $1-\epsilon$  değeri kullanılır). Böylece her  $p$  adet parça için farklı bir  $K$  değeri atanır.

ii) Bu  $p$  adet parçanın hepsinin aynı  $n$  değerine sahip olduğu varsayılarak, her bir  $p$  adetlik grup için  $n$ 'nin birikimli dağılım fonksiyonundan bir  $n$  değeri belirlenir (gerçek bir değer atayabilmek için 0 yerine  $\varepsilon = 10^{-4}$  'ten başlanır).

iii) Bir önceki adımdaki işlem  $n$  için birikimli dağılım fonksiyonu değeri 1 (gerçek bir değer atayabilmek için  $1 - \varepsilon$ ) olana kadar devam eder.

Böylece  $K$  ve  $n$  parametrelerinin *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* değişimi modellenmiş olur. Bu çalışmada toplam parça sayısı  $p = 10$  ve parti sayısı ise 100 olacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 5.14.  $K$  [MPa] ve  $n$  için *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* dağılım parametreleri

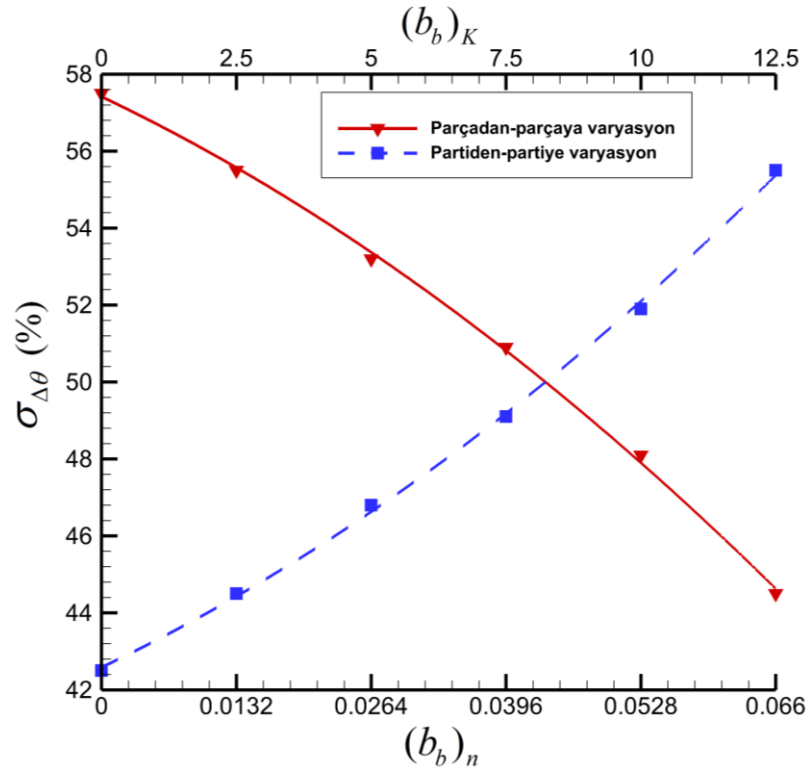
	Parçadan-parçaya		Partiden-partiye						
	$\mu$	$\sigma$	$\mu_{\sigma_b}$	$(b_b)_1$	$(b_b)_2$	$(b_b)_3$	$(b_b)_4$	$(b_b)_5$	$(b_b)_6$
$K$	1075.0	15.0	15.0	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
$n$	0.160	0.080	0.080	0.000	0.013	0.026	0.040	0.053	0.066

Şekil 5.12'den de görüleceği üzere “parti sınırı” değeri kullanılarak her bir parti için  $K$  ve  $n$ 'nin standart sapma değerleri belirlenmiş, sonrasında  $K$  ve  $n$ 'nin birikimli dağılım fonksiyonlarından faydalanarak her bir parça için belirli bir  $K$  ve  $n$  değeri atanmıştır. Bu değerler belirlendikten sonra çift döngülü Monte Carlo benzetimleri gerçekleştirilerek geri yaylanma hesaplanır. Elde edilen bu geri yaylanma değerleri Bölüm 3.3'te anlatıldığı şekilde incelenerek *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* varyasyon değerleri hesaplanır (Çizelge 5.13).

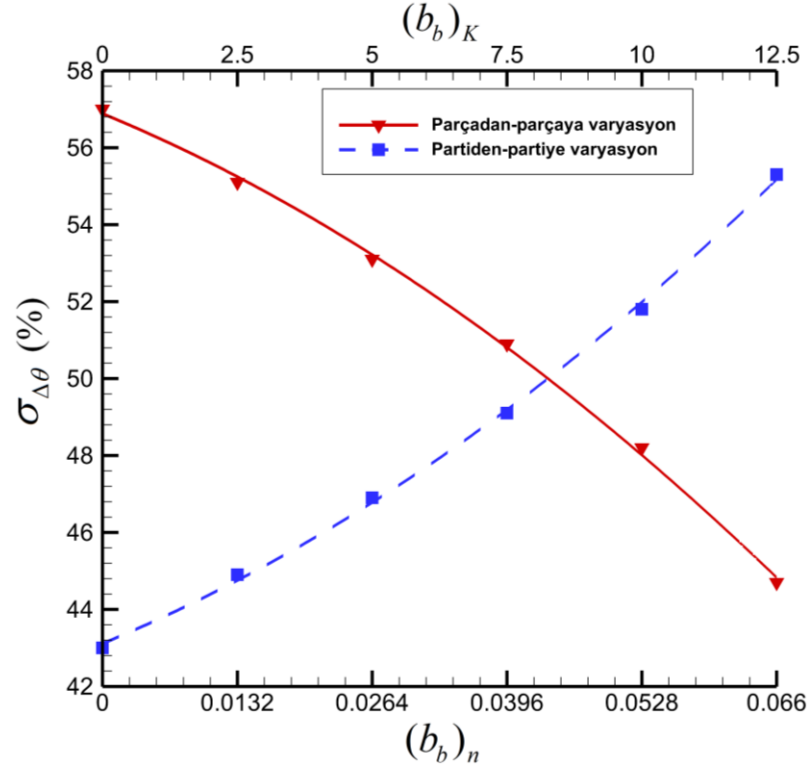
Sonuçlar incelendiğinde,  $K$  ve  $n$  için “parti sınırı” değeri arttıkça *partiden-partiye* olan geri yaylanma varyasyonunun  $R_d = 3mm$  için yaklaşık %30.6'lık bir artış gösterdiği görülmektedir.  $R_d = 7mm$  için ise bu artış yaklaşık olarak %28.6'dır. Yani



$K$  ve  $n$  değerlerinin *partiden-partiye* olan varyasyonu arttıkça geri yaylanmanın da *partiden-partiye* olan varyasyonu önemli ölçüde artmaktadır (Şekil 5.13-14).



Şekil 5.13. *Parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* varyasyonunun değişimi  
( $R_d = 3mm$ )



Şekil 5. 14. *Parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* varyasyonun değişimi  
( $R_d = 7mm$ )

## 5.9. Tartışma

Bu bölümde, Latin hiperküp örnekleme yöntemi kullanılarak 120 adet tasarım noktası oluşturulmuş ve bu noktalarda  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  değerleri LS-DYNA programı ile hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak PYY1, PYY2, KPR1, KPR2, RTF, KR0 ve KR1 vekil modelleri oluşturulmuştur. Bu vekil modellerin hata miktarları çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak OMH değeri ile hesaplanmış ve  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  tahmini için en düşük hata miktarına sahip modeller seçilmiştir. Bu hesaplama sonucu hem  $\theta_1$  hem de  $\theta_2$  tahmini için PYY1, hem  $\rho$  hem de  $\Delta t$  tahmini için ise KPR1 vekil modelleri en iyi vekil modeller olarak belirlenmiştir.

U-büküm sürecini en çok etki eden parametreler hassasiyet analizi gerçekleştirilerek belirlenmiştir.  $f_s$  (X3),  $K$  (X4) ve  $n$  (X5) parametrelerinin  $\theta_1$  tahmini için en etkili

parametreler olduğu görülmüştür.  $\theta_2$  tahmini için ise  $f_s$  (X3),  $K$  (X4),  $n$  (X5) ve  $R_d$  (X7) parametrelerinin en önemli parametreler olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca,  $\theta_1$  tahmini için en etkili olan parametrelerin  $\rho$  tahmini için de en etkili parametreler olduğu görülmüştür.  $\Delta t$  tahmini için  $f_s$  (X3) ve  $R_d$  (X7) en etkili parametreler olarak belirlenmiştir.

Yan duvar açısı ( $\theta_1$ ) için bir gürbüz optimizasyon problemi, tasarım değişkeni olarak belirlenen dört adet parametreye ( $c/t$ ,  $R_d$ ,  $R_p$  ve  $t$ ) bağlı olarak ifade edilmiştir. Sekiz adet parametre ( $BHF$ ,  $BHF2/BHF1$ ,  $f_s$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ ) ise U-büküm süreci içerisinde belirsizliğe sahip parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu bölümde üç farklı kritik sac incelme değeri (%5, %10, %15) için optimizasyon problemi çözülmüştür. %5'lik sac incelme değeri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri  $c/t=1.2$ ,  $R_d=R_p=7$  mm ve  $t=0.86$  mm olarak, %10'luk ve %15'lik sac incelme değerleri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri  $c/t=1.2$ ,  $R_d=3$  mm,  $R_p=7$  mm ve  $t=0.70$  mm olarak bulunmuştur.  $c/t$ ,  $R_d$  ve  $R_p$  değerleri için üst sınır değerlerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. İlgilenilen problem için tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerlerinin büyük önem arz ettiği ve geri yaylanmanın standart sapma değerine önemli ölçüde etki edebildiği görülmüştür.

Çift döngülü Monte Carlo benzetimi kullanılarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır. Monte Carlo benzetimi içerisinde pekleşme katsayısının ( $K$ ) ve pekleşme üstelinin ( $n$ ) *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan değişimleri dikkate alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde,  $K$  ve  $n$  için "parti sınırı" değeri arttıkça *partiden-partiye* olan geri yaylanma varyasyonunun  $R_d = 3mm$  için yaklaşık %30.6'lık bir artış gösterdiği görülmüştür.  $R_d = 7mm$  için ise bu artış yaklaşık olarak %28.6'dır. Yani  $K$  ve  $n$  değerlerinin *partiden-partiye* olan varyasyonu arttıkça geri yaylanmanın da *partiden-partiye* olan varyasyonu önemli ölçüde artmaktadır.

## 6. 7-FLANŞLI TASARIM PROBLEMİ

Bu bölümde, DP600 kodlu çift fazlı çelikten imal edilmiş yedi farklı flanş tasarımından oluşan bir büküm parçasında meydana gelen iki farklı geri yaylanma açısı ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) değerinin gürbüz optimizasyonu incelenmiştir. Vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon yönteminden faydalanarak kalıp ( $R_d$ ) ve zımba yarıçapının ( $R_p$ ) optimum değerleri araştırılmış, böylece geri yaylanma değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Vekil modellerin örnekleme noktalarındaki geri yaylanma değerleri sonlu elemanlar analizi (SEA) programı LS-DYNA kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümdeki SEA çalışmaları (Bölüm 6.1 ve 6.2), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini sürdürmekte olan Fırat Özer tarafından yapılmıştır [90].

Bu bölümde, dört farklı vekil model türü kullanılarak (PYY, KPR, RTF, KR) geri yaylanma tahmini gerçekleştirilmiştir. İki farklı seviyede vekil modeller oluşturulmuştur. Birinci seviyedeki vekil modeller aracılığıyla, tasarım değişkenlerinin ve rastsal değişkenlerin geri yaylanma ile olan ilişkisi elde edilmiştir. Bu aşamada KR vekil modellerinin PYY, KPR ve RTF vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. Birinci seviyedeki vekil modeller Monte Carlo benzetimi içerisinde kullanılarak geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri hesaplanmıştır. İkinci seviyedeki vekil modeller, geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değerini tasarım değişkenleri cinsinden ifade edebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ikinci seviye vekil modeller arasında PYY vekil modellerinin KPR, RTF ve KR vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu görülmüştür. İkinci seviyedeki vekil modeller ile gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen optimum tasarım değişkenleri değerlerini doğrulamak için Monte Carlo benzetimleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon süreci sonucunda geri yaylanma açılarının ortalama değerlerinde, nominal ortalama geri yaylanma sonuçlarına kıyasla %7 ila %85 arasında değişen miktarlarda azalma meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, kalıp ve zımba yarıçapları için tasarımcı tarafından belirlenen alt ve üst sınır

değerlerinin geri yaylanmanın optimum ortalama ve standart sapma değerini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.

Bu bölümde anlatılan çalışmalar şu sıradadır. Bir sonraki bölümde yedi farklı flanş tasarımından oluşan büküm parçasında meydana gelen iki farklı geri yaylanma açısı için gürbüz optimizasyon probleminin tanımlanması yapılmıştır. Bölüm 6.2, büküm sürecinin sonlu elemanlar analizi ayrıntılarını sunmaktadır. Bölüm 6.3'te, vekil modellerin oluşturulması süreci anlatılmakta ve birinci seviyedeki vekil modellerin doğrulukları verilmektedir. Bölüm 6.4'te, bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemi açıklanmış ve ikinci seviyedeki vekil modeller incelenmiştir. Optimizasyon problemlerinin çözümleri Bölüm 6.5'te verilmiştir. Bölüm 6.6'da, birden fazla vekil model kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları anlatılmıştır. Son olarak, elde edilen sonuçların tartışması Bölüm 6.7'de yapılmıştır.

### **6.1. 7-Flanşlı Tasarım Probleminin Tanımlanması**

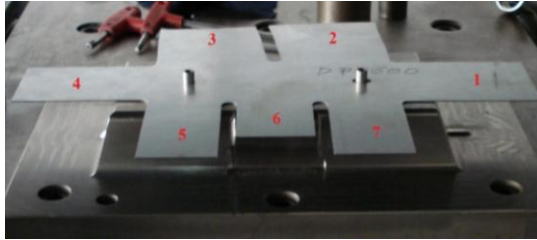
Bükme kalıbı tasarımı yedi farklı flanş geometrisini barındırmaktadır (bkz. Şekil 6.1-6.2). 1, 4, 5 ve 7 numaralı flanşlar kenar bükme yöntemiyle şekillendirilmiştir ve bu flanşların uç kısımlarında dış flanş (outer flange) diye ifade ettiğimiz flanşlar bulunmaktadır. Geri yaylanmayı azaltmak için iki flanşta (Flanş #2 ve #3) süzdürme kullanılmıştır. 2 numaralı flanş dış bükey, 3 numaralı flanş ise iç bükey olacak şekilde bükülmüştür. 6 numaralı flanş ise düz bir şekilde bükülerek şekillendirilmiştir. Çizelge 6.1'de her bir flanşa ait genel özellikler sunulmuştur.

Flanşların numaralandırılmış hali ile büküm öncesi ve sonrasındaki görünümü Şekil 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir. Bu flanşlar, geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri en aza indirilecek şekilde tasarlanmış olmalıdır. Flanşlardaki geri yaylanma ölçümü için iki adet geri yaylanma açısı dikkate alınmıştır ( $\theta_1$  ve  $\theta_2$ ). Şekillendirme işlemi sonrasında oluşan geri yaylanma açılarını tespit etmek ve SEA sonuçlarını deney sonuçları ile kıyaslamak için, Şekil 6.3'te gösterilen bir ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Böylece, SEA sonuçları arasındaki ölçüm tutarlılığı güvence altına alınmıştır.

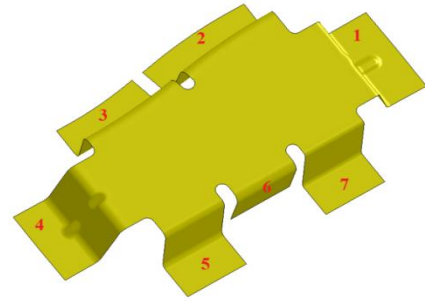
Çizelge 6.1. Her bir flanşa ait genel özellikler [90]

Flanş #	1	2	3	4	5	6	7
Kalıp yarıçapı (mm)	3	7	7	5	7	10	5
Zımba yarıçapı (mm)	5	7	7	5	7	-	5
Bükme açısı (°)	110	90	90	105	100	90	100
Flanş türü	KBDF <sup>a</sup>	İBF <sup>b</sup>	DBF <sup>c</sup>	KBDF	KBDF	DF <sup>d</sup>	KBDF
Kurs boyu (mm)	40	40	40	40	40	35	40
Çekme boncuğu	Evet	-	-	Evet	-	-	-

<sup>a</sup>kenar bükme dış flanş; <sup>b</sup>iç bükey flanş; <sup>c</sup>dış bükey flanş; <sup>d</sup>düz flanş.



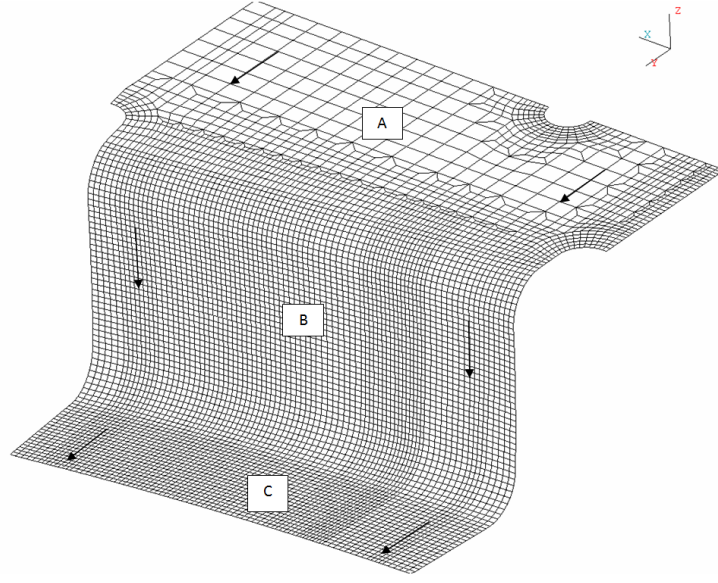
Şekil 6.1. Şekil verme işlemi öncesi  
flanşların görünümü [90]



Şekil 6.2. Şekil verme işlemi sonrası  
flanşların görünümü [90]

Her bir flanş için iki geri yaylanma açısı da A-B ve B-C yüzeyler arasında ölçülmüştür (Şekil 6.3). Daha sonra bu açıların ortalama değerleri Denklem (6.1) içerisinde kullanılarak geri yaylanma açıları  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  elde edilmiştir [90].

$$\theta_i = \theta_{hedef} - (\text{Yüzeyler arasındaki açı})_{ortalama} \quad (6.1)$$



Şekil 6.3. Geri yaylanma açısı ölçüm yöntemi [90]

İlgilenilen problemin sahip olduğu değişkenler iki gruba ayrılmıştır. İlk grup iki tasarım değişkeninden oluşmaktadır; (i) kalıp yarıçapı  $R_d$  ve (ii) zımba yarıçapı  $R_p$ . İkinci grup, yedi adet rastsal değişkeni içermektedir; (i) akma gerilmesi  $\sigma_y$ , (ii) pekleşme üsteli  $n$ ; (iii) pekleşme katsayısı  $K$ ; (iv-vi) anizotropi katsayıları  $R_0$ ,  $R_{45}$  ve  $R_{90}$  ve (vii) haddelene yönü,  $HY$ . Bu çalışmada, her bir flanş için üç farklı optimizasyon durumu dikkate alınmıştır (sadece Flanş # 6 için tek bir durum var). İlk durum,  $\theta_1$  açısının hem ortalama hem de standart sapma değerinin minimize edildiği durumdur. İkinci durum,  $\theta_2$  açısının hem ortalama hem de standart sapma değerinin minimize edildiği durumdur. Son durum ise  $\theta_1 + \theta_2$  toplamının hem ortalama hem de standart sapma değerinin minimize edildiği durumdur. Flanş #6'nın tasarımından dolayı sadece  $\theta_1$  açısının optimizasyonu dikkate alınmıştır. Bahsedilen gürbüz optimizasyon problemleri (6.2)-(6.4)'te gösterildiği şekilde formüle edilebilir.

$$\begin{aligned}
&\text{bul} && R_d, R_p \\
&\text{küçült} && w_1 \frac{\mu_{\theta_1}(R_d, R_p)}{\mu_{\bar{\theta}_1}} + w_2 \frac{\sigma_{\theta_1}(R_d, R_p)}{\sigma_{\bar{\theta}_1}} \\
&\text{öyle ki} && R_d^L \leq R_d \leq R_d^U \\
&&& R_p^L \leq R_p \leq R_p^U
\end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
&\text{bul} && R_d, R_p \\
&\text{küçült} && w_1 \frac{\mu_{\theta_2}(R_d, R_p)}{\mu_{\bar{\theta}_2}} + w_2 \frac{\sigma_{\theta_2}(R_d, R_p)}{\sigma_{\bar{\theta}_2}} \\
&\text{öyle ki} && R_d^L \leq R_d \leq R_d^U \\
&&& R_p^L \leq R_p \leq R_p^U
\end{aligned} \tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}
&\text{bul} && R_d, R_p \\
&\text{küçült} && w_1 \frac{\mu_{(\theta_1+\theta_2)}(R_d, R_p)}{\mu_{(\bar{\theta}_1+\bar{\theta}_2)}} + w_2 \frac{\sigma_{(\theta_1+\theta_2)}(R_d, R_p)}{\sigma_{(\bar{\theta}_1+\bar{\theta}_2)}} \\
&\text{öyle ki} && R_d^L \leq R_d \leq R_d^U \\
&&& R_p^L \leq R_p \leq R_p^U
\end{aligned} \tag{6.4}$$

Burada  $R_d^L, R_p^L, R_d^U,$  ve  $R_p^U$  sırasıyla  $R_d$  ve  $R_p$ 'nin alt ve üst sınır değerleridir.  $\mu$  ve  $\sigma$  ise ortalama ve standart sapma değerini belirtir.  $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2,$  ve  $\bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2$  ile gösterilen değerler  $\theta_1, \theta_2,$  ve  $\theta_1 + \theta_2$  için olan nominal değerleri ifade eder. (6.2)-(6.4)'te geri yaylanma açılarının hem ortalama hem de standart sapma değeri ( $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\theta_2}, \sigma_{\theta_2}, \mu_{\theta_1+\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_1+\theta_2}$ ) minimize edilmiştir. Ağırlık katsayıları olan  $w_1$  ve  $w_2,$  toplamları  $w_1 + w_2 = 1$  eşitliğini sağlayacak şekilde geri yaylanmanın ortalama veya standart sapma değerinin hangisinin azaltılması önemli ise o duruma uygun olarak belirlenmiştir. Örneğin, geri yaylanmanın ortalama değerinin azaltılması standart sapma değerinin azaltılmasından daha önemli ise ağırlık katsayıları  $w_1 > w_2$  olacak şekilde belirlenir.

Genel olarak, tüm flanşlar için toplamda 19 farklı optimizasyon durumu oluşturulmuş ve bu bölümde tanımlanan optimizasyon problemleri MATLAB®



programının bir fonksiyonu olan ve sıralı karesel programlama yöntemini kullanarak çözüm yapan “*fmincon*” ile çözülmüştür. Global optimumu bulma olasılığını arttırmak için birden fazla başlangıç noktası kullanılmıştır.

## 6.2. 7-Flanşlı Tasarım için Sonlu Elemanlar Analizleri

SEA sonuçlarının doğruluğu ve hassasiyeti, fiziksel süreç parametrelerine ait benzetimin nasıl yapıldığına bağlıdır. Ayrıca, temas algoritması, entegrasyon noktalarının sayısı, eleman boyutu, eleman formülasyonu ve malzeme modeli gibi bazı sayısal ve matematiksel parametreler sonuçların doğruluğunu etkilemektedir [5]. Malzemenin akma kriteri, sac levhanın anizotropik davranışına uygun olacak şekilde 3-parametre Barlat malzeme modeli kullanılarak belirlenmiştir. Malzemenin gerçek plastik gerilme-gerçek plastik birim şekil değiştirme eğrisi Swift pekleşme kuralına göre elde edilmiştir (Denklem 6.5) [90].

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (6.5)$$

Burada  $\sigma$  gerçek plastik gerilme;  $K$  pekleşme katsayısı;  $\varepsilon_0$  akma gerilmesine karşılık gelen başlangıç birim şekil değiştirme değeri;  $\varepsilon^p$  gerçek plastik birim şekil değiştirme ve  $n$  de pekleşme üstelidir. DP600 çeliğine ait malzeme özellikleri Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. DP600 çeliğine ait malzeme özellikleri [90]

$K$ (MPa)	$n$	$\varepsilon_0$	$\sigma_y$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\nu$	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$
1207.8	0.222	0.006509	395	210	0.3	0.70	0.70	0.86

Şekillendirme benzetimleri açık (explicit) ve kapalı (implicit) formülasyonlar kullanılarak gerçekleştirilebilir [89]. Açık formülasyon hesaplama zamanını azaltır, ancak yakınsama problemini de beraberinde getirir. Uygun sayısal parametreler seçilerek (örneğin kalıp hızı) bu sorunun üstesinden gelinebilir. Kalıp hızının gerçek değerinin sonlu elemanlar analizleri içerisinde kullanılması büyük hesaplama

yüklerine neden olur. Öte yandan, atalet etkilerini önlemek için kalıp hızının kritik bir değeri geçmemesi gerekir. Bu çalışma için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kalıp hızı 2000 mm/sn olarak alınmıştır.

Sac levhanın sonlu elemanlar modeli 79932 adet şekil değiştirebilen dörtgen kabuk elemanlar ile oluşturulmuştur. Dörtgen elemanın minimum eleman boyutu  $0.5 \times 0.5$  mm'dir. Tam entegre kabuk eleman (fully integrated shell element) formülasyonu kullanılmıştır. Zimba, kalıp ve tutucu gibi parçalar katı olarak modellenmiş ve diğer elemanlara göre nispeten daha büyük (coarse) elemanlar tercih edilmiştir. Zimba ve kalıp omuz yarıçaplarında (shoulder radii) 11 adet eleman oluşturulmuştur. "ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE" adlı temas algoritması kullanılarak temas tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.125 ve 0.06 olarak alınmıştır.

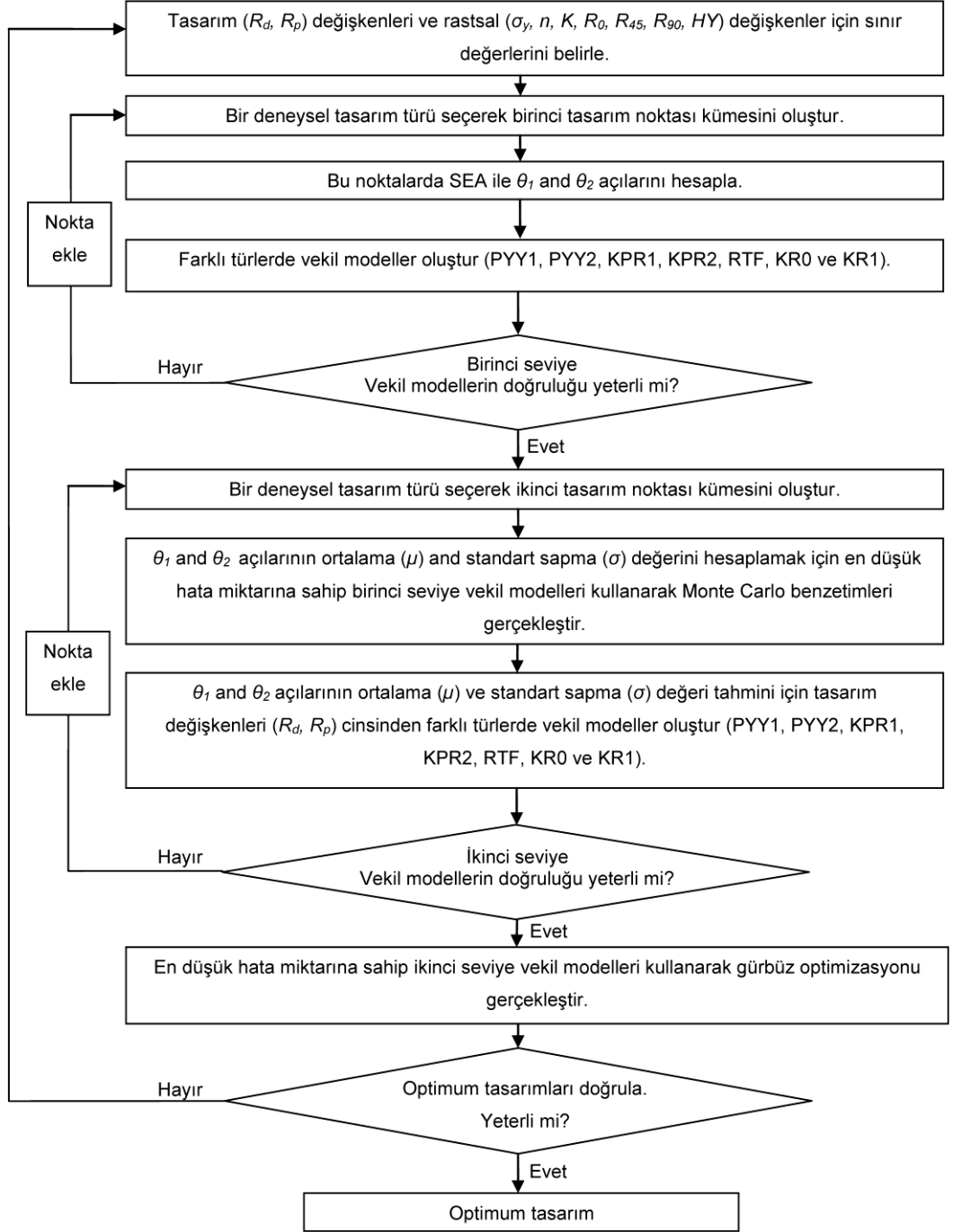
0.8 mm'lik sac kalınlığı için kalınlık boyunca gerilme dağılımını elde edebilmek amacıyla yedi adet entegrasyon noktası kullanılmıştır. Belirlenen bu fiziksel ve sayısal parametreler için Xeon X5550 2.67 GHz 16 CPU işlemcisi ile yapılan SEA 8 saat ve 13 dakika sürmüştür. 15 entegrasyon noktası kullanıldığında hesaplama süresi 24 saat 37 dakikaya ulaşmıştır. SEA sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Çizelge 6.3'te yapılmıştır. Yapılan on üç adet geri yaylanma tahmininden dokuzunun sahip olduğu mutlak hata değerinin  $1^\circ$ 'den daha küçük veya  $1^\circ$ 'ye eşit olduğu gözlemlenmiş ve bu durum makul kabul edilmiştir.

Çizelge 6.3. Geri yaylanma açılarına ait SEA sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması [90]

Flanş #	Deney (Ort.)		SEA		Hata	
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_1$	$\theta_2$
1	0.0	1.0	0.6	1.8	0.6	0.8
2	10.3	6.2	6.4	5.2	-3.9	-1
3	9.7	4.3	7.6	6.4	-2.1	2.1
4	0.9	3.2	0.6	4.2	-0.3	1
5	5.7	3.9	3.7	4.3	-2	0.4
6	10.4	-	9.8	-	-0.6	-
7	5.5	6.0	5.0	6.5	-0.5	0.5

### 6.3. Vekil Modeller

Bu çalışmada iki farklı seviyede vekil modeller oluşturulmuştur. Birinci seviyede oluşturulan vekil modeller aracılığıyla tasarım değişkenlerinin ve rastsal değişkenlerin geri yaylanma ile olan ilişkisi elde edilmiştir. Oluşturulan bu ilk seviye vekil modeller Monte Carlo benzetimi içinde kullanılarak geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri hesaplanmıştır. Bu değerleri tasarım değişkenleri cinsinden ifade edebilmek amacıyla ikinci seviye vekil modeller oluşturulmuş ve daha sonra bu vekil modeller gürbüz optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Şekil 6.4'te yedi flanşlı tasarım için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon sürecinin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Yedi flanşlı tasarım için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon sürecinin akış şeması

### 6.3.1. Birinci seviye vekil modeller için örnekleme noktalarının oluşturulması

Deney tasarımı yöntemleri (DoE) arasından Latin hiperküp örnekleme yöntemi seçilerek [25] iteratif bir şekilde örnekleme noktaları arasındaki minimum mesafeyi en üst düzeye çıkaracak örnekleme noktaları oluşturulmuştur. Bahsedilen bu yöntem, MATLAB® programında “*lhsdesign*” fonksiyonu ve en fazla 20 iterasyonluk “*maximin*” kriteri kullanılarak uygulanmıştır. Farklı malzeme özellikleri, kalıp ve zımba yarıçapları için 65 adet tasarım noktası oluşturulmuş ve bu noktalarda geri yaylanma açıları ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) her bir flanş için LS-DYNA programı kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarım değişkenleri ve rastsal değişkenler için minimum ve maksimum değerler Çizelge 6.4 ve 6.5'te belirtilmiştir. Rastsal değişkenlerin alt ve üst sınırları  $\mu - 5\sigma$  ve  $\mu + 5\sigma$  değerlerini tanımlamaktadır.

Çizelge 6.4. Her bir flanş için tasarım değişkenlerinin (zımba ve kalıp yarıçapının) minimum ve maksimum değerleri

Flanş #	1	2		3		4	5		6	7	
Değişken	$R_p^*$	$R_d^*$	$R_p$	$R_d$	$R_p$	$R_p$	$R_d$	$R_p$	$R_p$	$R_d$	$R_p$
Min.	2	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3
Maks.	4	10	10	10	10	6	10	10	12	10	10

\* $R_d$  ve  $R_p$  değerleri mm cinsindedir.

Çizelge 6.5. Rastsal değişkenlerin minimum ve maksimum değerleri

Değişken	$\sigma_y^*$	$K^*$	$n$	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$	$HY^{**}$
Min.	230	950	0.140	0.7	0.7	0.8	0
Maks.	430	1210	0.222	1.1	1.2	1.4	1

\* $\sigma_y$  ve  $K$  değerleri MPa cinsindedir, \*\*HY, haddeleme yönünü belirtir ( $y=0$ ,  $x=1$ ).

### 6.3.2. Birinci seviye vekil modellerin oluşturulması

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere vekil modellerin oluşturulabilmesi için öncelikle bir deney tasarımı yöntemi seçilerek tasarım noktaları meydana getirilmiştir. Daha sonra bu noktalardaki yanıt değerleri sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanmıştır. Son olarak, bir önceki adımda elde edilen yanıt değerleri kullanılarak farklı tipte vekil modeller oluşturulmuştur. Bu bölümdeki çalışmada dört farklı vekil model türü kullanılmıştır. Bunlar, PYY (PYY1 birinci dereceden ve PYY2 ikinci dereceden), KPR (KPR1 birinci dereceden ve KPR2 ikinci dereceden), RTF (çoklu karesel (multiquadric) model) ve KR'dir (KR0 sıfırıncı ve KR1 birinci dereceden eğilim modeli).

### 6.3.3. Birinci seviyedeki vekil modellerin doğruluğunun hesaplanması

Oluşturulan vekil modellerin doğruluğu her bir modele ait KOHK değeri hesaplanarak elde edilmiştir. KOHK değeri hesaplanırken çapraz doğrulama yönteminden faydalanılmıştır (Denklem 6.6).

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_{(i)})^2} \quad (6.6)$$

Burada  $N$ , tasarım noktası sayısını;  $y^i$ , çapraz doğrulama için ayrılan her bir  $x_i$  noktasına karşılık gelen gerçek yanıt değerini;  $\hat{y}^{(i)}$  ise vekil model kullanılarak tahmin edilen yanıt değerini ifade etmektedir. Bir sonraki aşamada KOHK değeri, elde edilen yanıt değerlerinin aralığı ( $\Delta y$ ) ile normalize edilmiştir (Denklem 6.8).

$$\Delta y = y_{\max} - y_{\min} \quad (6.7)$$

$$\varepsilon = (KOHK / \Delta y) \times 100 \quad (6.8)$$

Denklem (6.8)'deki  $y_{\max}$  ve  $y_{\min}$  sırasıyla 65 adet tasarım noktasında hesaplanan yanıt değerlerinin maksimum ve minimum değerlerini belirtmektedir. Çizelge 6.6'da

her bir flanş için belirlenen en doğru vekil model tipleri gösterilmiştir. Birçok durum için KR vekil modellerinin PYY, KPR ve RTF vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu görülmüştür. Flanş #1'den Flanş #7'ye kadar  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan vekil modellerin doğrulukları Çizelge 6.7-6.13 sunulmuştur.

Çizelge 6.6. Birinci seviyede her bir flanş için belirlenen en iyi vekil model tipleri

Flanş #	$\theta_1$ için tahmin modeli	$\theta_2$ için tahmin modeli
1	KPR1	PYY1
2	RTF	KR1
3	RTF	KR1
4	KPR1	KPR1
5	KR1	KR1
6	KR0	---
7	RTF	KR1

Çizelge 6.7.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları (Flanş #1)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	11.33	17.46	<b>11.15</b>	21.69	13.76	23.79	11.54
<b>R<sup>2</sup></b>	0.80	0.52	<b>0.80</b>	0.26	0.70	0.11	0.79
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	<b>7.55</b>	10.84	7.85	18.25	8.64	11.87	7.67
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.82</b>	0.63	0.81	-0.05	0.76	0.55	0.81

Çizelge 6.8.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #2)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	5.47	8.15	5.34	12.71	<b>4.91</b>	15.80	5.47
<b>R<sup>2</sup></b>	0.92	0.82	0.92	0.57	<b>0.94</b>	0.33	0.92
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	8.92	28.31	9.57	46.96	9.57	26.30	<b>8.88</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.89	-0.14	0.87	-2.14	0.87	0.02	<b>0.89</b>

Çizelge 6.9.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #3)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	7.20	11.44	7.54	15.31	<b>6.68</b>	15.96	7.03
<b>R<sup>2</sup></b>	0.88	0.71	0.87	0.48	<b>0.90</b>	0.43	0.89
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	8.88	17.42	8.87	23.05	9.00	12.46	<b>7.49</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.72	-0.08	0.72	-0.88	0.71	0.45	<b>0.80</b>

Çizelge 6.10.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #4)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	14.21	22.60	<b>14.16</b>	33.26	21.28	21.01	14.77
<b>R<sup>2</sup></b>	0.43	-0.44	<b>0.44</b>	-2.11	-0.27	-0.24	0.39
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	7.19	12.22	<b>7.07</b>	14.39	8.33	13.78	7.24
<b>R<sup>2</sup></b>	0.85	0.56	<b>0.85</b>	0.38	0.79	0.43	0.84



Çizelge 6.11.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #5)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	18.58	51.57	19.39	58.74	18.73	24.07	<b>18.44</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.53	-2.64	0.49	-3.72	0.52	0.21	<b>0.54</b>
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	11.28	23.33	11.47	28.41	11.68	15.58	<b>10.62</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.69	-0.31	0.68	-0.94	0.67	0.41	<b>0.73</b>

Çizelge 6.12.  $\theta_1$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #6)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	28.64	52.89	28.17	77.79	44.42	<b>27.98</b>	28.65
<b>R<sup>2</sup></b>	-0.08	-2.68	-0.05	-6.97	-1.60	<b>-0.03</b>	-0.08

Çizelge 6.13.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  tahmini için oluşturulan farklı vekil modellerin hata miktarları  
(Flanş #7)

	PYY1	PYY2	KPR1	KPR2	RTF	KR0	KR1
<i><math>\theta_1</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	16.37	28.45	16.88	37.12	<b>16.33</b>	19.79	16.37
<b>R<sup>2</sup></b>	0.49	-0.53	0.46	-1.61	<b>0.50</b>	0.26	0.49
<i><math>\theta_2</math> için vekil modellerin hata miktarları</i>							
<b>KOHK/<math>\Delta y</math> (%)</b>	12.64	18.66	13.69	34.36	14.00	13.99	<b>10.80</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.60	0.13	0.53	-1.95	0.51	0.51	<b>0.71</b>

## 6.4. Optimizasyon Yöntemi

Şekil 6.4'te gösterilen vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon yöntemi tasarım değişkenlerinin optimal değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri olan  $R_d$  ve  $R_p$  için alt ve üst sınır değerleri Çizelge 6.4'te verilmişti. Rastsal değişkenlerin ( $\sigma_y$ ,  $n$ ,  $K$ ,  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ ) normal dağılıma sahip olduğu varsayılmış ve dağılım parametreleri Çizelge 6.14'te belirtilmiştir.

Çizelge 6.14. Rastsal değişkenler için normal dağılım parametreleri

	$\mu$	$\sigma$
$\sigma_y$ [MPa]	330	20
$n$	0.1810	0.0082
$K$ [MPa]	1080	26
$R_0$	0.90	0.04
$R_{45}$	0.95	0.05
$R_{90}$	1.10	0.06

### 6.4.1. İkinci seviye vekil modellerin oluşturulması

Denklem (6.2-6.4)'teki  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\theta_2}, \sigma_{\theta_2}, \mu_{\theta_1+\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_1+\theta_2}$  değerlerini hesaplayabilmek için daha önce Bölüm 6.3.3'te belirlenen en doğru vekil modeller (65 adet tasarım noktası kullanılarak oluşturulan) Monte Carlo benzetimi (10,000 adet örnekleme) içerisinde kullanılmıştır. Daha sonra, tasarım değişkenleri ile  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_2}$  değerleri arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla ikinci kez vekil modeller oluşturulmuştur. Bu amaçla, Latin hiperküp örnekleme yöntemi kullanılarak yeni bir tasarım noktası kümesi (10 adet örnekleme) oluşturulmuştur. Her bir tasarım noktası için 10,000 adet örnekleme Monte Carlo benzetimleri yapılmıştır. Monte Carlo benzetimleri içerisinde rastsal değişkenlerin normal dağılım

parametrelerinden faydalanarak her biri için 10,000 adet farklı değer seçilmiştir. Yani,  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları her bir tasarım noktası için 10,000 kez hesaplanmış ve bu açıların ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiştir. Son olarak,  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_2}$  değerlerini tasarım değişkenleri cinsinden ifade edebilmek amacıyla Monte Carlo benzetimleri sonucu elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak vekil modeller oluşturulmuştur.

#### 6.4.2. İkinci seviyedeki vekil modellerin doğruluğunun hesaplanması

KOHK değerinin yanıt değerlerinin aralığına ( $\Delta y$ ) olan oranı kullanılarak her bir yanıt için en düşük hata miktarına sahip vekil modeller belirlenmiştir. Her bir flanş için en düşük hata miktarına sahip vekil model türleri Çizelge 6.15'te yer almaktadır. PYY vekil modellerinin KPR, RTF ve KR vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu görülmüştür.

Çizelge 6.15. Her bir flanş için en düşük hata miktarına sahip vekil model türleri (ikinci seviye vekil modeller arasından)

Flanş #	$\mu_{\theta_1}$	$\sigma_{\theta_1}$	$\mu_{\theta_2}$	$\sigma_{\theta_2}$
1	PYY2	PYY1	PYY2	PYY1
2	PYY2	KPR1	PYY1	KR0
3	KR0	PYY2	PYY1	PYY1
4	PYY1	PYY2	KR1	PYY1
5	KR1	KPR2	KR0	PYY2
6	PYY1	PYY1	---	---
7	RTF	KPR1	KR0	KR0

$\mu_{\theta_1+\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_1+\theta_2}$  değerleri Taylor serisi açılımı kullanılarak  $\mu_{\theta_1}, \sigma_{\theta_1}, \mu_{\theta_2}$ , ve  $\sigma_{\theta_2}$  cinsinden yaklaşık olarak:

$$\mu_{\theta_1+\theta_2} \cong \mu_{\theta_1} + \mu_{\theta_2} \quad (6.9)$$

$$\sigma_{\theta_1+\theta_2} \cong \sqrt{\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2} \quad (6.10)$$

denklemleri aracılığıyla hesaplanır. Denklem (6.9 ve 6.10),  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açılarının zayıf bir korelasyona sahip olduğu ve Taylor serisi açılımındaki yüksek dereceden terimlerin ihmal edildiği durumlarda geçerlidir.

## 6.5. Optimizasyon sonuçları

Bu bölümde, tüm flanşlar için elde edilen optimum sonuçlar belirtilmiştir.  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  ve  $\theta_1 + \theta_2$  optimizasyonu için toplam 19 adet optimizasyon durumu dikkate alınmıştır. Geri yayılanmanın ortalama veya standart sapma değerlerinden hangisinin azaltılmasının daha önemli olduğu tasarımcı tarafından belirlenmelidir. Bundan dolayı bu çalışmada her iki değer de ( $\mu$  ve  $\sigma$ ) eşit önemde kabul edilmiş ve Denklem (6.2-6.4)'teki ağırlık faktörleri  $w_1 = w_2 = 0.5$  olarak alınmıştır. Optimum sonuçlar ikinci seviye vekil modeller (tasarım değişkenleri cinsinden) aracılığıyla hesaplanmıştır. Daha sonra, optimum tasarımlar için Monte Carlo benzetimleri gerçekleştirilmiş ve ikinci seviye vekil modeller ile yapılan tahminlerin doğrulaması yapılmıştır.

### 6.5.1. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları

Flanş #1'in tasarımından dolayı kalıp ( $R_d$ ) ve zımba ( $R_p$ ) yarıçapları birbirine bağımlı olarak değişmektedir. Bu nedenle sadece  $R_p$  tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır.  $R_p$ ,  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  değerlerini tahmin etmek için oluşturulan vekil modeller için girdi olarak belirlenmiştir.  $R_p$  için alt ve üst sınır değerleri  $2mm \leq R_p \leq 4mm$  olacak şekilde seçilmiştir. PYY1 vekil model türü  $\sigma_{\theta_1}$  ve  $\sigma_{\theta_2}$  tahmini için kullanılırken PYY2 ise  $\mu_{\theta_1}$  ve  $\mu_{\theta_2}$  tahmini için kullanılmıştır (bkz. Çizelge 6.15). Çizelge 6.16, Flanş #1'in  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları için PYY vekil modellerinin sahip olduğu katsayıları göstermektedir.  $R_p$  cinsinden bir PYY vekil modeli aşağıda gösterilen şekilde bir biçime sahiptir (Denklem 6.11 ve 6.12);

$$PYY1 = \text{Sabit sayı} + \text{Katsayı} * R_p \quad (6.11)$$

$$PYY2 = \text{Sabit sayı} + \text{Katsayı}_1 * R_p + \text{Katsayı}_2 * R_p^2 \quad (6.12)$$

Çizelge 6.16. Flanş #1'in  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları için PYY vekil modellerinin sahip olduğu katsayılar

	$\theta_1$		$\theta_2$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
<i>Sabit sayı</i>	0.83576	0.17261	2.09130	0.32097
$R_p$	0.74096	-0.00109	1.21400	0.00187
$R_p^2$	-0.09226	---	-0.14480	---

$\theta_1$  için Çizelge 6.16'da (2. ve 3. sütunlar) verilen katsayılarla sahip PYY türü vekil model kullanılarak gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri için ağırlık faktörleri gürbüz optimizasyon süreci içerisinde eşit olarak alınmıştır. Yani, geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değerinin minimize edilmesine eşit derecede önem verilmiştir. Çizelge 6.17'de nominal tasarım (2. sütun) ve optimum tasarım (bulunan optimum değerler için hem vekil model tahmini (3. sütun) hem de Monte Carlo benzetimi ile yapılan doğrulama (4. sütun)) için geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri karşılaştırılmıştır. Eğer vekil model tahminleri hiç hata içermeseydi, geri yaylanmanın ortalama değerinin % 12.5 oranında, standart sapma değerinin ise %2 oranında azaltılabileceği sonucuna varılabilirdi. Öte yandan vekil model tahminlerindeki hatalar nedeniyle geri yaylanmanın ortalama değeri yaklaşık olarak %12.3 azaltılmış ve standart sapma değeri ise nominal değerinde korunmuştur. Zimba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer aynı zamanda  $R_p$ 'nin alt sınır değeri de olan 2 mm'dir.

Daha sonra,  $\theta_2$  için Çizelge 6.16'da (4. ve 5. sütunlar) verilen katsayılara sahip PYY vekil modelleri kullanılarak gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir.  $\mu_{\theta_2}, \sigma_{\theta_2}$  ve  $R_p$  için optimum sonuçlar Çizelge 6.17'de (5-7.sütunlar) listelenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %12 oranında ve bunun yanında standart sapma değerinin de yaklaşık %3 oranında azalmış olduğu görülmüştür. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer  $\theta_1$  açısının minimize edilmesi durumunda elde edilen sonuca benzer şekilde 2 mm olarak tespit edilmiştir.

Son olarak,  $\theta_1+\theta_2$  için optimizasyon sonuçları Çizelge 6.17'de (8-10.sütunlar) sunulmuştur. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %12 ve standart sapma değerinin ise yaklaşık %2 oranında azalmış olduğu görülmüştür. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  minimizasyonlarında olduğu gibi 2 mm'dir.

Çizelge 6.17. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	2.227	1.949	1.952	4.436	3.940	3.903	6.663	5.889	5.854
$\sigma$	0.173	0.170	0.173	0.336	0.325	0.326	0.377	0.367	0.369
$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_p$	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

### 6.5.2. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları

Flanş #2 tasarımı için kalıp ( $R_d$ ) ve zımba ( $R_p$ ) yarıçapları birbirinden bağımsız olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla hem  $R_d$  hem de  $R_p$  tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır.  $R_d$  ve  $R_p$ ,  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  değerlerini tahmin etmek için oluşturulan vekil

modeller için girdi olarak belirlenmiştir.  $R_d$  ve  $R_p$  için alt ve üst sınır değerleri sırasıyla  $3mm \leq R_d \leq 10mm$  ve  $3mm \leq R_p \leq 10mm$  olacak şekilde seçilmiştir. KPR1 vekil modeli  $\sigma_{\theta_1}$  tahmini için kullanılırken PYY2 vekil modeli  $\mu_{\theta_1}$  tahmini için kullanılmıştır.  $\mu_{\theta_2}$  ve  $\sigma_{\theta_2}$  tahmini için sırasıyla PYY1 ve KR0 vekil modelleri kullanılmıştır.

İlk olarak  $\theta_1$  için gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Daha önce Flanş #1 optimizasyonunda belirtildiği gibi, geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri için ağırlık faktörleri eşit olarak alınmıştır. Çizelge 6.18'de nominal tasarım (2.sütun) ve optimum tasarım (bulunan optimum değerler için hem vekil model tahmini (3.sütun) hem de Monte Carlo benzetimi ile yapılan doğrulama (4.sütun)) için geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri karşılaştırılmıştır. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık olarak %46.3 ve standart sapma değerinin de yaklaşık %21 oranında azaltılabileceği görülmüştür. Kalıp yarıçapı  $R_d$  için bulunan optimum değer aynı zamanda  $R_d$ 'nin alt sınır değeri de olan 3 mm'dir. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer ise aynı zamanda  $R_p$ 'nin üst sınır değeri de olan 10 mm'dir.

Daha sonra,  $\theta_2$  için PYY1 ve KR0 vekil modelleri kullanılarak gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir.  $\mu_{\theta_2}, \sigma_{\theta_2}, R_d$  ve  $R_p$  için optimum sonuçlar Çizelge 6.18'de (5-7.sütunlar) listelenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %73.7 oranında azaldığı, bunun yanı sıra standart sapma değerinin yaklaşık %6.3 oranında arttığı görülmüştür. Kalıp yarıçapı  $R_d$  için bulunan optimum değer aynı zamanda  $R_d$ 'nin üst sınır değeri de olan 10 mm'dir. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer ise  $\theta_1$  açısının minimize edilmesi durumunda elde edilen sonuca benzer şekilde 10 mm olarak tespit edilmiştir.

Son olarak,  $\theta_1 + \theta_2$  için optimizasyon sonuçları Çizelge 6.18'de (8-10.sütunlar) sunulmuştur. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %47 ve standart sapma değerinin ise yaklaşık %27.5 oranında azalmış olduğu görülmüştür. Kalıp ( $R_d$ ) ve

zımba yarıçapı ( $R_p$ ) için bulunan optimum değerler  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  minimizasyonlarında olduğu gibi her ikisi için de 10 mm'dir.

Çizelge 6.18. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	4.260	1.754	2.286	6.015	1.535	1.581	10.276	5.321	5.457
$\sigma$	0.630	0.479	0.498	0.175	0.179	0.186	0.654	0.511	0.474
$R_d$	6.5	3.0	3.0	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0
$R_p$	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar olan optimizasyon sonuçları EK A kısmında verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi burada sonuçları verilen optimizasyon çalışmalarında ağırlık katsayıları birbirine eşit olarak ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ) alınmıştır. Farklı ağırlık katsayıları için ( $w_1=1, w_2=0$ ;  $w_1=0, w_2=1$ ) yapılan çalışmalar EK B'de verilmiştir. Tahmin edilen ve gerçekteki optimum değerler bu katsayıların aldıkları değerlere bağlı olarak değişecektir. Örneğin,  $\mu_{\theta_1}$  değerinin  $\sigma_{\theta_1}$  değerinden daha önemli olduğu kabul edilseydi, ki bu  $w_1 > w_2$  anlamına gelir, Çizelge 6.17'de belirtilen  $\mu_{\theta_1}$  değerinden daha düşük bir  $\mu_{\theta_1}$  değeri elde edilebilirdi. Fakat burada bir ödünleşim (trade-off) durumu ortaya çıkmaktadır. Eğer  $w_1$  katsayı  $w_2$ 'den büyük olsaydı, bu sefer de  $\sigma_{\theta_1}$  değeri eşit ağırlık katsayıları kullanılarak hesaplanan  $\sigma_{\theta_1}$  değerinden daha büyük olabilirdi. Buradan çıkarılacak sonuç, bu katsayıların belirlenmesinin tamamıyla tasarımcının inisiyatifinde olduğudur. Tasarımcının, elindeki sistemden nasıl bir performans beklediği  $w_1$  katsayısının  $w_2$ 'den büyük mü yoksa küçük mü olacağını belirlenmesi için önemlidir. Flanş #1'in  $\theta_1$  açısı örnek



gösterilerek yapılan bu değerlendirme diğer flanşlar için de yapılabilir. Flanş #1 için farklı ağırlık katsayıları kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 6.19 ve 6.20’de belirtilmiştir.

Çizelge 6.19. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	2.227	1.949	1.952	4.436	3.940	3.903	6.663	5.889	5.854
$\sigma$	0.173	0.170	0.173	0.336	0.325	0.326	0.377	0.367	0.369
$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_p$	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge 6.20. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=0, w_2=1$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	2.227	1.949	1.952	4.436	3.940	3.903	6.663	5.889	5.854
$\sigma$	0.173	0.170	0.173	0.336	0.325	0.326	0.377	0.367	0.369
$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_p$	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Tüm flanşlar için elde edilen optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri Çizelge 6.21’de bir arada sunulmuştur. İncelenen birçok durum için kalıp ve zımba yarıçapının alt ve üst sınır değerlerinin sonuçlar üzerinde oldukça etkili olduğu

söylenbilir. Flanş #1'den Flanş #4'e kadar optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri alt veya üst sınır değerlerinde elde edilmiştir. Öte yandan, Flanş #5 ve Flanş #7 için yapılan optimizasyon çalışmaları, bu flanşlar için belirlenen tüm optimum kalıp yarıçapı değerlerinin alt ve üst sınır değerleri arasında bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca yine bu iki flanş için optimum zımba yarıçapı değerleri çoğunlukla üst sınır değerinde bulunmaktadır ( $\theta_2$  minimizasyonu için olan durum hariç).

Tüm bunlara ek olarak, Flanş #6 için zımba yarıçapının alt sınır değerinin  $\theta_1$  minimizasyonu için kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.21. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1 = w_2 = 0.5$ ). Tasarım değişkeninin alt veya üst sınır değerini aldığı (AS) veya (ÜS) ile gösterilmiştir. Tüm değerler [mm] cinsindedir.

Minimizasyon yapılan Flanş #	1	2	3	4	5	6	7
<i>Optimum kalıp yarıçapı</i>							
$\theta_1$	---	3.0 (AS)	3.0 (AS)	---	9.53	---	8.45
$\theta_2$	---	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	---	8.75	---	8.38
$\theta_1 + \theta_2$	---	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	---	9.53	---	8.45
<i>Optimum zımba yarıçapı</i>							
$\theta_1$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	7.52	6.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	3.0 (AS)	10.0 (ÜS)
$\theta_2$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	4.0 (AS)	7.55	---	4.04
$\theta_1 + \theta_2$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	6.0 (AS)	10.0 (ÜS)	---	10.0 (ÜS)

## 6.6. Birden fazla vekil model kullanarak optimizasyon

Bundan önceki bölümlerde birinci ve ikinci seviye için en doğru vekil model tipleri belirlenmiş ve bu vekil model tipleri ile gürbüz optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Fakat, Acar vd. [45] yaptıkları çalışmada her zaman en doğru vekil model tipini kullanarak optimum sonuca ulaşabilme garantisinin elde edilemediğini göstermişlerdir. Burada “optimum sonuç” ifadesi ile anlatılmak

istenilen, ilgilenilen problem için minimum ortalama geri yaylanma değerini ve standart sapmasını sağlayacak tasarım değişkeni/değişkenleri değeridir. 7-flanşlı tasarım için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon çalışması, en doğru vekil model tipinin yanında ortalama performanslı ve en kötü performanslı vekil model tipleri kullanarak tekrarlanmıştır. Eğer tüm flanşlar ve geri yaylanma açıları için böyle bir çalışma yapmak istersek, çok fazla sayıda optimizasyon problemi çözmemiz gerekir. Bu yüzden, yalnızca tek bir flanş ve tek bir geri yaylanma açısı için bir gürbüz optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Flanşlar içerisinde 5 no.lu flanş ve geri yaylanma açısı olarak da  $\theta_2$  belirlenmiştir. Bunun sebebi, Flanş #5  $\theta_2$  için elde edilen optimum tasarım değişkeni değerlerinin alt ve üst sınır değerleri arasında olmasıdır (bkz. Çizelge A.2). Eğer optimum sonucu alt veya üst sınır değerlerinde elde edilmiş bir tasarım kullansaydık, büyük ihtimalle farklı vekil modeller ile yapılan optimizasyon çalışmaları da optimum sonucu tasarım değişkenlerinin alt veya üst sınır değerlerinde belirleyecekti.

En yüksek doğruluğa sahip vekil model tipinin optimum sonucu sağlayıp sağlayamadığını araştırmak amacıyla aşağıda belirtilen şekilde bir yol izlenmiştir;

- Öncelikle, birinci seviyede Flanş #5  $\theta_2$  için belirlenen en iyi vekil model tipine (KR1) ek olarak, ortalama performansa (RTF) ve en kötü performansa (KPR2) sahip vekil model tipleri de kullanılarak Monte Carlo benzetimleri gerçekleştirilmiştir.
- Daha sonra, ikinci seviyedeki en iyi vekil model tipine (KR0) ek olarak, bir önceki adımda olduğu gibi, ortalama performansa (PYY1) ve en kötü performansa (KPR2) sahip vekil model tipleri kullanılarak her bir vekil model tipi için gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu süreç sonucunda elde edilen optimum tasarım değişkeni değerleri Çizelge 6.22'de sunulmuştur.
- Son aşama olarak, belirlenen vekil modellerden herhangi biri için elde edilen optimum tasarım kullanıldığında ortaya çıkacak geri yaylanma ortalama ve standart sapma değerinin diğer vekil modeller kullanıldığında elde edilecek

olan sonuçlarla kıyaslaması gerçekleştirilmiştir (Çizelge 6.23). Örneğin, birinci seviyede KR1 vekil model tipinin kullanıldığı ve ikinci seviyede KR0, PYY1 ve KPR2 vekil modelleri ile gürbüz optimizasyonun gerçekleştirildiği durum için farklı optimum tasarımlar kullanılarak her bir vekil model aracılığıyla ortalama geri yaylanma değeri hesaplanmıştır. Daha sonra bu ortalama değerler birinci seviyede RTF ve KPR2 vekil modellerin kullanıldığı durumda elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve minimum ortalama geri yaylanma değerini sağlayan birinci seviye vekil model tipi belirlenmiştir (Çizelge 6.23).

Çizelge 6.22. Birinci ve ikinci seviyede farklı vekil model tipleri kullanılarak elde edilen optimum tasarım değişkenleri

		$\theta_2 (w_1=w_2=0.5) [^\circ]$									
		1. seviye	KRI			RTF			KPR2		
		2. seviye	KR0*	PYY1	KPR2	KR0	PYY1	KPR2	KR0	PYY1	KPR2
		Nom.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	Opt.	
Flanş #5	$\mu$	5.677	3.443	3.144	1.142	3.190	2.929	2.074	3.948	3.383	3.227
	$\sigma$	0.371	0.410	0.289	0.379	0.281	0.177	0.458	1.174	0.800	1.222
	$R_d$	6.50	8.75	10.00	10.00	9.97	10.00	10.00	9.33	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	7.55	3.00	5.19	4.43	3.00	3.26	4.76	3.00	4.43

\*1.seviyede KR1 ve 2.seviyede KR0 durumu Flanş #5  $\theta_2$  için belirlenen en doğru vekil model tipleridir.

Çizelge 6.23. Farklı optimum tasarımların farklı vekil model tiplerinde kullanılmasıyla elde edilen ortalama geri yaylanma değerleri

		$\theta_2 (w_1=w_2=0.5) [^\circ]$					
		$R_d$ [mm]	$R_p$ [mm]	$KR0$	$PYY1$	$KPR2$	$Ort.[^\circ]$
KR1	8.75	7.55	3.443	4.075	2.735	3.417	
	10.00	3.00	5.320	3.144	1.387	3.284	
	10.00	5.19	4.673	3.154	1.142	2.990	
RTF	9.97	4.43	3.190	3.041	2.205	2.812	
	10.00	3.00	3.359	2.929	2.063	2.784	
	10.00	3.26	3.314	2.946	2.074	<b>2.778</b>	
KPR2	9.33	4.76	3.948	4.141	3.779	3.956	
	10.00	3.00	4.362	3.383	3.492	3.746	
	10.00	4.43	4.094	3.496	3.227	3.605	

7-flanşlı tasarım problemi için birinci seviyede RTF vekil model tipi kullanıldığında optimum tasarım değişkenleri  $R_d=10$  mm ve  $R_p=3.26$  mm olarak belirlenmiştir. Bu tasarım ile elde edilen ortalama geri yaylanma değeri diğer vekil model tipleri kullanıldığında elde edilen geri yaylanma değerleri içerisinde en düşük değere sahip olmaktadır. Dolayısıyla, vekil model tabanlı tasarım yaparken, en doğru vekil model tipini kullanmanın her zaman optimum sonuca ulaşma garantisini vermediği teyit edilmiştir. Bunun yerine, birden fazla vekil model tipi kullanıp, “aday optimum” tasarımlar belirleyip, içlerinden en iyi performansı sergileyen tasarımı seçmek daha iyi bir yol olacaktır.

## 6.7. Tartışma

Bu bölümde, DP600 kodlu çift fazlı çelikten imal edilmiş yedi farklı flanş tasarımından oluşan bir büküm parçasında meydana gelen iki farklı geri yaylanma açısı ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) değerinin gürbüz optimizasyonu incelenmiştir. Akma gerilmesi, pekleşme üsteli, pekleşme katsayısı, anizotropi katsayıları ve haddelene yönü ilgilenilen problemin rastsal değişkenleri olarak belirlenmiştir. Geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri vekil modeller kullanılarak optimize edilmiştir. Bu

çalışmada iki farklı seviyede vekil modeller oluşturulmuştur. İlk seviyede oluşturulan vekil modeller aracılığıyla geri yaylanma ile tasarım değişkenleri ve rastsal değişkenler arasında bir ilişki kurulmuştur. Daha sonra bu vekil modeller Monte Carlo benzetimleri içerisinde kullanılarak geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri hesaplanmıştır. İkinci seviyede oluşturulan vekil modeller aracılığıyla geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri tasarım değişkenleri cinsinden ifade edilmiştir. Bu çalışma kapsamında;

- Dört farklı vekil model türü uygulanmıştır (PYY, KPR, RTF ve KR ). İlk seviyede oluşturulan vekil modeller arasından KR vekil model türünün PYY, KPR ve RTF vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. İkinci seviyede oluşturulan vekil modeller arasından PYY vekil model türünün KPR, RTF ve KR vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu belirlenmiştir.
- Vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiş ve bulunan optimum değerlerin doğrulaması Monte Carlo benzetimleri yapılarak sağlanmıştır. Geri yaylanmanın ortalama değeri için dikkate değer seviyelerde %7 ila %85 arasında değişen azalmalar sağlanmıştır. Birçok durum için optimum tasarım değişkeni değerlerinin alt veya üst sınır değerlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir.
- En doğru sonucu veren vekil model tipinin optimum sonucu sağlayıp sağlayamadığını araştırmak amacıyla gürbüz optimizasyon çalışması, en doğru vekil model tipinin yanında ortalama ve en kötü performanslı vekil model tipleri kullanarak tekrarlanmıştır. Vekil model tabanlı tasarım yaparken, en doğru vekil model tipini kullanmanın her zaman optimum sonuca ulaşma garantisini vermediği görülmüştür. Bunun yerine, birden fazla vekil model tipi kullanıp, “aday optimum” tasarımlar belirleyip, içlerinden en iyi performansı sergileyen tasarım seçilmelidir.

## 7. SONUÇLAR

### 7.1. Tartışma

Bu tez çalışması kapsamında:

- Malzeme özelliklerinin *partiden-partiye* ve *parçadan-parçaya* olan varyasyonları çift döngülü bir Monte Carlo benzetimi aracılığıyla modellenmiş ve geri yaylanmanın ortalama değeri ve varyasyonu hesaplanmıştır.
- U-büküm işlemi için geri yaylanmayı ve varyasyonunu en fazla etkileyen şekil verme süreci parametreleri ve süreçteki belirsizlik parametreleri tayin edilmiştir.
- U-büküm ve yedi farklı flanş tasarımından oluşan bir büküm parçası için hem geri yaylanma ve hem de geri yaylanma varyasyonlarını minimize etmek amacıyla bir vekil model tabanlı gürbüz tasarım çerçevesi oluşturulmuş ve tasarım değişkenlerinin optimum değerleri gürbüz optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir.

### 7.2. Sonuçlar

- DP600 çeliklerinde U-büküm işlemi sonucu meydana gelen geri yaylanma değeri analitik çözüm kullanılarak hesaplanmıştır. Geri yaylanmanın ortalama ve standart sapması bir gürbüz optimizasyon çerçevesi içerisinde minimize edilmiştir. Sac incelmesinin müsaade edilen bir değerden küçük olma zorunluluğu olasılıksal bir kısıt olarak ifade edilmiş ve bu kısıta bağlı olarak geri yaylanmanın hem ortalama değerini hem de standart sapmasını minimize edecek gürbüz optimizasyon formülasyonu oluşturulmuştur. Olasılıksal kısıt için güvenilirlik değeri %99 olarak belirlenmiştir. Monte Carlo benzetimi aracılığıyla geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalama değeri ve varyasyonu hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Monte Carlo benzetimlerinin doğrudan gürbüz optimizasyon sürecine entegre edilmesi hesaplama yükünü çok fazla arttıracığından bunun yerine hesaplama yükünü azaltabilmek amacıyla geri yaylanmanın ve sac incelmesinin ortalama değer ve varyasyon tahmini için vekil modeller oluşturulmuştur. Dört farklı vekil model tipi kullanılmıştır. Bunlar; ikinci dereceden polinom yanıt yüzey (PYY2), radyal-tabanlı fonksiyonlar (RTF) ve Kriging'dir (sabit eğilim modeli, KR0 ve birinci dereceden eğilim modeli, KR1). PYY2 geri yaylanmanın ortalama değeri için en uygun, varyasyonu için ise ikinci en uygun vekil model tipi olarak belirlenmiştir. PYY2 vekil modellerinin hem oluşturulması hem de yorumlanması diğer vekil model tiplerine göre daha kolay olduğundan optimizasyon sürecinde PYY2 vekil modelleri kullanılmıştır.
- Üç farklı müsaade edilebilir sac incelmesi değeri (%5, %10, %15) dikkate alınmış ve bu değerlerin optimizasyon sonuçları üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan görülmüştür ki müsaade edilebilir sac incelmesi değeri arttıkça optimum kalıp yarıçapı ( $R_d$ ) değeri küçülmekte böylece geri yaylanmanın hem ortalama değeri hem de varyasyonu azalmaktadır.
- Basit bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiş ve akma gerilmesi en etkili rastsal değişken olarak belirlenmiştir. Bu analiz sayesinde, tedarik edilen malzemelerin akma gerilmesi değerlerindeki belirsizlik ne kadar azaltılırsa daha düşük geri yaylanma varyasyonu sahip bir üretim süreci meydana getirilebileceği görülmüştür.
- Çift döngülü Monte Carlo benzetimi yöntemi kullanılarak farklı malzeme özelliklerine sahip partilerin ve farklı parçaların geri yaylanma varyasyonu üzerine olan etkisi incelenmiştir. Görülmüştür ki, akma gerilmesinin *partiden-partiye* olan varyasyon değeri arttıkça, *parçadan-parçaya* geri yaylanma varyasyonu değişmemekte, *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu artmaktadır.



➤ DP600 çeliklerinde U-büküm işlemi sonucu meydana gelen geri yaylanma değeri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve gürbüz optimizasyon yöntemi ile de üç farklı kritik sac incelme değeri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri belirlenmiştir. Sonrasında çift döngülü Monte Carlo benzetimi kullanılarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Bu bölümde, Latin hiperküp örnekleme yöntemi kullanılarak 120 adet tasarım noktası oluşturulmuş ve bu noktalarda  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  değerleri LS-DYNA programı ile hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak PYY1, PYY2, KPR1, KPR2, RTF, KR0 ve KR1 vekil modelleri oluşturulmuştur. Bu vekil modellerin hata miktarları çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak OMH değeri ile hesaplanmış ve  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\rho$  ve  $\Delta t$  tahmini için en düşük hata miktarına sahip modeller seçilmiştir. Bu hesaplama sonucu hem  $\theta_1$  hem de  $\theta_2$  tahmini için PYY1, hem  $\rho$  hem de  $\Delta t$  tahmini için ise KPR1 vekil modelleri en iyi vekil modeller olarak belirlenmiştir.
- U-büküm sürecini en çok etki eden parametreler hassasiyet analizi gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı ( $f_s$ ), pekleşme katsayısı ( $K$ ) ve pekleşme üsteli ( $n$ ) parametrelerinin yan duvar açısı ( $\theta_1$ ) tahmini için en etkili parametreler olduğu görülmüştür. Flanş açısı ( $\theta_2$ ) tahmini için ise  $f_s$ ,  $K$  (X4),  $n$  (X5) ve kalıp yarıçapı ( $R_d$ ) parametrelerinin en önemli parametreler olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca,  $\theta_1$  tahmini için en etkili olan parametrelerin yan duvar kıvrımı ( $\rho$ ) tahmini için de en etkili parametreler olduğu görülmüştür. Sac incelmesi ( $\Delta t$ ) tahmini için  $f_s$  ve  $R_d$  en etkili parametreler olarak belirlenmiştir.
- Yan duvar açısı ( $\theta_1$ ) için bir gürbüz optimizasyon problemi, tasarım değişkeni olarak belirlenen dört adet parametreye ( $c/t$ ,  $R_d$ ,  $R_p$  ve  $t$ ) bağlı olarak ifade edilmiştir. Sekiz adet parametre ( $BHF$ ,  $BHF2/BHF1$ ,  $f_s$ ,  $K$ ,  $n$ ,

$R_0, R_{45}, R_{90}$ ) ise U-büküm süreci içerisinde belirsizliğe sahip parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu bölümde üç farklı kritik sac incelme değeri (%5, %10, %15) için optimizasyon problemi çözülmüştür. %5'lik sac incelme değeri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri  $c/t=1.2$ ,  $R_d=R_p=7$  mm ve  $t=0.86$  mm olarak, %10'luk ve %15'lik sac incelme değerleri için tasarım değişkenlerinin optimum değerleri  $c/t=1.2$ ,  $R_d=3$  mm,  $R_p=7$  mm ve  $t=0.70$  mm olarak bulunmuştur.  $c/t$ ,  $R_d$  ve  $R_p$  değerleri için üst sınır değerlerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. İlgilenilen problem için tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri büyük önem arz ettiği ve geri yaylanmanın standart sapma değerine önemli ölçüde etki edebildiği görülmüştür.

- Çift döngülü Monte Carlo benzetimi kullanılarak *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyonu hesaplanmıştır. Monte Carlo benzetimi içerisinde pekleşme katsayısının ( $K$ ) ve pekleşme üstelinin ( $n$ ) *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* olan değişimleri dikkate alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde,  $K$  ve  $n$  için “parti sınırı” değeri arttıkça *partiden-partiye* olan geri yaylanma varyasyonunun  $R_d = 3mm$  için yaklaşık %30.6'lık bir artış gösterdiği görülmüştür.  $R_d = 7mm$  için ise bu artış yaklaşık olarak %28.6'dır. Yani  $K$  ve  $n$  değerlerinin *partiden-partiye* olan varyasyonu arttıkça geri yaylanmanın da *partiden-partiye* olan varyasyonu önemli ölçüde artmaktadır.
- DP600 kodlu çift fazlı çelikten imal edilmiş yedi farklı flanş tasarımından oluşan bir büküm parçası için yapılan çalışmada, büküm işlemi sonrasında meydana gelen iki farklı geri yaylanma açısı ( $\theta_1, \theta_2$ ) değerinin gürbüz optimizasyonu incelenmiştir. Kalıp ( $R_d$ ) ve zımba yarıçapı ( $R_p$ ) tasarım değişkenleri olarak, akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ), pekleşme üsteli ( $n$ ), pekleşme katsayısı ( $K$ ), anizotropi katsayıları ( $R_0, R_{45}, R_{90}$ ) ve haddeme yönü ( $HY$ ) ilgilenilen problemin rastsal değişkenleri olarak belirlenmiştir. Geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri vekil modeller kullanılarak

optimize edilmiştir. İki farklı seviyede vekil modeller oluşturulmuştur. İlk seviyede oluşturulan vekil modeller aracılığıyla geri yaylanma ile tasarım değişkenleri ve rastsal değişkenler arasında bir ilişki kurulmuştur. Daha sonra birinci seviye vekil modeller Monte Carlo benzetimleri içerisinde kullanılarak geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri hesaplanmıştır. İkinci seviyede oluşturulan vekil modeller aracılığıyla geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri tasarım değişkenleri cinsinden ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan aşağıda belirtildiği şekilde bir değerlendirme yapılmıştır:

- Dört farklı vekil model türü uygulanmıştır (PYY, KPR, RTF ve KR ). İlk seviyede oluşturulan vekil modeller arasından KR vekil model türünün PYY, KPR ve RTF vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. İkinci seviyede oluşturulan vekil modeller arasından PYY vekil model türünün KPR, RTF ve KR vekil modellerinden daha doğru geri yaylanma tahminlerinde bulunduğu belirlenmiştir.
- Vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon gerçekleştirilmiş ve bulunan optimum değerlerin doğrulaması Monte Carlo benzetimleri yapılarak sağlanmıştır. Geri yaylanmanın ortalama değeri için nominal değerlere kıyasla dikkate değer seviyelerde %7 ila %85 arasında değişen azalmalar sağlanmıştır. Birçok durum için optimum tasarım değişkeni değerlerinin alt veya üst sınır değerlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir.
- En doğru sonucu veren vekil model tipinin optimum sonucu sağlayıp sağlayamadığını araştırmak amacıyla 7-flanşlı tasarım için gerçekleştirilen gürbüz optimizasyon çalışması, en doğru vekil model tipinin yanında ortalama performanslı ve en kötü performanslı vekil model tipleri kullanarak tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar vekil model tabanlı tasarım yaparken, en doğru vekil model tipini kullanmanın her zaman optimum sonuca ulaşma garantisini vermediğini teyit etmiştir. Bunun yerine, birden fazla vekil model tipi kullanıp, “aday optimum”

tasarımlar belirleyip, içlerinden en iyi performansı sergileyen tasarımı seçmenin daha iyi bir yol olacağı görülmüştür.

### 7.3. İleriye Yönelik Çalışmalar

Bu tez kapsamında geliştirilen çift döngülü Monte Carlo benzetimi yöntemi kullanılarak elde edilen *parçadan-parçaya* ve *partiden-partiye* geri yaylanma varyasyon değerlerinin doğrulaması U-büküm işlemi için gerçekleştirilecek deneylerin sonuçları ile karşılaştırılarak belirlenebilir. Bu çalışmada kullanılan vekil model türlerine ek olarak yapay sinir ağları ya da destek vektörü regresyonu gibi yöntemler kullanılarak da geri yaylanma tahmininde bulunabilir. Monte Carlo benzetimi içerisinde yapay sinir ağları kullanarak geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri tahmini için vekil modeller oluşturulabilir. Ayrıca, farklı prosesler (çarpışma analizleri, derin çekme, vb.) ve farklı tasarım değişkenleri için de bu çalışma içerisinde kullanılan vekil model tabanlı gürbüz optimizasyon süreci ve çift döngülü Monte Carlo benzetimi yöntemi uygulanabilir. Tüm bunların yanında bu tez kapsamında yapılan optimizasyon çalışmaları aşağıda belirtilen durumlara uygun olarak geliştirilebilir;

- Optimizasyon problemlerinin çözümünde global optimizasyon yöntemleri olan genetik algoritma (genetic algorithm) ve benzetimli tavlama (simulated annealing) kullanılabilir.
- 7-flanşlı problem için yapılan optimizasyon çalışmasında kısıt kullanılabilir.
- Kalınlık incilmesi yanında, buruşma gibi ek kısıtlar tanımlanabilir.
- Elde edilen optimum tasarımların gürbüzlüğü deneylerle doğrulanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Dongjuan, Z., Zhenshan C., Xueyu R., Yuqianget L., An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending, *Computational Materials Science*, 38, 707-15, 2007.
- [2] Hill R., *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford, London, 1950.
- [3] Behrouzi, B., Dariani, M., Shakeri, M., Tool shape design in the sheet bending process by inverse analysis of springback, *Journal of Engineering Manufacture*, 223(B), 1331-1337, 2009.
- [4] Yi, H.K., Kim, D.W., Tyne, C.J., Moon, Y.H, Analytical prediction of springback based on differential strain during sheet metal bending, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 222, 117-129, 2008.
- [5] Lin, Z., Liu, G., Xu, W., Bao, Y., Study on the effects of numerical parameters on the precision of springback prediction, *Sixth International LS-DYNA Users Conference*, 5, Dearborn, MI, 2000.
- [6] Shi, M., Zhang, L., Issues concerning material constitutive laws and parameters in springback simulations, *Society of Automobile Engineers*, 435, 107–114, 1999.
- [7] Hu, Y., A few issues on accuracy of springback simulation of automobile parts, *Society of Automobile Engineers*, 1435, 101–105, 1999.
- [8] Papeleux, L., Ponthot, J-P., Finite element simulation of springback in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, 785–791, 2002.
- [9] Finn, M.J., Galbraith, P.C., Wu, L., Hallquist, J.O., Lum, L., Lin, T-L., Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring back in automotive body panels, *Journal of Materials Processing Technology*, 50(1-4), 395-409, 1995.
- [10] Narasimhan, N., Lovell, M., Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, *Finite Elements in Analysis and Design*, 33, 29-42, 1999.
- [11] Simpson, T.W., Peplinski, J.D., Koch P.N., Allen, J.K., Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations, *Engineering with Computers*, 17, 129–150, 2001.
- [12] Wang, G.G., Shan, S., Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization, *Journal of Mechanical Design*, 129, 370-380, 2007.
- [13] Myers, R. H., Montgomery, D., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Wiley, Toronto, 1995.
- [14] Box, G.E.P., Behnken, D.W., Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*, 2(4), 455–475, 1960.
- [15] Plackett, R.L., Burman, J.P., The design of optimum multifactorial experiments, *Biometrika*, 33, 305–325, 1946.
- [16] Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J., Wynn, H.P., Design and Analysis of Computer Experiments, *Statistical Science*, 4(4), 409-435, 1989.

- [17] Simpson, T.W., 1998, A Concept Exploration Method for Product Family Design, *Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology* The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Atlanta, GA.
- [18] Jin, R., Chen, W., Simpson, T.W., Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23, 1–13, 2001.
- [19] Simpson, T.W., Allen, J.K., Mistree, F., Spatial correlation metamodels for global approximation in structural design optimization, *Advances in Design Automation*, DETC98/DAC-5613, Atlanta, GA, U.S.A., Eylül 1998.
- [20] Simpson, T.W., Dennis, K., Lin, J., Chen, W., Sampling Strategies for Computer Experiments Design and Analysis, *International Journal of Reliability and Applications*, 2001.
- [21] Koch, P.N., 1997, Hierarchical Modeling and Robust Synthesis for the Preliminary Design of Large Scale, Complex Systems, *Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology* The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Atlanta, GA
- [22] Koehler, J.R., Owen, A.B., Computer experiments, in Ghosh, S., Rao, C.R. (eds), *Handbook of Statistics*, 261–308, *Elsevier Science*, New York, 1996.
- [23] Currin, C., Mitchell, T.J., Morris, M.D., Ylvisaker, D., Bayesian prediction of deterministic functions with applications to the design and analysis of computer experiments, *Journal of The American Statistical Association*, 86(416), 953–63, 1991.
- [24] Johnson, M.E., Moore, L.M., Ylvisaker, D., Minimax and maximin distance designs, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 26(2), 131–48, 1990.
- [25] Park, J.S., Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 39, 95–111, 1994.
- [26] Taguchi, G., Yokoyama, Y., Wu, Y., Taguchi methods: design of experiments, *American Supplier Institute*, Allen Park, MI, 1993.
- [27] Tang, B., Orthogonal array based Latin hypercubes, *Journal of the American Statistical Association*, 88(424), 1392–1397, 1993.
- [28] Owen, A.B., Orthogonal arrays for computer experiments, integration and visualization, *Statistica Sinica*, 2, 439–452, 1992.
- [29] Chaloner, K., Verdinelli, I., Bayesian experimental design: A review, *Statistical Science*, 10(3), 273–304, 1995.
- [30] Buhmann, M.D., Radial basis functions: theory and implementations *Cambridge University Press*, New York, 2003.
- [31] Mullur, A.A., Messac, A., Extended Radial Basis Functions: more flexible and effective metamodeling, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 43(6), 1306-1315, 2005.
- [32] MacKay, D.J.C., Introduction to Gaussian Processes, in C.M. Bishop (ed), *Neural Networks and Machine Learning*, 168, 133-165, 1998.
- [33] Wang, J.M., Fleet, D.J., Hertzmann, A., Gaussian Process Dynamical Models, 18th Advanced Neural Information Processing Systems Conference, 1441-1448, Vancouver, Canada, Aralık, 2005.
- [34] Smith, M., Neural networks for statistical modeling, *Von Nostrand Reinhold*, New York, 1993.

- [35] Gunn, S.R., Support Vector Machines for classification and regression, *Teknik Rapor, University of Southampton*, Image Speech and Intelligent Systems Research Group, U.K., 1997.
- [36] Clarke, S.M., Griebisch, J.H., Simpson, T.W., Analysis of Support Vector Regression for Approximation of Complex Engineering Analyses, *ASME Journal of Mechanical Design*, 127(11), 1077-1087, 2005.
- [37] Lophaven, S.N., Nielsen, H.B., Sondergaard, J., DACE - A MATLAB Kriging Toolbox, *Informatics and Mathematical Modeling*, Technical University of Denmark, 2002.
- [38] Marretta, L., Ingarao, G., Di Lorenzo, R., Design of sheet stamping operations to control springback and thinning: A multi-objective stochastic optimization approach, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(7), 914-927, 2010.
- [39] Firat, M., Mete, O.H., Kocabicak, U., Ozsoy, M., Stamping process design using FEA in conjunction with orthogonal regression, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(11), 992-1000, 2010.
- [40] Jansson, T., Andersson, A., Nilsson, L., Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part – an evaluation using surrogate models and response surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 426–234, 2005.
- [41] Naceur, H., Guo, Y.Q., Ben-Elechi, S., Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects, *Computers and Structures*, 84, 1651–1663, 2006.
- [42] Strano, M., A technique for FEM optimization under reliability constraint of process variables in sheet metal forming, *International Journal of Material Forming*, 1, 13–20, 2008.
- [43] Liew, K.M., Tan, H., Ray, T., Tan, M.J., Optimal process design of sheet metal forming for minimum springback via an integrated neural network evolutionary algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(3-4), 284-294, 2004.
- [44] Wang, L., Beeson, D., Wiggs, G., Rayasam, M.A., A comparison of meta-modeling methods using practical industry requirements, 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2006-1811, Newport, Rhode Island, U.S.A., Mayıs 2006.
- [45] Acar, E., Guler, M.A., Gerçeker, B., Cerit, M.E., Bayram, B., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, *Thin-Walled Structures*, 49(1), 94-105, 2011.
- [46] Simpson, T.W., Mauery, T.M., Korte, J.J., Mistree, F., Comparison of response surface and kriging models for multidisciplinary design optimization, 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 10-31, St. Louis, MO, U.S.A., Eylül 1998.
- [47] Stander, N., Roux, W., Giger, M., Redhe, M., Fedorova, N., Haarhoff, J., A comparison of metamodeling techniques for crashworthiness optimization, 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, AIAA 2004-4489, Albany, NY, U.S.A., Ağustos 2004.

- [48] Viana, F.A.C., Haftka, R.T., Steffen, V., Multiple surrogates: how cross-validation errors can help us to obtain the best predictor, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 39, 439–457, 2009.
- [49] Viana, F.A.C., Gogu, C., Haftka, R.T., Making the most out of surrogate models: tricks of the trade, *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2010-28813, Montreal, Quebec, Canada, Ağustos 2010.
- [50] Jin, R., Du, X., Chen, W., The use of metamodeling techniques for optimization under uncertainty, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25, 99–116, 2003.
- [51] Meckesheimer, M., Barton, R.R., Simpson T.W., Booker, A., Computationally inexpensive metamodel assessment strategies, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 40(10), 2053–2060, 2002.
- [52] Laslett, G.M., Kriging and Splines: An Empirical Comparison of their Predictive Performance in Some Applications, *Journal of the American Statistical Association*, 89(426), 391–400, 1994.
- [53] Mitchell, T.J., Morris, M.D., Bayesian Design and Analysis of Computer Experiments: Two Examples, *Statistica Sinica*, 2, 359–379, 1992.
- [54] Goel, T., Haftka, R.T., Shyy, W., Queipo, N.V., Ensemble of surrogates, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 33, 199–216, 2007.
- [55] Acar, E., Rais-Rohani, M., Ensemble of metamodels with optimized weight factors, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37(3), 279-294, 2008.
- [56] Lin, Y., 2004, An Efficient Robust Concept Exploration Method and Sequential Exploratory Experimental Design, *Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology* The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Atlanta, GA.
- [57] Wang, L., Beeson, D., Wiggs, G., Rayasam, M.A., A comparison of metamodeling methods using practical industry requirements, 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2006-1811, Newport, Rhode Island, U.S.A., Mayıs 2006.
- [58] “Haftka, R.T., Ders notları, Bölüm.1, s.3” erişim adresi: <http://www.mae.ufl.edu/haftka/>, erişim tarihi: 22 Eylül 2011.
- [59] Du, X., Venigella, P.K., Liu, D., Robust mechanism synthesis with random and interval variables, *Mechanism and Machine Theory*, 44, 1321–1337, 2009.
- [60] Meinders, T., Burchitz, I.A., Bonte, M.H.A., Lingbeek, R.A., Numerical product design: springback prediction, compensation and optimization, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 499-514, 2008.
- [61] Guo, Y.Q., Batoz, J.L., Naceur, H., Bouabdallah, S., Mercier, F., Barlet, O., Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach, *Computers and Structures*, 78, 133-148, 2000.
- [62] Chou, I.N., Huang, C., Finite element analysis and optimization on springback reduction, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 517-536, 1999.



- [63] Ingarao, G., Lorenzo, R.D., Micari, F., Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure, *Materials and Design*, 30, 4421–4433, 2009.
- [64] Liew, K.M., Tan, H., Ray, T., Tan, M.J., Optimal process design of sheet metal forming for minimum springback via an integrated neural network evolutionary algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26, 284–294, 2004.
- [65] Park, G.J., Lee, T.H., Lee, K.H., Hwang, K.H., Robust design: an overview, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 44(1), 181–191, 2006.
- [66] Shivpuri, R., Zhang, W., Robust design of spatially distributed friction for reduced wrinkling and thinning failure in sheet drawing, *Materials and Design*, 30, 2043–2055, 2009.
- [67] Del Prete, A., Primo, T., Strano, M., The use of FEA packages in the simulation of a drawing operation with springback, in the presence of random uncertainty, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46, 527–534, 2010.
- [68] Wang, W., Hou, B., Lin, Z., Xia, Z.C., An Engineering Approach to Improve the Stamping Robustness of High Strength Steels, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(6), 064501(1-5), 2009.
- [69] Li, Y.Q., Cui, Z.S., Ruan, X.Y., Zhang, D.J., Application of six sigma robust optimization in sheet metal forming, 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process, 819-824, Detroit, Michigan, U.S.A., August 2005.
- [70] Zhang, W., Shivpuri, R., Investigating reliability of variable blank holder force control in sheet drawing under process uncertainties, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(4), 041001(1-8), 2008.
- [71] Buranathiti, T., Cao, J., Xia, Z.C., Chen, W., Probabilistic Design in a Sheet Metal Stamping Process under Failure Analysis, 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process, 867-872, Detroit, Michigan, U.S.A., August 2005.
- [72] Wei, D., Cui, Z., Chen, J., Optimization and tolerance prediction of sheet metal forming process using response surface model, *Computational Materials Science*, 42, 228–233, 2008.
- [73] Isukapalli, S.S., Roy, A., Georgopoulos, P.G., Stochastic Response Surface Methods (SRSMs) for Uncertainty Propagation: Application to Environmental and Biological Systems, *Risk Analysis*, 18(3), 351-363, 1998.
- [74] Chen, P., Koc, M., Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 189–198, 2007.
- [75] Kumar, A., 2006, Robust Design Methodologies: Application to Compressor Blades, *Doktora Tezi, University of Southampton Faculty of Engineering Science and Mathematics*, Southampton.
- [76] Keane, A.J., Nair, P.B., Computational Approaches for Aerospace Design: The Pursuit of Excellence, s.348-350, *John Wiley & Sons*, Chichester, 2005.
- [77] Trosset, M.W., Taguchi and robust optimization, Technical report, Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, 1996.

- [78] Nair, V.N., Taguchi's parameter design: a panel discussion. *Technometrics*, 34, 127–161, 1992.
- [79] Das, I., Robustness optimization for constrained nonlinear programming problems, *Engineering Optimization*, 32, 585-618, 2000.
- [80] Ben-Tal, A., Nemirovski, A., Robust optimization – methodology and applications, *Mathematical Programming*, 92(3), 453-480, 2002.
- [81] Bertsimas, D., Brown, D.B., Caramanis, C., Theory and Applications of Robust Optimization, *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 53, 464-501, 2011.
- [82] Rao, S.S., Reliability-Based Design, s.131-132, *McGraw-Hill*, 1992.
- [83] Majeske, K.D., Hammet, P.C., Identifying Sources of Variation in Sheet Metal Stamping, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 15, 5–18, 2003.
- [84] Tang, B., Lu X., Wang Z., Zhao Z., Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming. *Materials & Design*, 31, 2043-2050, 2010.
- [85] Ragai, I., Lazim, D., Nemes, J.A., Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study. *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 116-127, 2005.
- [86] Bekar, D., Acar, E., Ozer, F., Guler, M.A., Constructing Surrogate Models for Springback in U-Bending Process, 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2011.
- [87] Li, K.P., Carden, W.P., Wagoner, R.H., Simulation of springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 103–122, 2002.
- [88] McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, 21(2), 239-245, 1979.
- [89] Prior, A.M., Applications of Implicit and Explicit Finite Element Techniques to Metal Forming, *Journal Of Materials Processing Technology*, 45, 649-656, 1994.
- [90] Bekar, D., Acar, E., Ozer, F., Guler, M.A., Robust Springback Optimization of a Dual Phase Steel Seven-Flange Assembly, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, SMO-11-0210, 2011 (Hakem değerlendirmesinde).

## EKLER

### EK A : Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları

Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri Çizelge A.1'de belirtilmiştir. Bu flanşlara ait  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  ve  $\theta_1 + \theta_2$  açıları için gürbüz optimizasyon sonuçları Çizelge A.2'de verilmiştir.

Çizelge A.1. Tasarım değişkenlerinin alt (AS) ve üst sınır (ÜS) değerleri (Flanş #3-Flanş #7 için)

Flanş #	3		4	5		6	7	
Değişken	$R_d^*$	$R_p^*$	$R_d$	$R_d$	$R_p$	$R_p$	$R_d$	$R_p$
AS	3	3	4	3	3	3	3	3
ÜS	10	10	6	10	10	12	10	10

\* $R_d$  ve  $R_p$  mm cinsindedir.

Çizelge 6.15'te belirtilen vekil modeller kullanılarak Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar  $\theta_1$  açılarının gürbüz optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Flanş #1 ve Flanş #2 için olduğu gibi burada da ağırlık faktörleri birbirine eşit olarak alınmıştır. Çizelge A.2'de nominal tasarım (2., 3. ve 9.sütunlar) ve optimum tasarım (bulunan optimum değerler için hem vekil model tahmini (4, 7 ve 10.sütunlar) hem de Monte Carlo benzetimi ile yapılan doğrulama (5., 8. ve 11.sütunlar)) için geri yaylanmanın ortalama ve standart sapma değeri karşılaştırılmıştır.

Flanş #3'ün  $\theta_1$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (3-6.satırlar ve 3-5.sütunlar) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %39 oranında azaldığı, bunun yanı sıra standart sapma değerinin yaklaşık %16.4 oranında arttığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler sırasıyla 3 mm ( $R_d$ 'nin alt sınır değeri) ve 7.52 mm olarak belirlenmiştir. 3 numaralı flanşın  $\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen

optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (3-6.satırlar ve 6-8.sütunlar) sunulmuştur. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %49.5 oranında azaldığı, standart sapma değerinin ise yaklaşık %71.2 oranında arttığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler her ikisi için de 10 mm ( $R_d$  ve  $R_p$ ’nin üst sınır değeri) olarak bulunmuştur.  $\theta_1+\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (3-6.satırlar ve 9-11.sütunlar) belirtilmiştir. Bu durum için geri yaylanma ortalama değerinin yaklaşık %31.1 oranında azaldığı, standart sapma değerinin de yaklaşık %4 oranında arttığı belirlenmiştir. Optimum tasarım değişkeni değerleri  $\theta_2$  minimizasyonunda olduğu gibi her iki değişken için de 10 mm olarak bulunmuştur.

Flanş #4’ün  $\theta_1$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (7-10.satırlar ve 3-5.sütunlar) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %35.1 oranında azaldığı, bunun yanı sıra standart sapma değerinin nominal değerinde kaldığı görülmüştür. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer ise aynı zamanda  $R_p$ ’nin alt sınır değeri de olan 6 mm’dir. 4 numaralı flanşın  $\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (7-10.satırlar ve 6-8.sütunlar) sunulmuştur. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %7.4 oranında, bununla beraber standart sapma değerinin de yaklaşık %2.3 oranında azaldığı görülmüştür. Zımba yarıçapı için bulunan optimum değer 4 mm’dir.  $\theta_1+\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (7-10.satırlar ve 9-11.sütunlar) belirtilmiştir. Bu durum için geri yaylanma ortalama değerinin yaklaşık %11.6 oranında ve standart sapma değerinin de yaklaşık %2.3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Optimum tasarım değişkeni değeri  $\theta_1$  minimizasyonunda olduğu gibi  $R_p$ ’nin üst sınır değeri de olan 6 mm’dir.

Flanş #5’in  $\theta_1$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2’de (11-14.satırlar ve 3-5.sütunlar) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %85.7 oranında azaldığı, bunun yanı sıra standart sapma değerinin yaklaşık %9 oranında arttığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler sırasıyla 9.53 mm ve 10 mm ( $R_p$ ’nin üst sınır değeri) olarak belirlenmiştir.

Çizelge A.2. Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları ( $w_1 = w_2 = 0.5$ )

		$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
		Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
Flanş #3	$\mu$	6.544	4.492	3.984	6.858	2.995	3.465	13.402	8.873	9.233
	$\sigma$	0.616	0.644	0.717	0.368	0.245	0.630	0.718	0.355	0.746
	$R_d$	6.50	3.00	3.00	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	7.52	7.52	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
Flanş #4	$\mu$	0.934	0.611	0.606	5.258	4.825	4.869	6.192	5.977	5.475
	$\sigma$	0.087	0.088	0.087	0.481	0.475	0.470	0.489	0.475	0.478
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	5.00	6.00	6.00	5.00	4.00	4.00	5.00	6.00	6.00
Flanş #5	$\mu$	2.475	0.388	0.355	5.677	3.443	4.831	8.152	4.155	3.931
	$\sigma$	0.257	0.705	0.280	0.371	0.410	0.348	0.451	0.992	0.630
	$R_d$	6.50	9.53	9.53	6.50	8.75	8.75	6.50	9.53	9.53
	$R_p$	6.50	10.00	10.00	6.50	7.55	7.55	6.50	10.00	10.00
Flanş #6	$\mu$	1.458	1.458	1.458	-	-	-	-	-	-
	$\sigma$	0.00290	0.00001	0.00004	-	-	-	-	-	-
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	7.50	3.00	3.00	-	-	-	-	-	-
Flanş #7	$\mu$	3.815	1.716	1.593	3.692	1.378	1.573	7.507	5.127	4.794
	$\sigma$	0.349	0.356	0.383	0.266	0.326	0.234	0.439	0.473	0.493
	$R_d$	6.50	8.45	8.45	6.50	8.38	8.38	6.50	8.45	8.45
	$R_p$	6.50	10.00	10.00	6.50	4.04	4.04	6.50	10.00	10.00

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

5 numaralı flanşın  $\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (11-14.satırlar ve 6-8.sütunlar) sunulmuştur. Geri yayınmanın ortalama değerinin yaklaşık %14.9, standart sapma değerinin de yaklaşık %7.6 oranında azaldığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler sırasıyla 8.75 mm ve 7.55 mm olarak bulunmuştur.  $\theta_1 + \theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (11-14.satırlar ve 9-11.sütunlar) belirtilmiştir. Bu durum için

geri yaylanma ortalama değerinin yaklaşık %51.8 oranında azaldığı, standart sapma değerinin de yaklaşık %39.7 oranında arttığı belirlenmiştir. Optimum tasarım değişkeni değerleri  $\theta_1$  minimizasyonunda olduğu gibi 9.53 mm ( $R_d$ ) ve 10 mm ( $R_p$ 'nin üst sınır değeri) olarak bulunmuştur.

Flanş #6'nın  $\theta_1$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (15-18.satırlar ve 3-5.sütunlar) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin nominal değerinde kaldığı, bunun yanı sıra standart sapma değerinin yaklaşık %98.6 oranında azaldığı görülmüştür. Zımba yarıçapı  $R_p$  için bulunan optimum değer ise aynı zamanda  $R_p$ 'nin alt sınır değeri de olan 3 mm'dir.

Flanş #7'nin  $\theta_1$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (19-22.satırlar ve 3-5.sütunlar) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %58.2 azaldığı, ayrıca standart sapma değerinin de yaklaşık %9.7 oranında arttığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler sırasıyla 8.45 mm ve 10 mm ( $R_p$ 'nin üst sınır değeri) olarak belirlenmiştir. 7 numaralı flanşın  $\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (19-22.satırlar ve 6-8.sütunlar) sunulmuştur. Geri yaylanmanın ortalama değerinin yaklaşık %57.4, standart sapma değerinin de yaklaşık %12 oranında azaldığı görülmüştür. Kalıp ve zımba yarıçapı için optimum değerler sırasıyla 8.38 mm ve 4.04 mm olarak bulunmuştur.  $\theta_1+\theta_2$  minimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar Çizelge A.2'de (19-22.satırlar ve 9-11.sütunlar) belirtilmiştir. Bu durum için geri yaylanma ortalama değerinin yaklaşık %36.1 oranında azaldığı, standart sapma değerinin de yaklaşık %12.3 oranında arttığı belirlenmiştir. Optimum tasarım değişkeni değerleri  $\theta_1$  minimizasyonunda olduğu gibi 8.45 mm ( $R_d$ ) ve 10 mm ( $R_p$ 'nin üst sınır değeri) olarak bulunmuştur.

## EK B : Farklı ağırlık katsayıları için gürbüz optimizasyon sonuçları

Çizelge B.1. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	2.227	1.949	1.952	4.436	3.940	3.903	6.663	5.889	5.854
$\sigma$	0.173	0.170	0.173	0.336	0.325	0.326	0.377	0.367	0.369
$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_p$	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge B.2. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	4.260	1.754	2.286	6.015	1.535	1.581	10.276	5.321	5.457
$\sigma$	0.630	0.479	0.498	0.175	0.179	0.186	0.654	0.511	0.474
$R_d$	6.5	3.0	3.0	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0
$R_p$	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0	6.5	10.0	10.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge B.3. Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları ( $w_1=1, w_2=0$ )

		$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
		Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
Flanş #3	$\mu$	6.544	4.484	4.206	6.858	2.995	3.465	13.402	8.873	9.233
	$\sigma$	0.616	0.657	0.733	0.368	0.245	0.630	0.718	0.355	0.746
	$R_d$	6.50	3.00	3.00	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	7.02	7.02	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
Flanş #4	$\mu$	0.934	0.611	0.606	5.258	4.825	4.869	6.192	5.977	5.475
	$\sigma$	0.087	0.088	0.087	0.481	0.475	0.470	0.489	0.475	0.478
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	5.00	6.00	6.00	5.00	4.00	4.00	5.00	6.00	6.00
Flanş #5	$\mu$	2.475	0.318	0.310	5.677	3.423	4.452	8.152	4.344	3.801
	$\sigma$	0.257	0.788	0.280	0.371	0.454	0.690	0.451	1.063	0.629
	$R_d$	6.50	10.00	10.00	6.50	8.82	8.82	6.50	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	10.00	10.00	6.50	8.08	8.08	6.50	10.00	10.00
Flanş #6	$\mu$	1.458	1.458	1.458	-	-	-	-	-	-
	$\sigma$	0.00290	0.00001	0.00004	-	-	-	-	-	-
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	7.50	3.00	3.00	-	-	-	-	-	-
Flanş #7	$\mu$	3.815	1.716	1.640	3.692	1.378	1.573	7.507	5.1115	4.793
	$\sigma$	0.349	0.357	0.379	0.266	0.326	0.234	0.439	0.474	0.486
	$R_d$	6.50	8.41	8.41	6.50	8.38	8.38	6.50	8.41	8.41
	$R_p$	6.50	10.00	10.00	6.50	4.04	4.04	6.50	10.00	10.00

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)



Çizelge B.4. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1=1$ ,  $w_2=0$ ). Tasarım değişkeninin alt veya üst sınır değerini aldığı (AS) veya (ÜS) ile gösterilmiştir. Tüm değerler [mm] cinsindedir.

<i>Minimizasyon yapılan Flanş #</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Optimum kalıp yarıçapı</i>							
$\theta_1$	---	3.0 (AS)	3.0 (AS)	---	10.0 (ÜS)	---	8.41
$\theta_2$	---	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	---	8.82	---	8.38
$\theta_1 + \theta_2$	---	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	---	10.0 (ÜS)	---	8.41
<i>Optimum zımba yarıçapı</i>							
$\theta_1$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	7.02	6.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	3.0 (AS)	10.0 (ÜS)
$\theta_2$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	4.0 (AS)	8.08	---	4.04
$\theta_1 + \theta_2$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	6.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	---	10.0 (ÜS)

Çizelge B.5. Flanş #1 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=0, w_2=1$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.***(M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	2.227	1.949	1.952	4.436	3.940	3.903	6.663	5.889	5.854
$\sigma$	0.173	0.170	0.173	0.336	0.325	0.326	0.377	0.367	0.369
$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_p$	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge B.6. Flanş #2 için optimizasyon sonuçları ( $w_1=0, w_2=1$ )

	$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
	Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.***(M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
$\mu$	4.260	1.754	2.286	6.015	8.632	8.611	10.276	9.714	10.224
$\sigma$	0.630	0.479	0.498	0.175	0.172	0.184	0.654	0.511	0.530
$R_d$	6.5	3.0	3.0	6.5	4.15	4.15	6.5	3.0	3.0
$R_p$	6.5	10.0	10.0	6.5	5.18	5.18	6.5	10.0	10.0

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge B.7. Flanş #3'ten Flanş #7'ye kadar optimizasyon sonuçları ( $w_1=0$ ,  $w_2=1$ )

		$\theta_1$			$\theta_2$			$\theta_1 + \theta_2$		
		Nom.* (M)	Opt.** (t)	Opt.*** (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)	Nom. (M)	Opt. (t)	Opt. (M)
Flanş #3	$\mu$	6.544	4.934	5.628	6.858	2.995	3.465	13.402	8.873	9.233
	$\sigma$	0.616	0.627	0.717	0.368	0.245	0.630	0.718	0.355	0.746
	$R_d$	6.50	3.00	3.00	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	3.00	3.00	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
Flanş #4	$\mu$	0.934	0.865	0.867	5.258	5.366	5.613	6.192	5.977	5.475
	$\sigma$	0.087	0.087	0.088	0.481	0.467	0.477	0.489	0.475	0.478
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	5.00	5.20	5.20	5.00	6.00	6.00	5.00	6.00	6.00
Flanş #5	$\mu$	2.475	4.306	4.127	5.677	4.838	3.407	8.152	7.488	6.305
	$\sigma$	0.257	0.250	0.320	0.371	0.304	0.385	0.451	1.932	0.749
	$R_d$	6.50	3.00	3.00	6.50	10.00	10.00	6.50	10.00	10.00
	$R_p$	6.50	3.00	3.00	6.50	4.66	4.66	6.50	4.66	4.66
Flanş #6	$\mu$	1.458	1.458	1.458	-	-	-	-	-	-
	$\sigma$	0.00290	0.00001	0.00004	-	-	-	-	-	-
	$R_d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$R_p$	7.50	3.00	3.00	-	-	-	-	-	-
Flanş #7	$\mu$	3.815	1.216	1.237	3.692	2.386	2.441	7.507	5.402	5.410
	$\sigma$	0.349	0.319	0.336	0.266	0.271	0.263	0.439	0.442	0.424
	$R_d$	6.50	10.00	10.00	6.50	8.75	8.75	6.50	8.75	8.75
	$R_p$	6.50	10.00	10.00	6.50	7.24	7.24	6.50	7.24	7.24

\*Nominal (Monte Carlo benzetimi), \*\*Optimum (tahmin), \*\*\*Optimum (Monte Carlo benzetimi)

Çizelge B.8. Tüm flaşlar için optimum kalıp ve zımba yarıçapı değerleri ( $w_1=0$ ,  $w_2=1$ ). Tasarım değişkeninin alt veya üst sınır değerini aldığı (AS) veya (ÜS) ile gösterilmiştir. Tüm değerler [mm] cinsindedir.

Minimizasyon yapılan Flanş #	1	2	3	4	5	6	7
<i>Optimum kalıp yarıçapı</i>							
$\theta_1$	---	3.0 (AS)	3.0 (AS)	---	3.0 (AS)	---	10.0 (ÜS)
$\theta_2$	---	4.15	10.0 (ÜS)	---	10.0 (ÜS)	---	8.75
$\theta_1 + \theta_2$	---	3.0 (AS)	10.0 (ÜS)	---	10.0 (ÜS)	---	8.75
<i>Optimum zımba yarıçapı</i>							
$\theta_1$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	3.0 (AS)	5.2	3.0 (AS)	3.0 (AS)	10.0 (ÜS)
$\theta_2$	2.0 (AS)	5.18	10.0 (ÜS)	6.0 (ÜS)	4.66	---	7.24
$\theta_1 + \theta_2$	2.0 (AS)	10.0 (ÜS)	10.0 (ÜS)	6.0 (ÜS)	4.66	---	7.24

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BEKAR, Deniz  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1986 İzmir  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 292 56 76  
Faks : -  
e-mail : dbekar@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2011	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

- [1] Bekar, D., Ozer, F., Acar, E., Güler, M.A., Constructing Surrogate Models for Springback in U-Bending Process, 14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT), İstanbul, Türkiye, Temmuz 2011.
- [2] Bekar, D., Ozer, F., Acar, E., Güler, M.A., Robust Springback Optimisation of DP600 Steels for U-Channel Forming, World Congress on Engineering (WCE'11), Londra, Birleşik Krallık, Temmuz 2011.
- [3] Bekar, D., Acar, E., Ozer, F., Guler, M.A., Robust springback optimization of a dual phase steel seven-flange assembly, Structural and Multidisciplinary Optimization (Hakem değerlendirmesinde).
- [4] Bekar, D., Acar, E., Ozer, F., Guler, M.A., Analyzing batch-to-batch and part-to-part springback variation of DP600 steels using double loop Monte Carlo simulation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture (Hakem değerlendirmesinde).
- [5] Sözen, L., Guler, M.A., Bekar, D., Acar, E., A thorough investigation and prediction of springback in rotary-draw tube bending processes, Thin-Walled Structures (Hakem değerlendirmesinde).