



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ROLLFORM İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİ ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah PALA

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2022

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ROLLFORM İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİ ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdullah PALA
(19241782018)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE

AĞUSTOS 2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19241782018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Abdullah PALA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ROLLFORM İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ahmet YILDIZ**
Bursa Uludağ Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GENÇ
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 31.08.2022
Savunma Tarihi : 29.08.2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Abdullah PALA

İmzası :

X X X X X



Çok kıymetli aileme ithafen,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve yönlendirmeleriyle bana ışık tutan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Rollform prosesi ile ilgili tez yazma ilhamını bana veren ve lisansüstü eğitim konusunda beni destekleyen TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş. firmasına ve bu yüksek lisans tezinin oluşturulmasında maddi, manevi desteklerini esirgemedi bana yardımcı olan çok kıymetli çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugün geldiğim noktayı borçlu olduğum ve hayatta en hakiki mürşid'in ilim olduğu gerçeğini aşılayarak bana bilimi sevdiren ve her koşulda maddi ve manevi olarak yanımda olan çok kıymetli aileme ve dedeme bana yaptığım bu tez çalışmasında verdikleri güç ve destekten dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2022

Abdullah PALA
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ – ROLLFORM PROSESİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Rollform Prosesine Genel Bakış	3
2.1.1 Rollform prosesi ve ürünlerinin otomotiv endüstrisindeki yeri	5
2.1.2 Rollform prosesini etkileyen temel parametreler.....	7
2.2 Tez Çalışmasının Amacı	8
2.2.1 Rollform prosesi üzerinde yapılan kontrol ve çalışmaların gerekliliği	8
2.2.2 Yapılan çalışmanın metodolojisi.....	10
2.3 Literatürde Yapılan Çalışmalar	12
3. MATERYAL - METOD	14
3.1 Profillerin Tasarımı	14
3.1.1 Profiller için seçilen malzemenin mekanik özellikleri.....	14
3.1.2 Seçilen profillerin dizaynı ve özellikleri	15
3.1.3 Profiller için kullanılan büküm stratejisi ve istasyon sayısı.....	16
3.2 Makaraların Tasarımı	20
3.2.1 Profillere uygun makara tasarımı	21
3.2.2 Boşluk (Clearance) açısının kullanımı	25
3.2.3 Radyuslu makara tasarımı	27
3.2.4 Kullanılan makara çapları	28
3.3 Makine Dataları.....	31
3.3.1 Aktarma oranı	32
3.3.2 Makaraların çalışma çapları	33
3.3.3 İstasyonlar arası mesafe	34
3.4 Prosesin UBECO-PROFIL İle Analizi	36
3.4.1 Eğilme teorisi	36
3.4.2 Büküm hattının gerilme değeri (PSA) sonuçları.....	41
3.4.3 UBECO-PROFIL geri yaylanma (springback) sonuçları	43
3.5 Prosesin FEA Metodu Kullanılarak LS-DYNA İle Analizi.....	46
3.5.1 Von-Misses kriterine göre gerilme analizi.....	51
3.5.1.1 Kalınlıkları farklı profiller için ist. bazında gerilme dağılımı.....	52
3.5.1.2 Genişlikleri farklı profiller için ist. bazında gerilme dağılımı	55

3.5.1.3 Yükseklikleri farklı profiller için ist. bazında gerilme dağılımı	58
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1 LS-DYNA Analiz Sonuçları	63
4.2 UBECO-PROFIL Analiz Sonuçları	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	78



KISALTMALAR

ALE	: The Arbitrary Lagrangian Eulerian Formalism
DIN	: Das Deutsche Institut für Normung
FEA	: Finite Element Analysis
St14	: Çelik Tüü



SEMBOLLER

c	: Tarafsız eksene en uzak mesafe değeri
$c0.5, c1, c2, c3, c6$	: Kritik minimum büküm faktörü
E	: Elastisite modülü
e	: Ekstra istasyon sayısı katsayısı
f	: Tarafsız eksenin konum faktörü
f	: Tolerans gereksinimi katsayısı
h	: Kesitin maksimum yükseklik değeri
I	: Eylemsizlik momenti
$K1, K10$	: Geri yaylanma faktörü katsayısı
L	: Tarafsız eksen uzunluğu
M	: Eğilme momenti
n	: İstasyon sayısı
s	: Et kalınlığı
s	: Şekil faktörü katsayısı
t	: Et kalınlığı
T	: Et kalınlığı
U	: Malzemenin kopma dayanım değeri
Y	: Malzemenin akma dayanım değeri
y	: Tarafsız eksene olan mesafe değeri
z	: Ön delme/çentikleme faktörü katsayısı
α	: Form açılarının toplam değeri
α	: Büküm açısı
ρ	: Eğrilik yarıçapı
ϑ	: Poisson oranı
$\emptyset_f$	: Geri yaylanma sonrası büküm açısı
$\emptyset_i$	: Büküm açısı
R_f	: Yük kaldırıldıktan sonraki büküm yarıçapı
R_i	: Büküm yarıçapı
k_1	: Uzunluk düzeltme faktörü

k_1	: Yüzde düzeltme faktörü
r_i	: İç radyus yarıçapı
y_e	: Akma momenti için tarafsız eksene olan mesafe
α_1	: Büküm açısını 180° 'ye tamamlayan açı değeri
α_2	: Geri yaylanma sonrası büküm açısını 180° 'ye tamamlayan açı
σ_1	: Asal gerilme değeri
σ_f	: Kopma gerilme değeri
σ_m	: Maksimum gerilme değeri
σ_x	: X-ekseni doğrultusundaki eksenel gerilme değeri
σ_{ys}	: Akma gerilmesi değeri



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Tez çalışmasında kullanılan makara çapları.....	29
Çizelge 3.2 : Tüm U-Profil tipleri ve tüm istasyonlar için UBECO-PROFIL’den elde edilen geri yaylanma sonuçları	45
Çizelge 4.1 : Kalınlık etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri	65
Çizelge 4.2 : Genişlik etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri	67
Çizelge 4.3 : Yükseklik etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri	69
Çizelge 4.4 : Tüm U-Profil tipleri ve tüm istasyonlar için UBECO-PROFIL’den elde edilen geri yaylanma sonuçları	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Rollform hattının genel görünümü	2
Şekil 1.2 : 3D rollform hattı.....	2
Şekil 2.1 : Rollform prosesi ile sac şekillendirme	3
Şekil 2.2 : Çarpışma tamponuna rollform sonrası sehim verme operasyonu	4
Şekil 2.3 : Otomobilde kullanılan rollform parçaları.....	5
Şekil 2.4 : Otomotiv sektöründeki rollform uygulamalarının artışı	5
Şekil 2.5 : Rollform için özelleşmiş yazılımlarda büküm stratejisini belirlemek için kullanılan çiçek açınımı diyagramı	6
Şekil 2.6 : LS-DYNA’da analiz edilen rollform parçası	6
Şekil 2.7 : İstasyon sayısının temsili gösterimi	7
Şekil 2.8 : Akma gerilmesinin yüzdesi olarak ifade edilen büküm hattı üzerindeki gerilme değerleri	8
Şekil 2.9 : Rollform prosesi sonrasında parça üzerinde oluşabilecek hatalar.....	9
Şekil 2.10 : Rollform 2D 360° profil kontrol ünitesi.....	10
Şekil 2.11 : Tez kapsamında incelenecek olan U-Profil çeşitleri	11
Şekil 2.12 : Tez kapsamında incelenecek olan U-Profil çeşitleri	11
Şekil 3.1 : Tasarlanan U-Profillerin en, boy, kalınlık ve iç büküm yarıçapı ölçüleri	15
Şekil 3.2 : Farklı ön delme ve boşaltma işlemleri için tanımlanan z katsayıları	17
Şekil 3.3 : Farklı profil tipleri için belirlenen şekil faktörü katsayıları	17
Şekil 3.4 : Farklı tolerans beklentileri için tanımlanan tolerans faktörü katsayıları	18
Şekil 3.5 : Her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı	18
Şekil 3.6 : Yanlış tasarlanan büküm stratejisi.....	19
Şekil 3.7 : Rollform hattı üzerinde kullanılan çeşitli makaralar.....	20
Şekil 3.8 : Alt ve üst mili çift taraftan destekli standart bir rollform istasyonunun yapısı; sol taraf tahrik mekanizmasının olduğu tarafken sağ taraf operatörlerin ayar ve sökme takma işlemleri için kullandığı taraf olarak nitelendirilmektedir.	21
Şekil 3.9 : Alt ve üst makaraları montajlanmış bir istasyonun şematik gösterimi	22
Şekil 3.10 : Alt, üst, sol ve sağ makaralarla ilgili örnek bir görsel.....	22
Şekil 3.11 : Tez kapsamında incelenen profillerin çiçek açınımları.....	23
Şekil 3.12 : 40x70x1 Tip U-Profil için yapılan makara tasarımı, sırasıyla önce soldan sağa sonra yukarıdan aşağıya olmak üzere istasyon numaraları; 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 şeklindedir.	24
Şekil 3.13 : Üst makarada boşluk açısı kullanımına bir örnek	25
Şekil 3.14 : Sol tarafta boşluk açısı kullanılmadan, sağ tarafta ise boşluk açısı kullanılarak form verilen profiller yer almaktadır. (Yeşil renk profil üzerinde orta derecede gerilme olduğunu sembolize ederken, mavi renk ise düşük derecede gerilme olduğunu sembolize etmektedir.	26
Şekil 3.15 : 40x70x1 U-Profilinin 5. İstasyonu için yapılmış makara tasarımı.....	27

Şekil 3.16 : Keskin köşeli ucdan başlayıp, ilerleyen bir çatlak	27
Şekil 3.17 : 80x70x1'e ait 8. istasyon için yapılan radyuslu makara tasarımı.....	28
Şekil 3.18 : Tez çalışmasında kullanılan makine dataları.....	31
Şekil 3.19 : İstasyonunun millerine bağlı tahrik mili ve dişli kutusu görseli	32
Şekil 3.20 : Diş sayısına bağlı olarak 1:1.6 aktarma oranı örneği	32
Şekil 3.21 : Alt makara için referans noktasının yeri	33
Şekil 3.22 : Üst makara için referans noktasının yeri.....	33
Şekil 3.23 : Tez çalışmasında kullanılan makaraların çalışma çapları (mm)	34
Şekil 3.24 : İstasyon çıkışında profil üzerinde oluşan sehim.....	35
Şekil 3.25 : Tez kapsamında kullanılan istasyon mesafesi (mm).....	35
Şekil 3.26 : Bir giriş üzerindeki tarafsız eksen, eğrilik yarıçapı (ρ), tarafsız eksen ile giriş arasındaki en uzak mesafe (c), parça üzerindeki belirli bir noktanın tarafsız eksene olan mesafesinin (y) şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.27 : Eğilme gerilmelerinin (σ_x, σ_m) şematik gösterimi	37
Şekil 3.28 : Gerilme uygulanmadan büküm yapılan sac için moment-eğrilik yarıçapı eğrisi.....	39
Şekil 3.29 : Elastik, mükemmel plastik sacın gerilme uygulanmadan bükümü durumu için gerilme dağılımı.....	39
Şekil 3.30 : Tarafsız eksen uzunluğu	40
Şekil 3.31 : UBECO-PROFIL sonuçlarına göre tez kapsamında incelenecek olan U-Profillerin her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı (Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla U-Profil Tipleri : 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1)	42
Şekil 3.32 : Geri yaylanmanın şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.33 : Profilin mesh yapısı için LS-DYNA girdileri	46
Şekil 3.34 : Makaraların mesh yapısı için LS-DYNA girdileri	47
Şekil 3.35 : Delik ve boşaltmaların mesh yapısı için LS-DYNA girdileri	47
Şekil 3.36 : LS-DYNA için başlangıç parametreleri	48
Şekil 3.37 : LS-DYNA malzeme parametreleri.....	48
Şekil 3.38 : LS-DYNA kılavuzlama parametreleri.....	49
Şekil 3.39 : LS-DYNA hız oranı parametresi.....	50
Şekil 3.40 : LS-DYNA için gelişmiş parametre girdileri	50
Şekil 3.41 : 40x70x1 katı modelin 4. istasyon analizi	51
Şekil 3.42 : 40x70x1 katı modelin 5. istasyonu için gerilme - uzunluk grafiği.....	52
Şekil 3.43 : 40x70x1 katı modelin 5. istasyonu için seçilen elementler.....	53
Şekil 3.44 : 40x70x1.2 katı modelin 6. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği.....	53
Şekil 3.45 : 40x70x1.5 katı modelin 2. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği.....	54
Şekil 3.46 : 40x70x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği	55
Şekil 3.47 : 40x70x1 kabuk modelin 7. istasyonu için seçilen elementler	56
Şekil 3.48 : 40x140x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği ..	57
Şekil 3.49 : 40x210x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği ..	58
Şekil 3.50 : 40x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği	59
Şekil 3.51 : 40x70x1 kabuk modelin 6. istasyonunda yan duvar yüksekliği etkisini incelemek için seçilen elementler	60
Şekil 3.52 : 60x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği.....	61
Şekil 3.53 : 80x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği	62

Şekil 4.1 : 40x70x1 ve 40x70x1.5 katı modellerin ortalama gerilme-istasyon sayısı grafiği	64
Şekil 4.2 : 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 kabuk modellerin ortalama gerilme - istasyon sayısı grafiği.....	66
Şekil 4.3 : 40x70x1, 60x70x1 ve 80x70x1 kabuk modellerin ortalama gerilme - istasyon sayısı grafiği.....	68
Şekil 4.4 : UBECO-PROFIL sonuçlarına göre tez kapsamında incelenecek olan U-Profillerin her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı (Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla U-Profil Tipleri : 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1)	71



ROLLFORM İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

ÖZET

Rollform prosesi çok çeşitli ünitelerin entegre edilmesiyle delme, boşaltma, kaynaklama ve kesme gibi birçok farklı operasyonu bünyesinde bulundurabilen nadir proseslerden bir tanesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, kalıpla form vermeye göre rollform prosesinin birçok avantajı bulunmaktadır. Rollform prosesinin herhangi bir uzunluk sınırı olmaksızın profil üretebilmesi, yüksek mukavemetli çeliklere şekil verebilme kabiliyeti, hızlı bir proses olması bu özelliklerinden sadece bazılarıdır. Tez çalışmasının başlangıcında bu konular ve rollform prosesinin otomotiv sektöründeki yeri ve önemi ele alınmış ayrıca rollform ile üretilen otomobil parçaları üzerinde durulmuştur. Buna göre, rollform prosesi ile ön veya arka tampon gibi otomobil parçaları, marşpiyel parçaları veya güçlendirme elemanları gibi otomobil parçaları üretilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da hem rollform prosesinin önemine hem de üretilen otomobil parçalarına yer verilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı tip U-Profiller'in CATIA V5 ile tasarımının yapılması, tasarımı yapılan bu U-Profiller'in rollform için özelleşmiş bir proses tasarım ve analiz yazılımı olan UBECO-PROFIL programına aktarılması ve burada U-Profiller için istasyon sayısının belirlenmesi, büküm hattı gerilme değerlerinin elde edilmesi, gerekli makara tasarımının yapılması, geri yaylanma değerlerine göre fazladan büküm açılarının elde edilmesi amaçlanmış ve son olarak sonlu elemanlar metodu kullanılarak LS-DYNA ile profiller üzerindeki gerilme durumunun incelenmesine yer verilmiştir. Sonlu elemanlar çalışmasında yükseklik, kalınlık ve taban genişliği gibi geometrik farklılıkların parça üzerinde nasıl etkiler oluşturduğu incelenmiş, kalınlık değişimini incelemek için katı eleman kullanılmış, yükseklik ve genişlik değişimini incelemek için kabuk eleman kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara ait tüm değerler excel programına aktarılarak bu konu ile ilgili çeşitli grafikler çizdirilmiştir. Her bir U-Profil ve her bir istasyon için alınan değerlerin ortalaması alınarak çizdirilen grafikler uzunluğa karşılık ortalama gerilme değeri değişimini elde etmemizi sağlamıştır. Bu etkilerin ortalama gerilme değerleri ile en net şekilde gözlemlendiği görülmüş ve maksimum ve minimum bazı değerlerin yorum yanıltıcı olabileceği de tecrübe edilmiştir.

Çizdirilen grafiklerle ilgili yorumlar tez çalışmasının son kısımlarında paylaşılarak yapılan çalışmanın sonuçları aktarılmıştır. Ayrıca bu çalışmaya ek olarak ilerde yapılabilecek bazı ek çalışmalar ele alınarak yüksek lisans tezi sonlandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Rollform, sonlu elemanlar, gerilme, geri yaylanma, sac şekillendirme.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS AFFECTING THE COLD FORMING PROCESS WITH ROLLFORM BY NUMERICAL METHODS

SUMMARY

The rollform process is one of the rare processes that can incorporate many different operations such as drilling, unloading, welding and cutting by integrating a wide variety of units. In addition, the rollform process has many advantages over molding. The ability of the rollform process to produce profiles without any length limit, the ability to shape high-strength steels, and the fact that it is a fast process are just some of these features. At the beginning of the thesis, these subjects and the place and importance of the rollform process in the automotive sector were discussed and the automobile parts produced with rollform were emphasized. Accordingly, automobile parts such as front or rear bumpers, rockers or reinforcement elements are produced by the rollform process. In the studies conducted in the literature, both the importance of the rollform process and the produced automobile parts are included.

Within the scope of this thesis, with the help of designing different types of U-Profiles with CATIA V5 and transferring these designed U-Profiles to UBECO-PROFIL, a process design and analysis software specialized for rollform, it is aimed for determining the number of stations for U-Profiles, to obtain the bending line stress values, to design the necessary rolls, to obtain the overbending angles according to the springback values. And finally, the stress distribution on the profiles with LS-DYNA using the finite element method is included. In the finite element study, the effects of geometrical differences such as height, thickness and base width on the part were examined, a solid element was used to examine the variation in thickness, and a shell element was used to examine the variation in height and width. All the values of the obtained results were transferred to the excel program and various graphs related to this subject were drawn. The graphs drawn by taking the average of the values taken for each U-profile and each station gave us the change in the average stress value against the length. It has been observed that these effects are observed most clearly with the average stress values, and it has been experienced that some maximum and minimum values can be misleading.

Comments about the drawn graphics were shared in the last parts of the thesis, and a result was tried to be reached. In addition to this study, some additional studies that can be done in the future were discussed and the master's thesis was concluded.

Keywords: Rollform, finite element analysis, stress, springback, sheet metal forming.

1. GİRİŞ – ROLLFORM PROSESİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Rollform ile soğuk sac şekillendirme prosesi, belli boyutlarda kesilmiş açınım sac'ın bir ruloya sarılmış şekilde veya ruloya sarılmadan hatta beslenmesi ve sonrasında bir dizi operasyonların hat içerisindeki bu sac parçaya uygulanarak sac'ın açınım halden nihai profil kesitine ulaştırılması ve son olarakta istenen boyda kesilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Sanayide kullanılan çok çeşitli rollform hatları bulunmakta ve bu hatlara farklı birçok üniteler entegre edilebilmektedir. Bir rollform hattı içinde; rulo açıcı, rulo açıcı sonrasına yerleştirilen düzleştirici ünitesi, portal ve kalıplardan oluşan delme ve boşaltma ünitesi, bir dizi makara gruplarını içeren istasyonlardan oluşan rollform ünitesi, rollform ünitesine entegre lazer kaynak ünitesi, rollform sonrası kesme ünitesi, profile değişken yada sabit yarıçaplarda sehim verebilen sehim ünitesi içerebilmektedir. Rollform hattı sonrasında ise profile nihai şeklini verebilmek adına lazerle boşaltma hücreleri gibi hücreler veya parçaları çeşitli yerlere dizebilecek veya hücreler içinde kullanılabilecek robot hücreleri bulunabilmektedir. Bütün bunların yanı sıra, rollform hattı içinde istasyon ve makaraları içeren kısım da çeşitli farklılıkları bünyesinde bulundurmaktadır. Buna göre; kasetli tip adı verilen sistemde her bir profil için bir tabla üzerine entegre edilmiş istasyon ve makara gruplarını içeren bir yapı bulunmakta ve bu yapı, ilgili profil üretileceği zaman hatta entegre edilmektedir. Standart sistemde ise kasetli sistem yerine eski makaralar sökülüp yerine yeni makaralar monte edilmekte ve bu makaraların ayarları yapılmaktadır. Standart sistemin dezavantajı; sökme, takma ve ayar işlemlerinden dolayı değişim süresini oldukça fazla uzatarak hattın üretim kapasitesinden düşürmesidir. Bir rollform hattının genel görünümü Şekil 1.1 üzerinde görülmektedir [1].



Şekil 1.1 : Rollform hattının genel görünümü

Yüksek mukavemetli otomobil parçalarının üretimi, birim zamanda üretilen parça sayısının klasik metodlara oldukça yüksek olması, maliyetlerin düşük olması, parça uzunluğu konusunda herhangi bir kısıtlamanın bulunmaması gibi nedenlerden dolayı rollform prosesi ile sac parçaya form verme işlemi oldukça avantajlı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bakımdan rollform hatlarının kullanımı gün geçtikçe daha da artmakta ve otomotiv sektörü için vazgeçilmez bir konumda yer almaktadır. Buna karşın çok kompleks geometri ve yüzeylere sahip profillerin rollform prosesi ile üretimi mümkün değildir. Bu tip profillere günümüzde preslere bağlı kalıplarla form verilmeye devam edilmektedir. Fakat iki boyutta form verme işlemleri için kullanılan standart rollform hatları yerine son zamanlarda üç boyutlu rollform yöntemi de kullanılmakta ve bu yöntem rollform hatlarının hem geleceği olarak hem de geldiği son nokta olarak yorumlanmaktadır. Şekil 1.2'den de görülebileceği üzere, 3D rollform hatları değişken kesitli profillere form verilmesini mümkün kılmakta ve bu sayede klasik tip rollform hatlarından ayrılmaktadır.



Şekil 1.2 : 3D rollform hattı

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Rollform Prosesine Genel Bakış

Rollform ile soğuk sac şekillendirme prosesi, açınım sac'dan istenilen kesit elde edilinceye kadar ardı ardına istasyonlara dizilen makara gruplarının sac parçaya kademeli ve sürekli şekilde baskı kuvveti uygulayarak parça üzerinde büküm hatları yaratması ve bu hatlar sayesinde parçanın şekil alarak nihai kesite ulaştırılması işlemi olarak tanımlanabilir. Şekil 2.1'de sac profile şekil veren bir rollform hattı yer almaktadır.

Makara ile haddeleme işleminin temellerinin atılması çok eski zamanlara uzansa da bugün kullanılan rollform ile soğuk şekillendirme prosesinin temellerinin atılması, gelişimi ve yaygınlaşması 20. yy içinde gerçekleşmiştir. 1970'li yıllarda, Kuzey Amerika'da bulunan çelik fabrikalarının ürettiği tüm sac malzemelerin %35 ila %40'ı rollform prosesi ile şekillendirilmiştir. Yirminci yüzyılın sonlarına doğru ise otomotiv sektöründe kullanılan ürünlerin rollform ile şekillendirilmesi endüstrinin en hızlı büyüyen kısmı haline gelmiştir [1].

Günümüzde rollform prosesi otomotiv sektörü başta olmak üzere inşaatlarda kullanılan çatı-dış cephe sistemleri ve çelik konstrüksiyon yapı profilleri, endüstriyel raf sistemleri, elektrik panoları ve kablo kanalları gibi yapıların komponentlerini üretmek amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun en büyük sebeplerinden biri rollform prosesinde çok çeşitli malzemeler ile şekillendirmeye açık olan esnek bir proses olmasıdır. Rollform prosesinde kullanılan başlıca malzemeler; sıcak ve soğuk haddelenmiş karbon çelikleri, paslanmaz çelik, alüminyum ve bakır olarak sıralanabilir [2].



Şekil 2.1 : Rollform prosesi ile sac şekillendirme

Rollform prosesi çok çeşitli mühendislik malzemeleri ile çalışmaya uygun olmasının yanısıra diğer birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Bunlardan başlıcaları şu şekilde sıralanabilir;

- Seri üretime uygun yapısı sayesinde hızlı ve hacimli ürün çıkarabilme kapasitesi
- Sıcak şekillendirme, ekstrüzyon gibi diğer operasyonlarla kıyaslandığında ağırlığına oranla mukavemet oranının yüksek olması
- Parça uzunluğu konusunda herhangi bir kısıtın olmaması
- Daha hafif parçalar üretilmesi
- Delme, boşaltma, kaynaklama, sehim verme ve kesme gibi operasyonların rollform hattının öncesine ve sonrasına doğrudan eklenerek kapsamlı bir proses oluşturulabilmesi
- Rollform hattından çıkan parçaların hattın sonra uygulanabilecek kaynaklama, kalıpla şekil verme, lazerle boşaltma, bükme gibi ikincil operasyonların uygulanabilir olması
- Malzeme, kalınlık ve profil geometrisinin oldukça geniş bir aralığa sahip olması

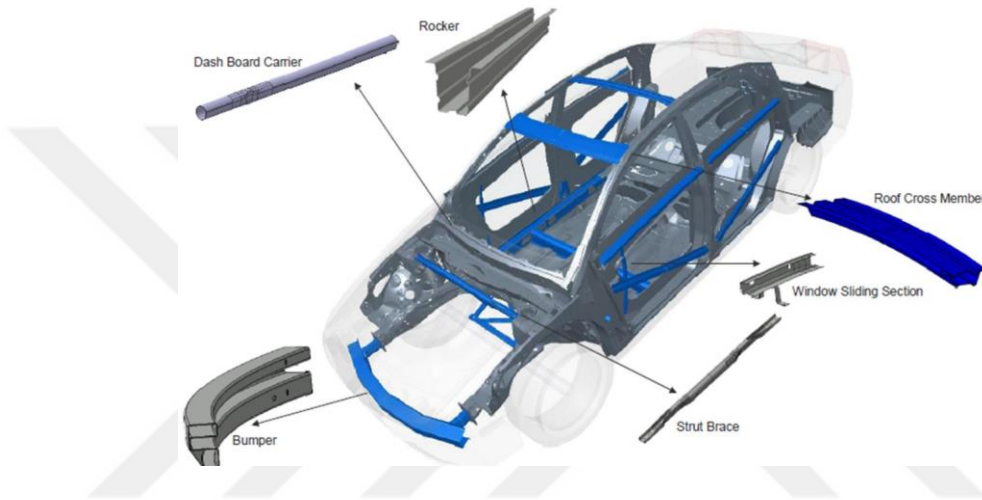
Bütün bu avantajlarının yanında rollform hattı ve ürünleri ile ilgili bilinmesi gereken en önemli şeylerden biri de üretilebilecek ürünlerin özelliklerinin rollform hattının özellikleri tarafından sınırlandırılmış olmasıdır. Buna örnek olarak hattın min. ve max. açınım sac genişliği kapasitesi, min. ve max. profil yüksekliği kapasitesi, max. kopma gerilmesi değerine karşılık gelen max. kalınlık değeri verilebilir. Sehim verme kabiliyetine sahip bir rollform hattının sehim ünitesi Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Çarpışma tamponuna rollform sonrası sehim verme operasyonu

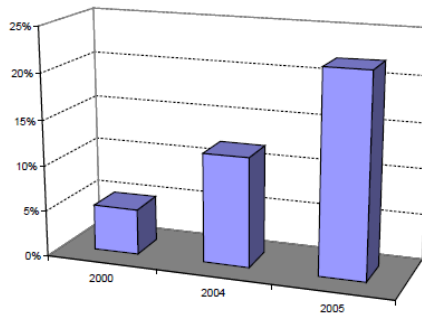
2.1.1 Rollform prosesi ve ürünlerinin otomotiv endüstrisindeki yeri

Uzunluk, yüksek dayanım, hafiflik veya kapalı kesit beklentisi olan parçalar için rollform prosesi ile üretilen otomotiv parçaları sektörün beklentisini karşılayan en önemli proses haline gelmiştir. Bu bakımdan günümüzde birçok otomobil parçasının üretiminde rollform hatları kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te gösterilen bu parçalara örnek olarak; çarpışma tamponu, tavan destek profilleri, marşpiyel profilleri, kayar kapı ve cam kızak profilleri, torpido traversi komponentleri, kule gergi elemanları, vb. verilebilir [3].



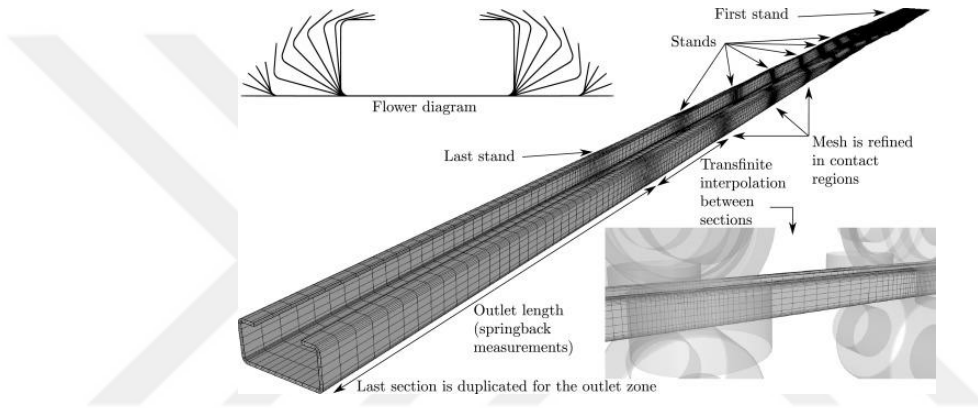
Şekil 2.3 : Otomobilde kullanılan rollform parçaları[3]

Otomobillerde rollform hattından çıkan parçaların kullanımı günden güne artmakta olup aşağıda bununla ilgili bir görsel Şekil 2.4'te paylaşılmıştır. Diğer yandan otomotiv sektöründe kullanılan malzemeler de özellikle hafifletme çalışmalarından dolayı gün geçtikçe değişmektedir. O nedenle çelik yerine alüminyum kullanımı özellikle son zamanlar oldukça popüler hale gelmiştir. Fakat alüminyum alaşımlı parçaların rollform prosesinde kırılma, burkulma gibi sorunlar karşımıza çıkmaktadır [4].



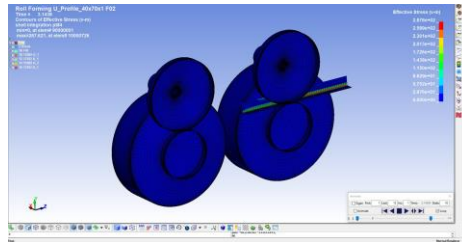
Şekil 2.4 : Otomotiv sektöründeki rollform uygulamalarının artışı[4]

Bu tür sorunlarla karşılaşmamak ve otomotiv sektöründe olduğu gibi toleransların dar olduğu bir sektöre hizmet edebilmek için iyi bir büküm stratejisi oluşturmak, deneme-yanılma metodu yerine çeşitli mühendislik yazılımları kullanarak parçayı henüz üretmeden parça üzerindeki öngörü kabiliyetimizi artırmak çok önemli bir konuma sahiptir. O nedenle günümüzde rollform için özelleşmiş olan birçok program kullanılmaktadır. Bu programların arasında UBECO-PROFIL, COPRA-RF, SHAPE-RF ve ORTIC Systems yer almaktadır. Şekil 2.5'ten de görüldüğü üzere bu programlar ile prosesin dizaynı ve analizi yapılabilmekte, henüz tasarım aşamasında yapılan çalışmaların doğruluğu belli ölçüde gözlemlenebilmektedir [5]–[7].



Şekil 2.5 : Rollform için özelleşmiş yazılımlarda büküm stratejisini belirlemek için kullanılan çiçek açılımı diyagramı [8]

Diğer yandan, bu programlar ile yapılan tasarım çıktıları sonlu elemanlar metodunun kullanılması ile beraber daha detaylı ve gerçeğe çok daha yakın sonuçlar elde etmek amacıyla çeşitli analiz programlarında analize tabi tutulabilmektedir. Bu programlarda parça üzerinde istenilen noktadaki gerilme-gerinme ve geri yaylanma değerleri, dalgalanma, burkulma, dönme vb. hatalar net bir biçimde elde edilebilmektedir. Bu iş için kullanılan en önemli analiz programlarının başında LS-DYNA gelmektedir. Şekil 2.6'da LS-DYNA ile analiz edilen bir rollform parçası bulunmaktadır.



Şekil 2.6 : LS-DYNA'da analiz edilen rollform parçası

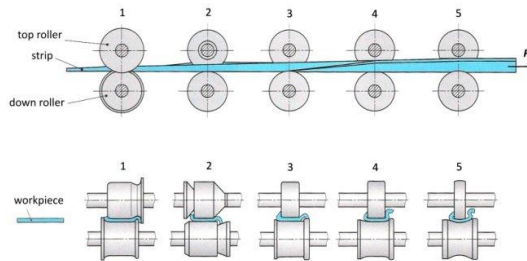
Sonuç olarak MS1200, MS1500, DP980 gibi dayanımı yüksek malzemelerin kullanıldığı ve dar tolerans beklentilerinin olduğu otomotiv sektörü için bahsedilen enstrümanların kullanılması büyük bir önem arz etmektedir.

2.1.2 Rollform prosesini etkileyen temel parametreler

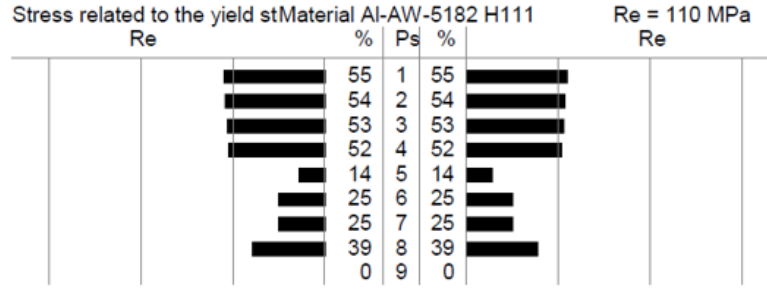
Rollform prosesi üzerinde etkiye sahip birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler rollform parçası üzerinde birçok farklı etkiye neden olabilmektedir. Rollform prosesini etkileyen başlıca parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Malzeme mekanik özellikleri
- Et kalınlığı
- Bant genişliği
- Parçanın yüksekliği (Flanş yüksekliği)
- Büküm radyusu
- Büküm stratejisi
- Büküm hattı üzerindeki gerilme miktarı (Mpa)
- İstasyon sayısı
- İstasyonlar arasındaki mesafe
- Rollform hattının hızı (m/dak)
- Makaraların tasarımı
- Parça ve makaralar arasındaki sürtünme miktarı [9]

Bu parametrelerden bazıları ve bunların etkileri tez kapsamında ilerleyen bölümlerde ele alınacak ve incelenecektir. Şekil 2.7’de istasyon sayısı ve Şekil 2.8’de büküm hattı gerilme değerleri ile ilgili görseller yer almaktadır.



Şekil 2.7 : İstasyon sayısının temsili gösterimi



Şekil 2.8 : Akma gerilmesinin yüzdesi olarak ifade edilen büküm hattı üzerindeki gerilme değerleri

2.2 Tez Çalışmasının Amacı

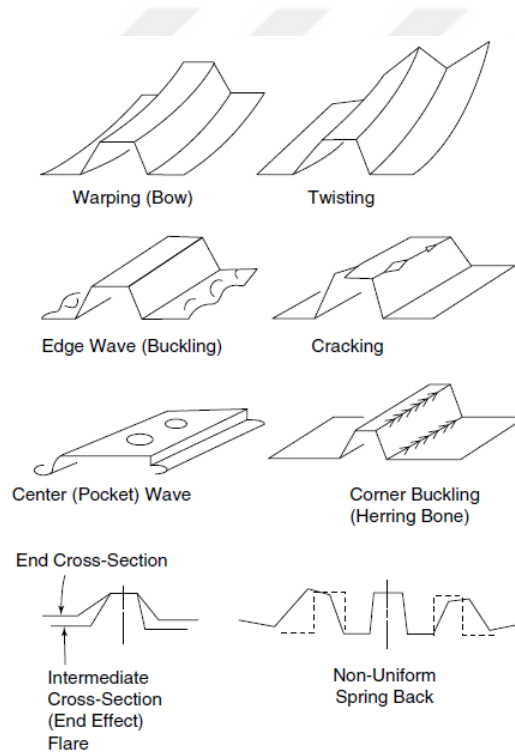
Yapılan bu tez çalışması kapsamında aynı U tipi profilin birden fazla varyasyonunun aynı sayıda istasyonla rollform hattında şekillendirilmesi, bu şekillendirme için proses dizaynının yapılması ve sonrasında da belli kriter ve parametreler açısından analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bütün bu çalışma tamamlandıktan sonra sonuçlar birbiri ile kıyaslanmış ve çeşitli yorumlamalar yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı, profiller üzerindeki geometri ve et kalınlığı gibi değişimlerin geri yayılma ve gerilme değerleri üzerindeki etkisini anlamak olarak tanımlanabilir.

2.2.1 Rollform prosesini üzerinde yapılan kontrol ve çalışmaların gerekliliği

Rollform prosesi temelde açınım sac parçaya kademeli ve aşamalı bir şekilde baskı kuvveti uygulayarak parça üzerinde elastik-plastik deformasyonunun oluşturulması ve bu deformasyonlar sayesinde parçaya şekil verilerek parçanın nihai kesite ulaştırılması işlemidir. Rollform prosesinde istenilen ve gereksinim duyulan tek elastik-plastik deformasyon çeşidi enine bükümler sonucu ortaya çıkan elastik-plastik deformasyonlardır. Buna karşın proses esnasında birçok parametreye bağlı olarak başka deformasyonlar da ortaya çıkabilmektedir. Bu ortaya çıkan deformasyonlar rollform prosesi için istenmeyen deformasyon tipleri olmakla birlikte aslında parça üzerinde oluşabilecek olan eğilme, dalgalanma, burulma, dönme gibi birçok hatanın da en önemli sebeplerinden biridir [10].

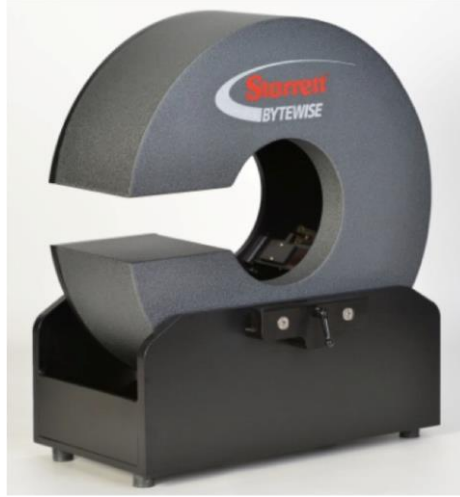
Parça üzerinde istenmeyen deformasyonların meydana gelmesinin yetersiz istasyon sayısı, parçayı düzeltmek amacıyla tek istasyonda uygulanan ve olması gerekenden yüksek basınç, vb. birçok sebebi olabilir. Bunun gibi istenmeyen etkilerin ortadan kaldırılması ancak ve ancak parça ve proses üzerindeki öngörülerimizin güçlü olmasına bağlıdır. Öngörülerini güçlendirmenin en önemli yolu elimizdeki tasarım

(UBECO-PROFIL, COPRA RF, vb.) ve analiz (UBECO-PROFIL, LS-DYNA, MSC MARC) programlarını kullanmaktan ve bunları güçlü teorik ve pratik bilgilerle harmanlamaktan geçmektedir. Çeşitli tipler ile yapılacak çalışmaların sonucunda parametreler ve etkileri üzerinde neden sonuç ilişkisi kurulabilecek ve en nihayetinde gerçekten bir parçayı üretmeye gerek kalmadan oluşabilecek hatalar ya gözlemlenebilecek yada tahmin edilebilecektir. Ayrıca müşteri memnuniyetsizliği ve maliyet kaygılarının da önüne geçebilecek olan ve proses üzerindeki kontrolümüzü arttıran bu yöntemler kullanılması gereken en önemli enstrümanlar arasında yerini almaktadır. Rollform prosesinde karşılaşılabilecek olası hatalar Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Rollform prosesi sonrasında parça üzerinde oluşabilecek hatalar [1]

Parça üretilmeden önceki çalışmaların yanısıra parçanın hat içindeki kontrolü de oldukça büyük bir önem teşkil etmektedir. Günümüzde kullanılan modern rollform hatlarında profil geometrisini, kaynak sürekliliğini ve doğruluğunu kontrol eden gelişmiş kontrol üniteleri yer almaktadır. Bu kontrol sistemleri sayesinde parça henüz hattan çıkmadan önce parça üzerinde herhangi bir problem olup olmadığı gözlemlenebilmekte ve buna bağlı olarak da anlık olarak prosese veya parçaya müdahale edilebilmektedir. Şekil 2.10'da profil kontrol ünitesi görseli yer almaktadır.

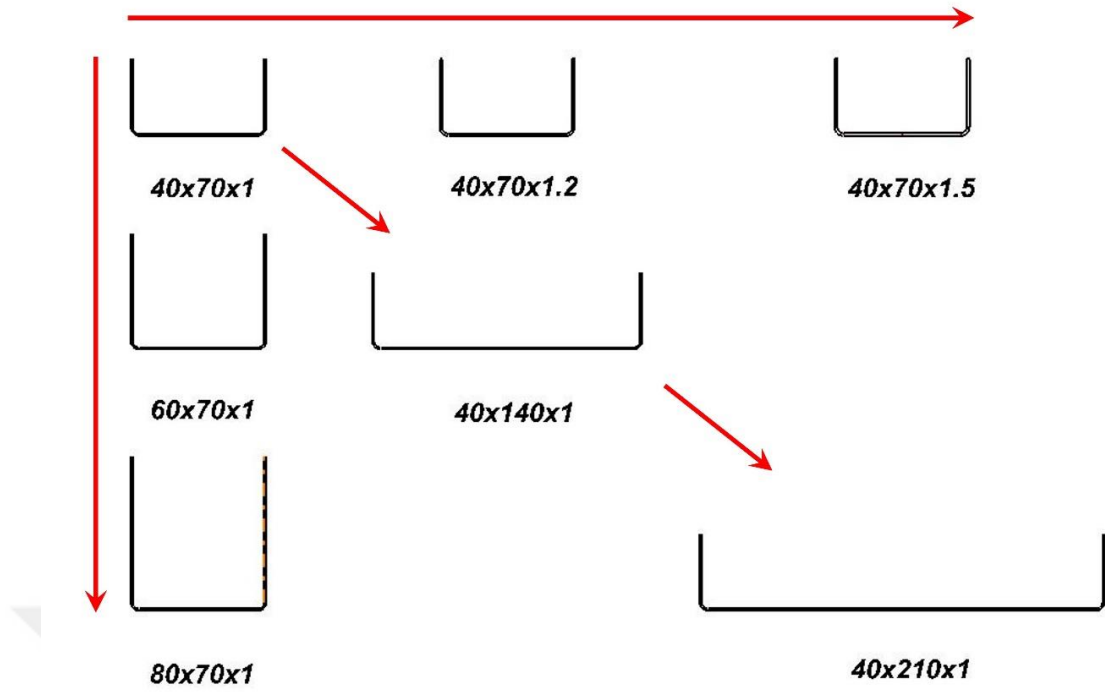


Şekil 2.10 : Rollform 2D 360° profil kontrol ünitesi [11]

2.2.2 Yapılan çalışmanın metodolojisi

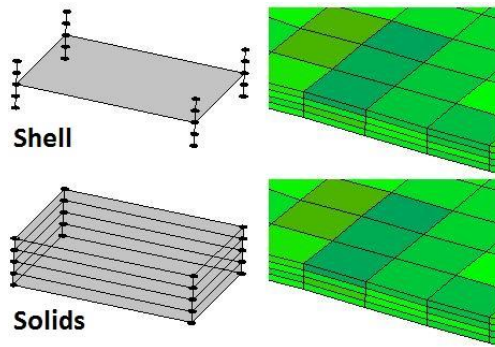
Yapılan bu tez çalışmasında rollform prosesinde şekil alan bir U-Profil üzerinde çalışma yapmanın yararlı bir çalışma olacağı düşünülmüş ve buna göre farklı en, boy ve kalınlığa sahip U-Profiller oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında rollform prosesini etkileyen parametrelerin etkileri incelenmek istenildiğinden değişen her bir değişken için diğer tüm parametreler aynı tutulmaya çalışılmış ve sadece değiştirdiğimiz parametrenin etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Buna göre aşağıdaki şekilden de gözlemlenebileceği üzere 7 farklı U-Profil en, boy ve kalınlık değişimlerinin etkilerini gözlemleyebilmek adına oluşturulmuştur. Oluşturulan profillerin tasarımı hem CATIA-V5 hem de UBECO-PROFIL yazılımları kullanılarak tamamlanmıştır. Her bir değişken için etkilerin artış ve azalışlarını rahatlıkla gözlemleyebilmek adına diğer değişkenler sabit tutularak 3 adet U-Profil tipi tasarlanmıştır.

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere; tasarlanan U-Profillerin ölçüleri (sırasıyla yükseklik, en ve kalınlık) kalınlık artışı baz alınan profiller için; 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 olarak, yükseklik artışı baz alınarak oluşturulan profiller için; 40x70x1 – 60x70x1 – 80x70x1 olarak, en artışı baz alınan profiller için; 40x70x1 – 40x140x1 – 40x210x1 olarak belirlenmiştir. 40x70x1 ölçülerine sahip U-Profil bütün incelemeler için ortak kullanılan profil olduğundan toplamda 7 farklı profil bu tez kapsamında incelenecektir.



Şekil 2.11 : Tez kapsamında incelenecek olan U-Profil çeşitleri

Tez çalışmasının FEA bölümünde yapılacak analizler için hem shell model hem de solid model kullanılacaktır. Solid model kullanılmasının sebebi inceleme kapsamında ele alınacak yüzde kalınlık azalması parametresinin shell model üzerinde çok doğru sonuçlar vermeyebileceğinin öngörülmesinden dolayıdır. Tüm modellerin solid model olarak tasarlanması yerine shell modelin de kullanılmasının sebebi ise solid model için çözüm hızının shell modele göre oldukça uzun sürmesi ve ayrıca incelenen diğer hususlar için solid model kullanmanın sonuçları büyük oranda etkilemeyeceğinin öngörülmesinden dolayıdır. Shell ve solid model yapıları Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12 : Tez kapsamında incelenecek olan U-Profil çeşitleri [5]

2.3 Literatürde Yapılan Çalışmalar

Wifi ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada açık kesitli profillerin rollform prosesinde kullanılan makaraları dizayn edebilen, malzeme özelliklerini içeren kütüphaneye sahip, açınım sac ölçülerini hesaplayabilen, gerekli istasyon sayısı ve her istasyon için gerekli büküm açısının artışını hesaplayabilen kullanıcı dostu arayüze sahip ve COARD diye adlandırılan bir yazılımın geliştirme çalışmalarıyla ilgilenmişler ve yazılımın piyasada bulunan örnekleri ile çok tutarlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [12].

Dametew ve ark. (2017) geri yaylanma üzerine yaptıkları ampirik ve matematiksel çalışmalarla sac türünün, sac kalınlığının ve sürtünme etkilerinin geri yaylanma miktarına olan etkilerini incelemiş ve sac kalınlığı 0.8 mm'den 4.5 mm'ye çıktığında geri yaylanma miktarının %16 azaldığı sonucuna varmışlardır [13].

Aboutalebi ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada standart çekme ve Vickers mikro sertlik testlerini St14 malzemeden yapılan numunelere uygulayarak malzemenin mekanik özellikleri ve hasar parametrelerini belirlemişler ve hem elastik hem de plastik bölgeyi tam olarak kapsayan bir model geliştirip bu modeli kullanmışlardır. Sayısal model ile sonlu elemanlar yönteminin kıyaslandığı bu çalışmada, sayısal model sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır [14].

Soyaslan (2018) yaptığı çalışmada UBECO-PROFIL yazılımı ile istasyon sayısı ve büküm hattı üzerindeki gerilme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmış ve buna göre bir C-Profil için 6 istasyonluk bir hattan çıkan parçaya 4. istasyonda akma gerilmesinin %219'u kadarlık bir gerilme değeri etki ettiğini tespit etmiştir. İstasyon sayısı 6'dan 10'a çıkarıldığında ise profil büküm hattı üzerindeki gerilmenin akma gerilmesinin maksimum %73'üne kadar çıktığı tespit edilmiştir [15].

Paralikas ve ark. (2008) yüksek mukavemetli çeliklerin rollform hattı ile üretiminde hat hızı, rulolar arası mesafe, makara aralığı ve makara çapı gibi farklı parametrelerin profil üzerindeki gerilme dağılımı, boyuna ve enine gerilme değerleri ve toplam gerilme değerleri gibi kalite karakteristiklerine olan etkisini araştırmışlar ve en nihayetinde kalite ve tolerans değerlerine negatif etki eden bir unsur olan yüksek gerilme değerlerinin optimum proses parametrelerinin kullanımıyla azaltılabileceğini göstermişlerdir [10].

Bidabadi ve ark. (2016) nümerik ve deneysel metodları kullanarak yaptıkları çalışmada form açısı artışı, istasyonlar arası mesafe, sac et kalınlığı, büküm radyusu ve profil yan duvar yüksekliği gibi parametrelerin bir U-Profil'in hattan çıkarken sehim vermesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Buna göre; form verme açısının artışının sehim üzerindeki en önemli etken olduğu, yan duvar yüksekliğinin sacın bükülme direncini belirlediği ve yan duvar yüksekliğini arttırmanın sehim verme eğilimini azaltabileceği, sac et kalınlığının azalması halinde sehim vermenin de azalacağı, büküm radyusu ve istasyonlar arası mesafenin ise ihmal edilebilecek seviyede sehim vermeye etkisinin olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Crutzen ve ark. (2016) nümerik simülasyon tekniği için Lagrange ve Euler formalizminin aksine bu iki formalizmi de kapsayan ALE formalizmi üzerinde çalışma yapmışlar ve bu metodun sürekli form verilen rollform gibi prosesler için bütün hat boyunca sabit durumları iyi bir doğrulukla hesaplayabilen bir metod olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca ALE metodunun bazı hesaplama süresi avantajlarını ortaya koymuşlardır [8].

Öztürk ve ark. (2014) rollform prosesinin otomotiv endüstrisindeki yeri ve geleceği üzerine yaptıkları çalışmada rollform prosesi kullanımının yıllar içinde artış gösterdiği (2000 – 2005 yılları arasında %20 artış), gelecekte fazla sayıda ve yüksek mukavemetli ve uzun parçaların rollform prosesi kullanılarak üretilme oranının daha da artacağı, kalıpla şekil vermeye göre maliyet ve hız avantajları üzerinde durulmuş ve rollform prosesi ile üretilen otomobil parçaları tanıtılmıştır [4].

George T. Halmos ve ark. (2006) tarafından düzenlenen ve rollform için en önemli referans kitaplarından biri olarak kabul edilen 'Roll Forming Handbook' adlı eserde rollform prosesinin delme-boşaltma, sac parça formlanabilirlik ile ilgili teorik ve ampirik bilgi ve formülasyonlar, prosesin tasarımı, profil kesimi, rollform hatlarının bakımı, vb. rollform prosesi ile ilgili birçok konuda kıymetli bilgilere yer verilmiş ve akademik ve pratik birçok çalışma kitabın kapsamına alınarak rollformla ilgili oldukça değerli bir referans eser ortaya konulmuştur [1].

3. MATERYAL - METOD

3.1 Profillerin Tasarımı

3.1.1 Profiller için seçilen malzemenin mekanik özellikleri

St14 (DIN 1623) çelik malzeme, otomotiv sektörü için hizmet vermekte olan metal şekillendirme endüstrisi tarafından, dikkat çekici şekil alabilme kabiliyeti ve düşük maliyetli olması özelliklerinden dolayı çok geniş kapsamda kullanılan bir materyal olarak karşımıza çıkmaktadır. [14] St14 çeliği, çok kapsamlı olarak otomotiv endüstrisinde kullanılmasından dolayı literatürde yapılan çalışmalarda da sıkça tercih edilen bir materyaldir [17].

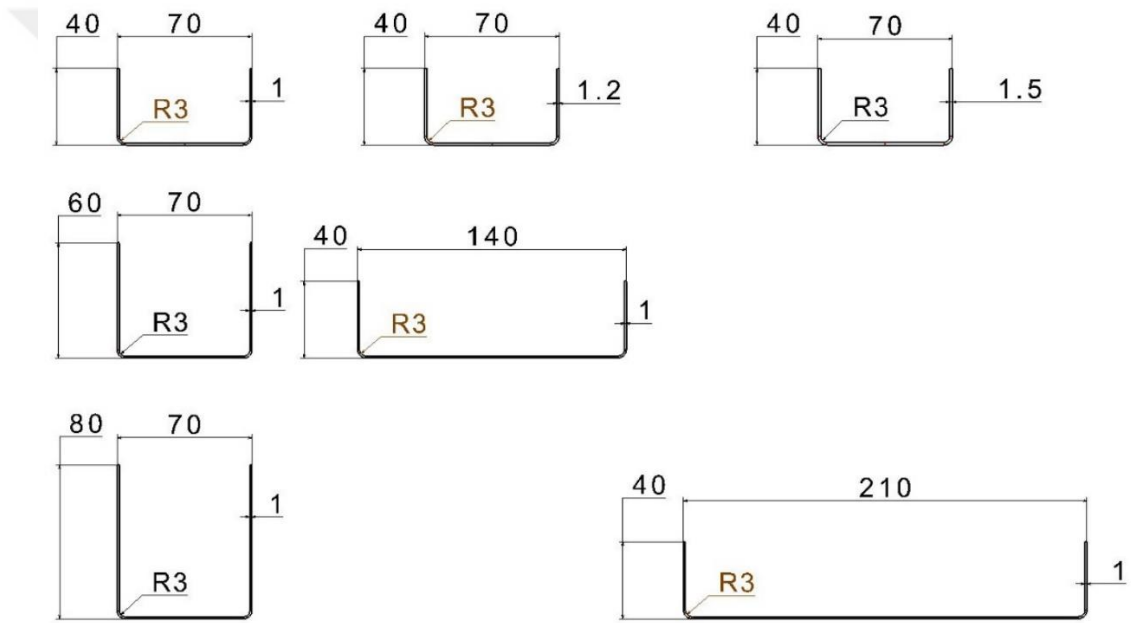
Malzemenin mekanik değerleri kimyasal kompozisyon, haddeleme yöntemi, vb. faktörlerden dolayı değişiklik gösterebilmektedir. Bu bakımdan bazı kaynaklarda aynı malzeme için farklı değer veya aralıklar verilebilmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında St14 sac malzeme üzerinde çalışma yapmak için gereken mekanik değerlerin tamamı UBECO-PROFIL programının malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Bu kütüphanedeki malzemeye ait değerler sırasıyla; $K1$, $K10 - c0.5$, $c1$, $c2$, $c3$, $c6 - R_e - E - \rho$ değerleridir. $K1$, $K10$ katsayıları malzemenin geri yaylanma faktörü katsayısı olarak tanımlanırken, $c0.5$, $c1$, $c2$, $c3$, $c6$ katsayıları 0.5, 1, 2, 3 ve 6 mm kalınlığındaki sac parçalar için kritik minimum büküm faktörü olarak tanımlanmaktadır. Diğer yandan R_e malzemenin akma değeri, E malzemenin elastik modülü, ρ ise malzemenin kg/dm^3 cinsinden yoğunluk değeri olarak tanımlanmıştır. Değerlerin tamamı deneysel çalışmalarla bulunmuş değerler olarak karşımıza çıkmaktadır [18].

UBECO-PROFIL kütüphanesinde malzemeye ait katsayı değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

- $K1 - K10 : 0.985 - 0.960$
- $c0.5 - c1 - c2 - c3 - c6 : 0.5 - 0.5 - 0.5 - 0.5 - 0.5$
- $R_e : 210 \text{ MPa}$
- $E : 211 \text{ GPa}$
- $\rho : 7.85 \text{ kg/dm}^3$

3.1.2 Seçilen profillerin dizaynı ve özellikleri

Daha önceki bölümde de değinilmiş olan U-Profil çeşitleri için bu bölümde profillerin detayları ile ilgili bilgiler verilecektir. Tasarlanan U-Profiller için belirlenen ölçüler Şekil 3.1’deki görselde paylaşılmıştır. Belirlenen ölçüler arasında sırasıyla; boy, en, kalınlık ve iç büküm radyusu değeri bulunmaktadır. İncelenmek istenen etkiye bağlı olarak değişkenlerden sadece 1 tanesi değiştirilmiş, diğer değişkenler sabit tutularak değiştirdiğimiz değişkenin etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. İç büküm radyusu tasarlanan bütün U-Profillerde iç büküm radyusunun etkisi inceleme kapsamına alınmayacağından 3 mm olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 3.1 : Tasarlanan U-Profillerin en, boy, kalınlık ve iç büküm radyusu ölçüleri

Şekil 3.1’den de görüldüğü üzere toplamda 7 adet profil tasarlanmıştır. Buna karşın LS-DYNA analiz programında yapılacak olan FEA incelemesi için shell ve solid olarak 2 farklı model kullanıldığından, toplamda 10 adet analiz dosyası oluşturulmuştur. Bu analiz dosyalarından 3 adeti solid model için oluşturulmuş olup, bunlar sırasıyla; 40x70x1 (Solid) – 40x70x1.2 (Solid) – 40x70x1.5 (Solid) olarak sıralanmaktadır. Bu dosyalar dışında 7 adet daha dosya shell model için oluşturulmuş olup, bunlar sırasıyla; 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1 olarak tayin edilmiştir.

3.1.3 Profiller için kullanılan büküm stratejisi ve istasyon sayısı

Bu bölümde tasarımı yapılan U-Profillerin büküm stratejisi ve istasyon sayısı üzerinde durulacaktır. Belirlenen büküm stratejisi ve istasyon sayısı birbirine bağlı konular olarak karşımıza çıkmaktadır. Her istasyonda kullanılan büküm açıları, malzeme, parça geometrisi, geri yaylanma vb. parametreler parçanın kaç istasyon kullanılarak form verilmesi sonucunda istenilen formu alacağını belirlemektedir. Bütün bu unsurların yanında istasyon sayısı arttıkça maliyetin de buna bağlı olarak artacağı unutulmamalı ve buna bağlı olarak en optimum büküm stratejisinin oluşturulması için çalışma yapılmalıdır.

İstasyon sayısını ve buna bağlı olarak da büküm stratejisini belirleyebilmemiz için çok sayıda deneysel formüller geliştirilmiş ve buna bağlı olarak da mühendislerin henüz işin başında oluşturacakları istasyon sayısı ve büküm stratejisi ile ilgili öngörü yapabilme kapasiteleri oldukça artırılmıştır. En kapsamlı ve en çok parametreyi göz önünde bulunduran deneysel formüllerden bir tanesi eşitlik 3.1'de sunulmaktadır [1].

$$n = \left[0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{0.003U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs \quad (3.1)$$

n : istasyon sayısı

h : kesitin maksimum yükseklik değeri

t : et kalınlığı

α : kılavuz düzleminin bir tarafındaki form açılarının toplam değeri (daha büyük olan açı seçilmelidir)

Y : malzemenin akma değeri (MPa)

U : malzemenin kopma dayanım değeri (MPa)

z : ön delme/çentikleme faktörü katsayısı

s : şekil faktörü katsayısı

e : ekstra istasyon sayısı katsayısı

f : tolerans gereksinimi katsayısı

Eşitlik 3.1 içinde yer alan katsayılar deneysel olarak elde edilmiştir. Belirlenen bu katsayılarla ilgili tablolar Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te yer almaktadır.

Ø For letter "Z" in the equation
pick one number only,
the highest value of all
applicable conditions

y = height

t = thickness

v = distance from edge

Z

• Small perforation

n_1

• Slotted

edge continuous

limited edge continuity

edge not continuous

n_2

n_3

n_4

• Wire

n_5

• Pre-cut

p

$\frac{y}{t} < 20$

$\frac{y}{t} > 40$

no hole

0

0

a

0

0

b

0

0

c

0

0.07

d

0.03

0.05

e

0.05

0.05

f

0.07

0.12

g

0.07

0.12

h

0.1

0.1

i

0.12

0.15

j

0.12

0.15 (if $s \geq 5t$)

k

0.15

0.2 – 0.4 (*)

l

0.25

0.3 – 0.5 (*)

m

0.5

0.6 – 0.7

n_1

0

n_2

0.05

n_3

0.05

n_4

0.30

n_5

0.25

p

0.18

0.18 (pre-cut)

(*) The longer the slot and the smaller the dimension "v", the larger the "Z" factor is.

Şekil 3.2 : Farklı ön delme ve boşaltma işlemleri için tanımlanan z katsayıları [1]

	1	1	1.05	1.05	1–1.05	1.1 – 1.2	1.4	1.5
S	Shape Factor							

Şekil 3.3 : Farklı profil tipleri için belirlenen şekil faktörü katsayıları [1]



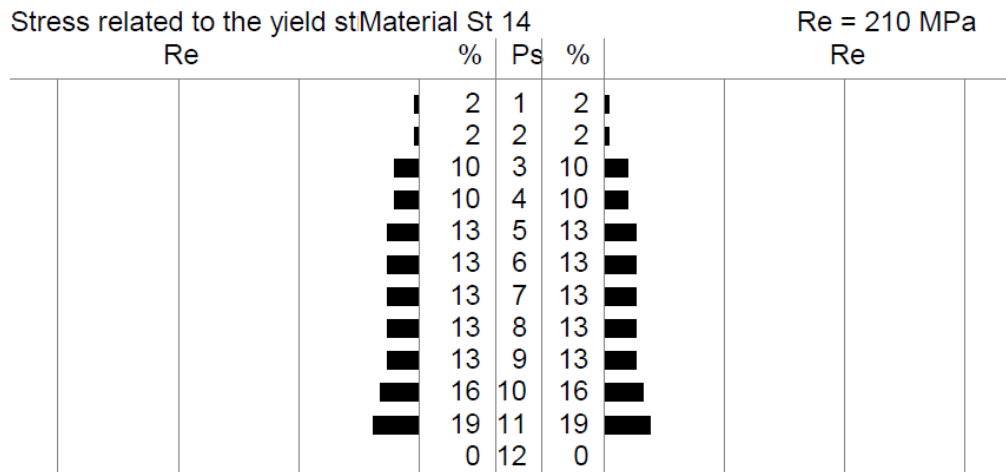
Tolerance Factor

Loose (construction)	0
Medium	0.5–1.0
Tight (automotive)	1.1–1.7
Extremely tight	1.9–(2)

Şekil 3.4 : Farklı tolerans beklentileri için tanımlanan tolerans faktörü katsayıları [1]

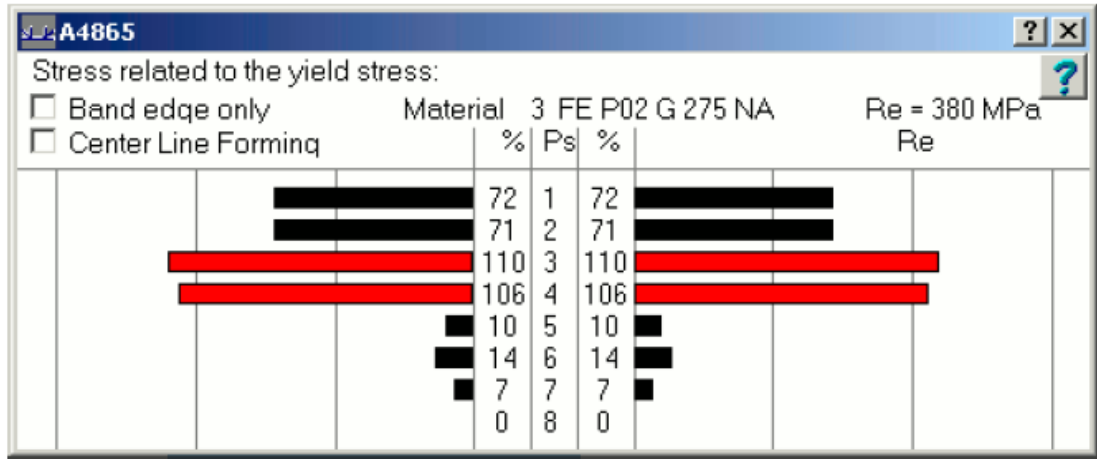
Günümüzde çoğunlukla deneysel veya analitik çalışmalarla elde edilen karmaşık ve hata yapmaya açık eşitliklerle işlem yapmak yerine, bilgisayar üzerinde çalışan ve rollform için özelleşmiş mühendislik yazılımları kullanılmakta ve bu programlarla işlemler yapılmaktadır. Bu mühendislik yazılımları elbette ki bu eşitliklerden bağımsız olarak düşünülmemelidir. Rollform için özelleşmiş mühendislik yazılımları bu eşitlikleri ve daha fazlasını arka planda çalışan algoritmasında çalıştırmakta ve sonuçları bu şekilde sunmaktadır.

Büküm stratejisi oluşturulurken baz alınan en önemli unsurlardan bir tanesi de parçaya gerekli büküm için o istasyonda uygulanması gereken gerilme değeridir ve bu değer her istasyonda kontrol edilerek büküm stratejisi oluşturulur. Kontrol edilmesi gereken en önemli hususlar içinde o istasyon için gereken gerilme değerinin malzemenin akma dayanımı gerilmesinin yüzde kaçına ulaştığıdır. Bununla ilgili Şekil 3.5'te örnek bir istasyonlar arası gerilme dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 3.5 : Her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı

Büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı grafiğinde dikkat edilmesi gereken en önemli konu gerilme değerinin ilgili istasyonda malzemenin akma gerilmesi değerinin yüzde kaçına ulaştığıdır. Bu yüzde değerinin kontrolü ile tasarımcı doğru bir tasarım yapıp yapmadığını ve güvenli sınırlar içinde olup olmadığını rahatlıkla anlayabilmekte ve bu geri besleme datası ile oluşturduğu strateji üzerinde gerekli olan revizyonları yapabilmektedir. Büküm için gereken gerilme değeri asla akma gerilmesi değerinin üzerine çıkmamalıdır. Yani şekil 3.5'te görülen grafikteki gerilme değerleri arasında %100 ve üzerindeki değerler kesinlikle bulunmamalıdır. Bulunduğu takdirde bu durum profil üzerinde çok çeşitli hatalara sebep olabilmekte veya istenilen profil hiç elde edilemeyebilmektedir. Şekil 3.6'da yanlış yapılan bir büküm stratejisi gösterilmiştir.



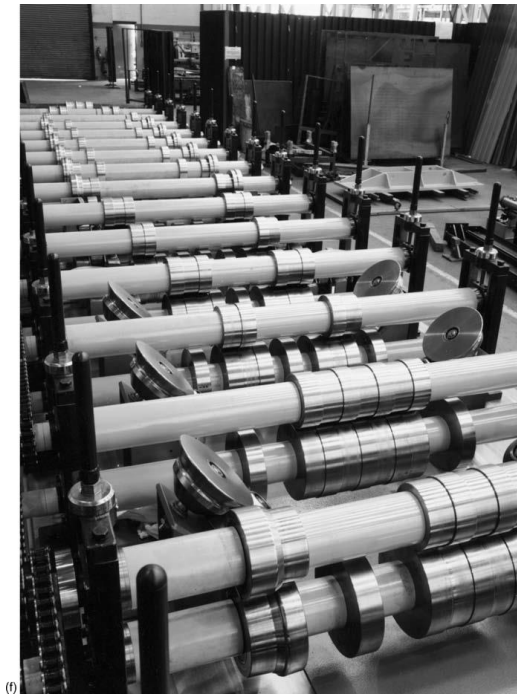
Şekil 3.6 : Yanlış tasarlanan büküm stratejisi [18]

Yüzde gerilme değerleri ile istasyon sayısı arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Bu bağlamda eğer gerekli istasyon sayısının altında istasyon sayısı kullanılarak bir büküm stratejisi oluşturulacak olursa gerilme değerleri yükselecektir. Mühendisler yaptıkları çalışmalarla güvenli alanda kalarak istasyon sayısını azaltmayı hedefleyip maliyetleri minimum tutmaya çalışmakta ve istasyon sayısı ile gerilme değerleri arasındaki optimum noktayı yakalamaya çalışmaktadırlar. Bu çalışmalar için mühendislik yazılımları, ampirik formüller gibi enstrümanları etkili şekilde kullanmanın yanısıra tecrübeye sahip olmak da oldukça önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 3.5'ten de görülebileceği üzere, genellikle baştaki istasyonlarda daha yüksek gerilme değerleri görülmesi oldukça doğaldır. Bunun nedenlerinden biri genellikle başlangıçtaki istasyonlarda oluşabilecek geri yaylanma durumunun sonraki istasyonlarda kompanze edilebilme ihtimalinin olmasıdır. Hattın sonundaki istasyonlara yaklaşıldığında ise büküm dereceleri ve dolayısıyla yüzde gerilme değerleri düşmekte ve buna bağlı olarak da geri yaylanma değerleri azalmaktadır. Bütün bunların yanısıra rollform hatlarında genellikle son istasyona ek kalibrasyon istasyonları da kullanılabilmekte ve burada hem şekilsel bozukluklar hem de daha önceki hatlarda kompanze edilemeyen geri yaylanma etkileri düzeltilebilmektedir.

3.2 Makaraların Tasarımı

Rollform proses dizaynında, profillerin tasarımı, çiçek açınımları ve istasyon sayıları elde edildikten sonraki aşama makaraların, tasarımı tamamlanan profillere uygun olarak tasarlanması aşamasıdır. Yüksek lisans tezinin bu aşamasında makaraların nasıl tasarlandığı ile ilgili önemli noktalara değinilecek ve sanayide kullanılan bazı tasarım hususlarına yer verilecektir. Bu kapsamda; makara çaplarının tayin edilmesi, radyuslu makara tasarımı, boşluk açısı kullanımı gibi konular ele alınacaktır. Rollform hattına yerleştirilmiş makaralar Şekil 3.7'de görülmektedir.

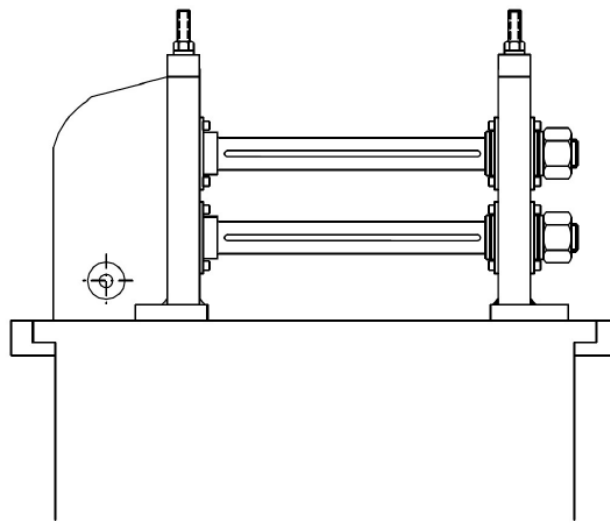


Şekil 3.7 : Rollform hattı üzerinde kullanılan çeşitli makaralar [1]

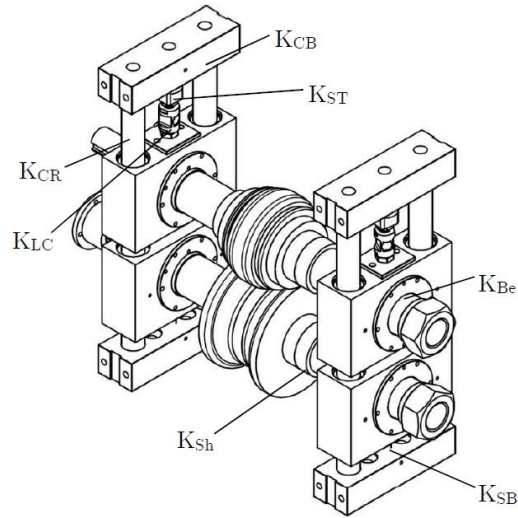
3.2.1 Profillere uygun makara tasarımı

Rollform proses tasarımının yapılabilmesi için en genel kapsamda 5 farklı adım bulunmaktadır. Bu aşamalar; bir kesit geometrisinin geliştirilmesi (I), açınım genişliğinin hesaplanması (II), çiçek açınımının oluşturulması (III), makaraların oluşturulan çiçek açınımına göre tasarlanması (IV), makaralar veya hattın diğer kısımları için kullanılacak şim vb. aksesuarların tasarlanması (V) olarak sıralanabilir. Bu aşamaların, bu bölümde de üzerinde durulacak olan en önemli kısımlarından biri de makaraların tasarlanması aşamasıdır [12].

Rollform hatlarında, parçanın aşamalı ve sürekli olarak form alarak nihai haline ulaşması için istasyon denilen yapılar üzerindeki millere geçirilen makaralar kullanılmaktadır. İstasyonlar, ana taşıyıcı yapısal elemanlar üzerine yerleştirilmiş ve bünyesinde tahrikli alt ve üst mil, rulman vb. yataklama elemanları, mil ve makaraları taşıyan yapısal gövde elemanları, aktarma organları, ayar mekanizmaları, şim, burç vb. yardımcı elemanlar gibi elemanları taşıyan yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.8’de bir istasyonun genel yapısı gösterilmiştir. Şekil 3.9 ve 3.10’da yer alan makaralar ise profilin çiçek açınımına bağlı olarak, her istasyon için ayrı ayrı tasarım yapılmasını gerektiren elemanlardır ve makaraların birden fazla farklı tipleri bulunmaktadır. Genel anlamda makaralar; alt makaralar, üst makaralar, sol ve sağ makaralar ve açılı makaralar olarak sınıflandırılabilirler.



Şekil 3.8 : Alt ve üst mili çift taraftan destekli standart bir rollform istasyonunun yapısı; sol taraf tahrik mekanizmasının olduğu tarafken sağ taraf operatörlerin ayar ve sökme takma işlemleri için kullandığı taraf olarak nitelendirilmektedir. [19]



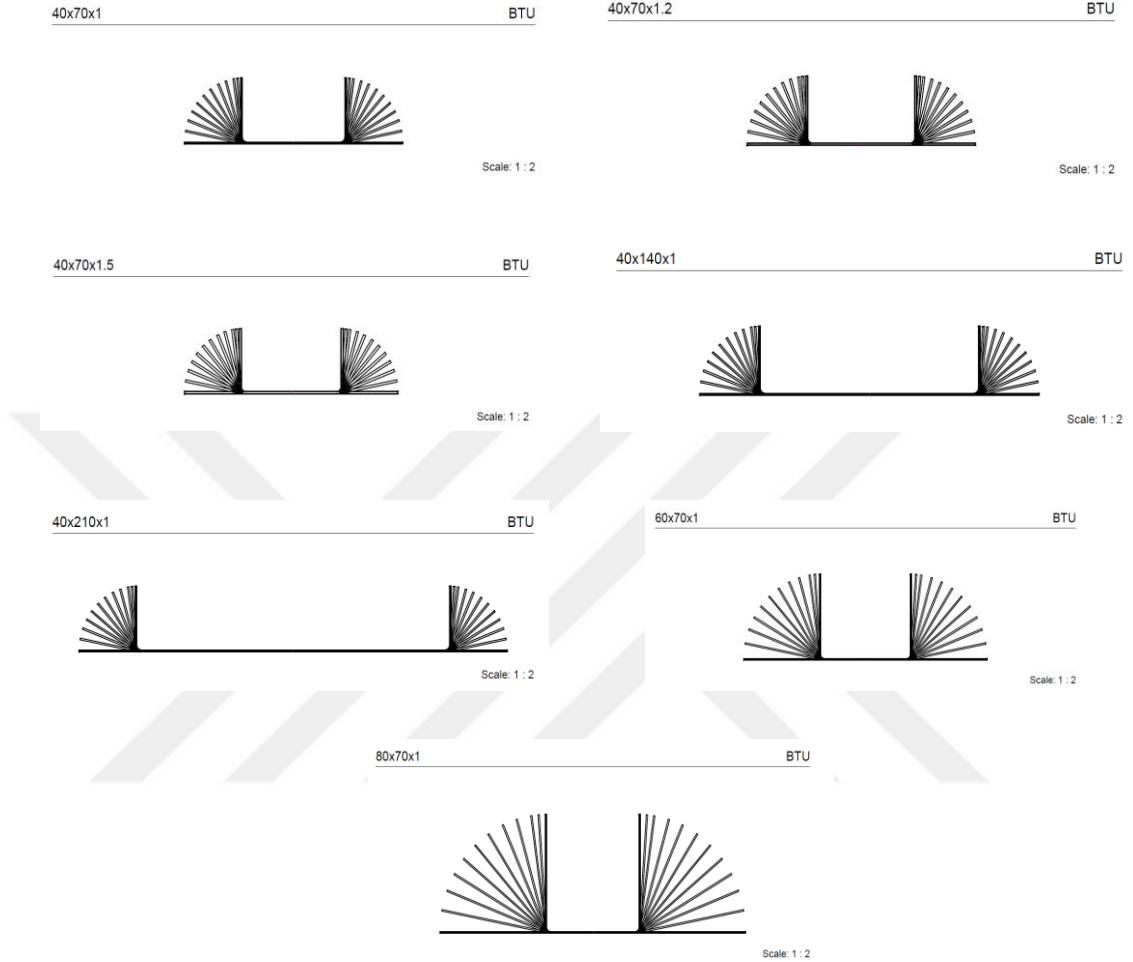
Şekil 3.9 : Alt ve üst makaraları montajlanmış bir istasyonun şematik gösterimi [19]



Şekil 3.10 : Alt, üst, sol ve sağ makaralarla ilgili örnek bir görsel [15]

Şekil 3.11’de görüldüğü üzere tez kapsamında incelenecek olan profillerin çiçek açınımları oluşturulmuş ve buna uygun olarak makara tasarımları yapılmıştır. Büküm stratejisi oluşturulurken bütün U-profil tipleri için en uygun büküm açıları belirlenmiş ve büküm açıları her istasyon için sabit tutulmuştur. Bu durumun sebebi aynı istasyon sayısı, aynı büküm açısı ve stratejisi kullanılan fakat farklı en boy ve yüksekliğe sahip olan U-profillerinin gerilme dağılımı, geri yaylanma değerleri gibi değerlerin ne kadar birbirinden farklı olacağını gözlemleyebilmektir. Her istasyon için büküm açıları

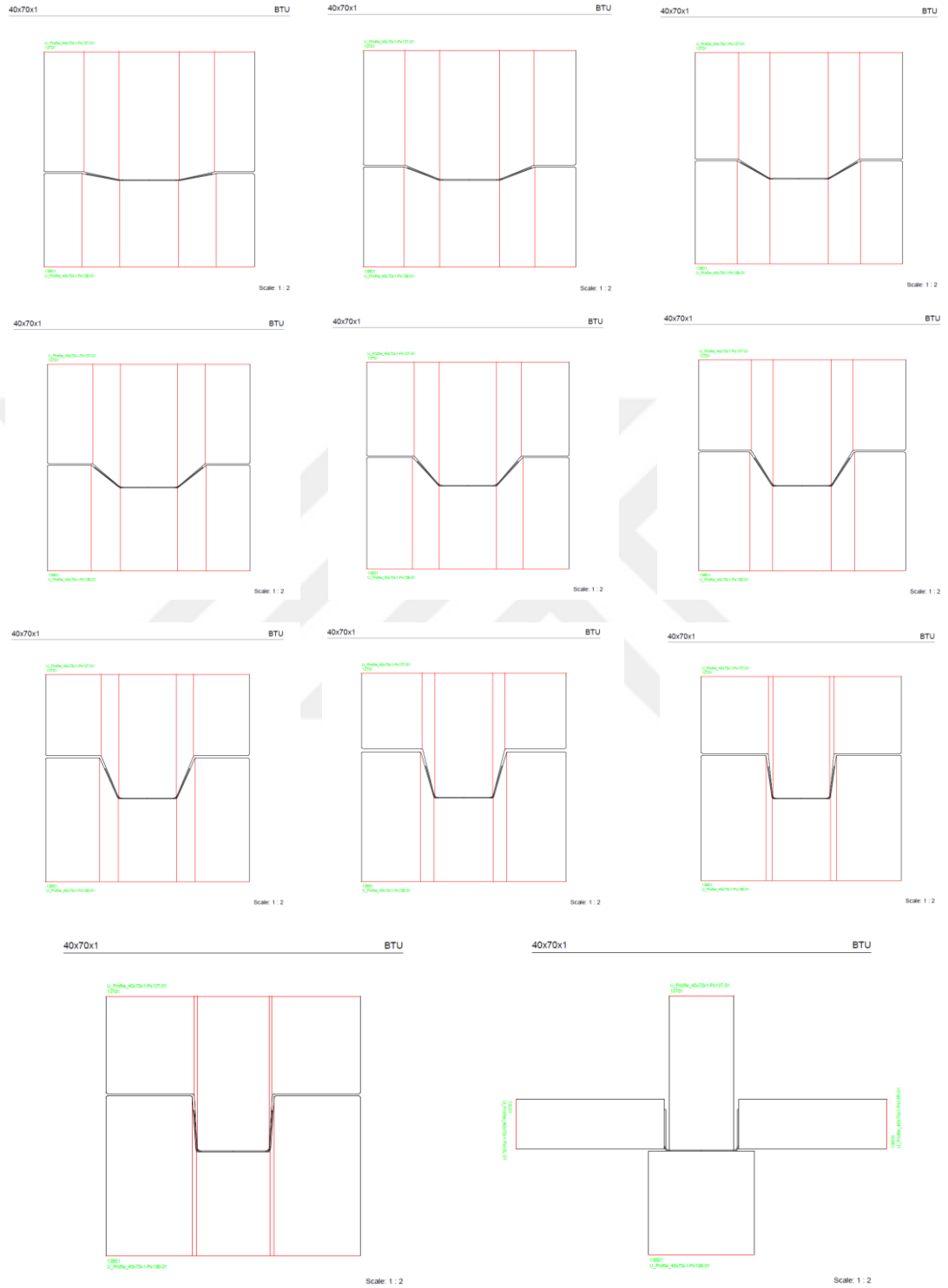
baştan sona doğru sırasıyla; 11°, 10°, 9°, 9°, 9°, 9°, 9°, 8°, 8°, 4°, 4° olarak sıralanmaktadır.



Şekil 3.11 : Tez kapsamında incelenen profillerin çiçek açınımları

Çiçek açınımlarının tamamlanmasının ardından sıra her istasyon için ayrı ayrı makara tasarımı yapılması aşamasına gelmektedir. Makara tasarımı yapılırken öncelikle ilgili istasyondaki büküm hattına uygun olarak makaranın dış kontüleri oluşturulur. Her profilin her istasyonu için yapılan bu çalışmadan sonra tasarımla ilgili dikkat edilmesi gereken boşluk açısı kullanımı, radyuslu tasarım, makaraların bölünmesi ve avare makara kullanımı, makara kontürü ile ilgili geometrik düzeltmeler gibi konular üzerinde gerekli düzeltme ve düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. En başta dış kontürü oluşturulan makara UBECO-PROFIL programı kullanılarak tasarlanabilir. Fakat daha detaylı geometrik düzeltmelere ihtiyaç duyulursa UBECO-PROFIL'den bütün makaralar dışa aktarılıp CATIA-V5 çizim ve modelleme yazılımı kullanılarak

ayrıntılı bir şekilde düzenlenebilir. Şekil 3.12’de yapılan makara tasarımına örnek teşkil etmesi açısından 40x70x1 U-Profilinin makaraları gösterilmiştir [15].

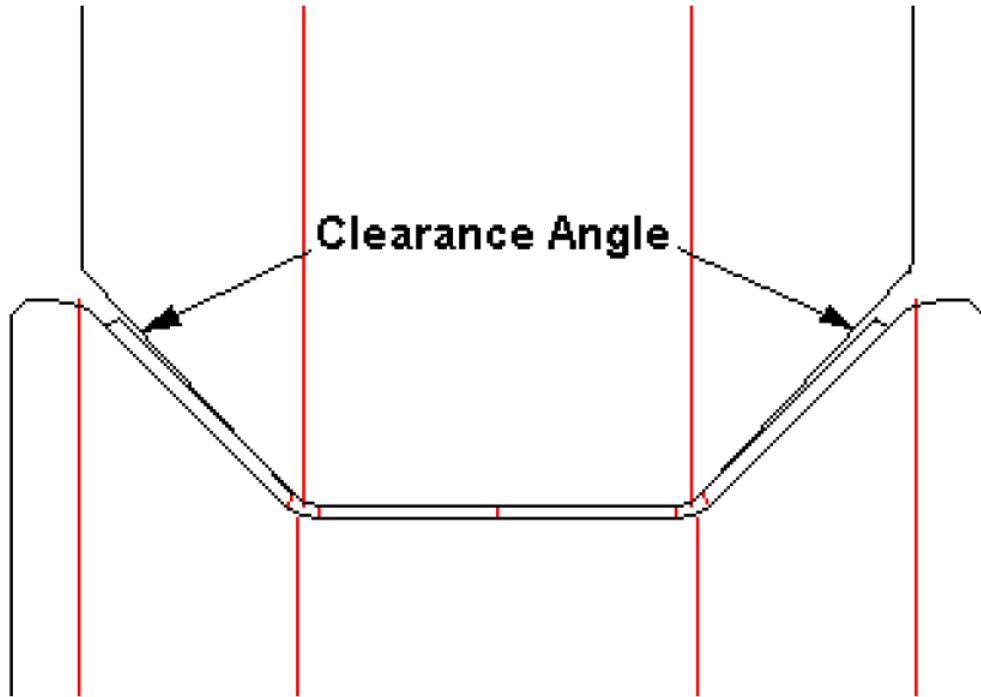


Şekil 3.12 : 40x70x1 Tip U-Profil için yapılan makara tasarımı, sırasıyla önce soldan sağa sonra yukarıdan aşağıya olmak üzere istasyon numaraları; 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 şeklindedir.

Şekil 3.12’de görülen 40x70x1 U-Profilı için yapılan makara tasarımı diğer tüm U-Profillere de aynı şekilde uygulanmıştır. Böylelikle profillerin proses tasarımı tamamlanmış ve tüm proses analiz yapmak için hazır hale getirilmiştir.

3.2.2 Boşluk (Clearance) açısının kullanımı

Makara tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli tasarım kriterlerinden birisi de boşluk açısının kullanımıdır. Boşluk açısı Şekil 3.13’ten de görülebileceği gibi büküm hattı radyusunun bittiği noktadan makara dış kontürünün genellikle 1° veya 2° ’lik açılarla saptırılması durumu olarak tanımlanabilir. Bu durum, makaralar arasında profilin et kalınlığından daha büyük bir boşluk bırakılmasına sebep olmakta ve bu boşluk makaraların çapları doğrultusunda referans düzlemde uzaklaştıkça giderek artmaktadır [18].



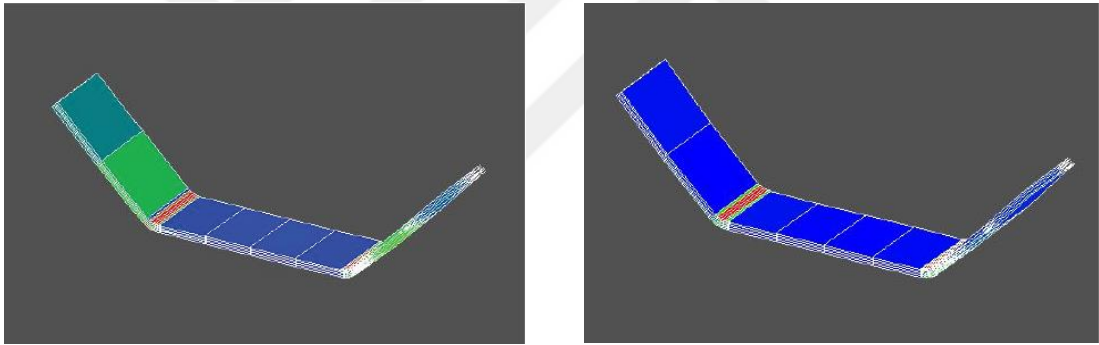
Şekil 3.13 : Üst makarada boşluk açısı kullanımına bir örnek [18]

Rollform prosesinde makara tasarımı yapılırken boşluk açısının kullanılması için en genel kapsamda iki önemli sebep bulunmaktadır. Bu sebepler;

- Makara çaplarının birbirine oranının, dişli aktarma oranına eşit olmadığı durumlarda çevresel hızın dengelenmesi,
- Profilin yan duvarlarının makaralar arasına daha rahat bir şekilde girmesi ve böylece profil üzerindeki gerilmelerin azaltılması,

olarak sıralanabilir.

Boşluk açısı kullanımının profilin gerinme değeri üzerinde yarattığı etki şekil 3.14 üzerinde gözlemlenebilir. Sol tarafta bulunan profile boşluk açısı kullanılmadan form verilmiş olup, şağ taraftaki profile ise boşluk açısı kullanılarak form verilmiştir. FEA metodu ile analize tabi tutulan bu iki profilin gerinme değeri birbirinden oldukça farklı elde edilmiştir. Sol taraftaki profilin gerinme değeri şağ taraftakinden oldukça yüksek çıkmaktadır [18].



şekil 3.14 : Sol tarafta boşluk açısı kullanılmadan, şağ tarafta ise boşluk açısı kullanılarak form verilen profiller yer almaktadır. (Yeşil renk profil üzerinde orta derecede gerinme olduğunu sembolize ederken, mavi renk ise düşük derecede gerinme olduğunu sembolize etmektedir.) [18]

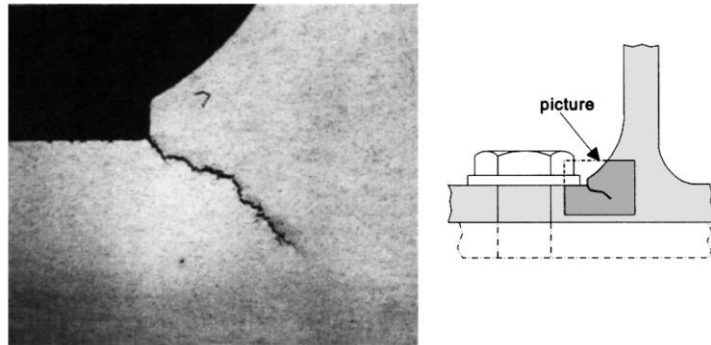
Yapılan bu tez çalışmasında tasaralanan bütün makaralar için boşluk açısı kullanılmış olup Şekil 3.15’de bununla ilgili bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : 40x70x1 U-Profilinin 5. İstasyonu için yapılmış makara tasarımı

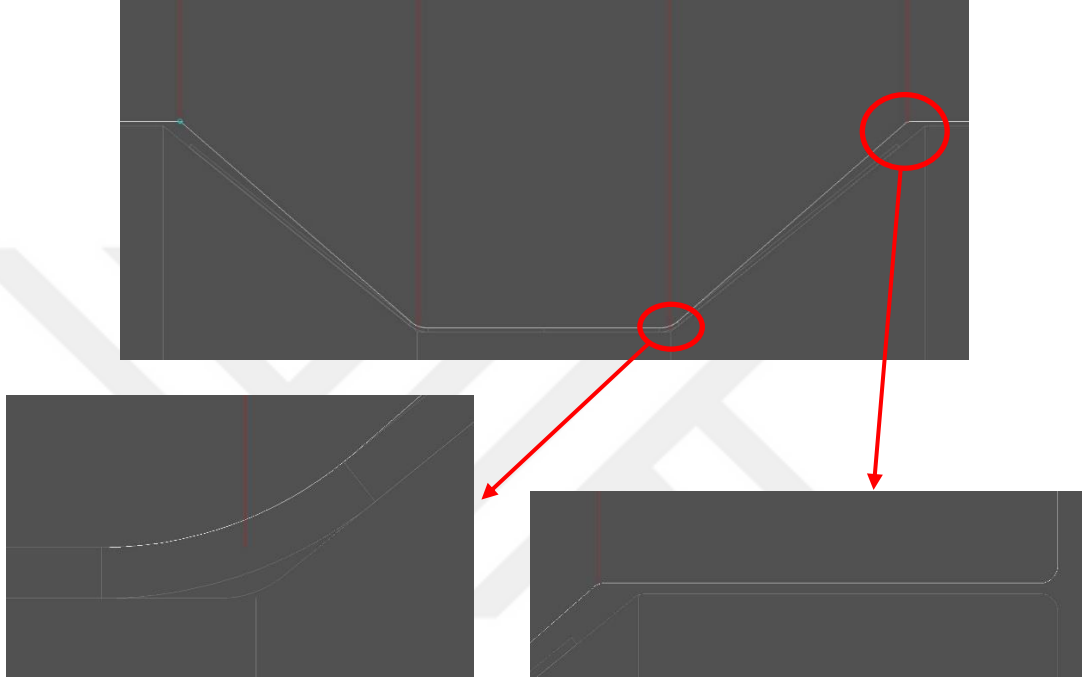
3.2.3 Radyuslu makara tasarımı

Makara tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli tasarım kriteri de makaraların köşelerinin sivri şekilde tasarlanmaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Makaraların tüm köşelerinin radyuslu şekilde tasarlanmasına özen gösterilmelidir. Bunun nedeni keskin köşelerdeki gerilme konsantrasyonunun radyuslu köşelerdekine oranla daha yüksek olması ve radyuslu bölgelerde keskin köşeli bölgelere oranla gerilmenin daha homojen dağılım göstermesidir. Keskin köşeye sahip bölgelerde çatlağın hem oluşma hem de ilerleme ihtimali artmaktadır. Bununla ilgili bir örnek Şekil 3.16’de ele alınmıştır [20].



Şekil 3.16 : Keskin köşeli uçdan başlayıp, ilerleyen bir çatlak [20]

Tez çalışması kapsamında yapılan tüm makara tasarımlarında bütün köşeler radyuslu olarak tasarlanmış ve en az 2 mm yarıçapı radyus kullanılmasına özen gösterilmiştir. Şekil 3.17’de 80x70x1’e ait 8. istasyon için yapılan makara tasarımının görseli verilmektedir. Bu görselden de görülebileceği üzere radyuslu makara tasarımı anlayışı tez kapsamında incelenen makaralara uygulanmıştır.



Şekil 3.17 : 80x70x1’e ait 8. istasyon için yapılan radyuslu makara tasarımı

3.2.4 Kullanılan makara çapları

Makara çaplarının belirlenmesi üzerinde etkiye sahip birden çok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden en önemli olanları; profilin geometrisi (eni, yüksekliği ve kalınlığı), rollform makinesinin özellikleri (istasyonlardaki maksimum ve minimum mil yükseklik değerleri, maksimum açınım genişlik değeri, vb.), profil üzerinde aşırı beslemeden dolayı oluşabilen burkulma vb. sorunları yok edebilmek için sürülen makaraların çaplarının baştaki istasyondan sondaki istasyona doğru kademeli olarak artması gerekliliği ve makara çapına bağlı maliyet kalemleri olarak sıralanabilir [12].

Tez çalışması için kullanılan alt, üst, sol ve sağ makaraların çapları tüm profil tiplerinin bütün istasyonlarını kapsayacak şekilde Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 : Tez çalışmasında kullanılan makara çapları

Tip	Makara Tipleri	İstasyon Sayısı ve Makara Çapları (mm)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
40x70x1	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
	Sol Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40x70x1.2	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6	297.6
	Sol Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40x70x1.5	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	297	297	297	297	297	297	297	297	297	297	297
	Sol Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40x140x1	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
	Sol Makara	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 3.1 (devam) : Tez çalışmasında kullanılan makara çapları

Tip	Makara Tipleri	İstasyon Sayısı ve Makara Çapları (mm)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
40x140x1	Sağ Makara	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
40x210x1	Sol Makara	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
60x70x1	Üst Makara	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
	Sol Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80x70x1	Alt Makara	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	Üst Makara	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
	Sol Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sağ Makara	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 3.1’de görülebileceği üzere tez çalışmasında kullanılan alt, üst, sol ve sağ makara çapları sonraki bölümlerde üzerinde durulacak olan rollform makine datalarındaki en ve yükseklik limitleri, aktarma oranı ve sac kalınlığına bağlı olarak belli değişiklikler göstermektedir. Örneğin; bütün U-Profiller için aynı makine datası kullanılmış olmasına karşın, 40x70x1 ve 40x70x1.5 ölçüsündeki profillerin üst makaralarının çapları arasındaki fark sac kalınlıklarının (1 – 1.5 mm) birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bütün U-Profil tiplerinin alt ve üst makaralarına bakılırsa bu makaraların çapları arasında belli bir oran olduğu gözlemlenebilmektedir. Bunun nedeni, rollform makinası aktarma organlarının aktarma oranıdır. Makine datalarında 1.5 olarak tanımlanan bu oran neticesinde alt ve üst makaraların çapları arasında da 1.5 katlık bir fark ortaya çıkmıştır. Bu oran neticesinde alt ve üst makaraların birbirine en yakın olduğu referans düzlemi üzerindeki çevresel hızlarının birbirine eşit olması sağlanmış ve bunun aksi durumda parça üzerinde oluşabilecek hataların önüne geçilmiştir.

3.3 Makine Dataları

Rollform hattında kullanılan makaraları tasarlayabilmek için öncelikle Şekil 3.18’deki makine dataları belirlenmeli ve kullanılan yazılım içindeki gerekli bölüme bu belirlenen değerler girilmelidir. Belirlenmesi gereken değerler; dişli aktarma oranı, çalışma genişliği, mesafe burcu (spacer) çapı, makara malzeme özellikleri, sonraki istasyona olan mesafe, kalibrasyon faktörü, alt, üst, sol ve sağ makaralar için mil çapları ve çalışma çapları, referans noktasının x ve y değerleri olarak sıralanabilir [18].

Machine: C:\Users\Public\Documents\UBECO\PROFIL\BTU_THESI... ? X

Machine File Stand Rolls

F = Forming Stand C = Calibration St.

Machine: ECO\PROFIL\BTU_THESIS_FINAL_2.m01

Transm. Ratio B:T Roll: 1,000 : 1,500

Working Width: 500,000

Spacers: Ø: 50,000 Material: 2080

Stand: F01 Dist. to Next Stand: 500,000

Calibration Factor (%): 0,100 Deform. Deg. (%):

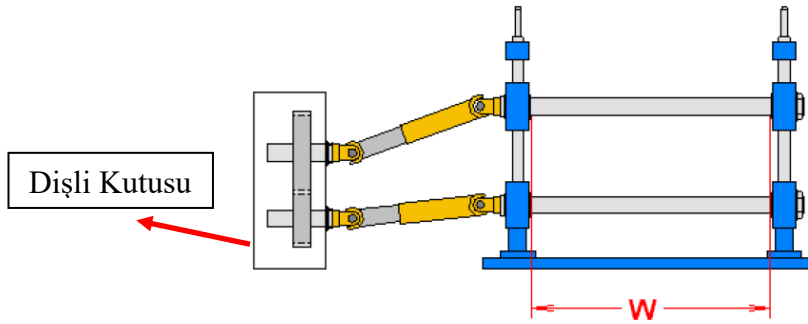
Shaft	Bottom	Top	Left	Right
Ø Shaft:	40,000	30,000	30,000	30,000
Working-Ø:	200,000	300,000	350,000	350,000
Ref. Point x:	200,000	200,000	200,000	200,000
Ref. Point y:	150,000	150,000	150,000	150,000
Incl. Angle:				

Şekil 3.18 : Tez çalışmasında kullanılan makine dataları

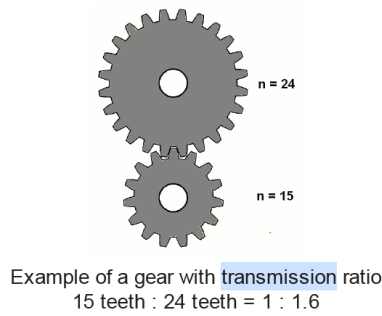
3.3.1 Aktarma oranı

Makine dataları ile ilgili tüm parametreler rollform hattı üreticileri tarafından hatta üretilen parçanın profil geometrisi (en, yükseklik, kalınlık, vb.), malzemesi, formu gibi kriterler göz önüne alınarak belirlenmekte ve rollform hattı bu kriter ve parametreler doğrultusunda tasarlanmaktadır.

Makine datası ile ilgili belirlenmesi gereken en önemli kriterlerden biri de Şekil 3.20’de bir örnek ile gösterilen aktarma oranıdır. Bu oran parçanın yüksekliğiyle beraber değişmekte olup yüksekliği daha az olan parçalar için aktarma oranı 1:1 olarak belirlenebilirken, yüksekliği fazla olan parçalar için genellikle 1:1.4 veya 1:1.5 aktarma oranları kullanılabilmektedir. Bir istasyonda alt ve üst mil bulunmaktadır ve bu millere motordan gelen güç dişliler vasıtasıyla aktarılmaktadır. Rollform hatlarındaki tahrik mili Şekil 3.19’den görüldüğü gibi genellikle alt mil olmakta ve üst mile dişliler sayesinde moment aktarılmaktadır. Dişliler arasındaki oranın değişimine bağlı olarak makara çapları da değişmekte ve makaraların çevresel hızlarının eşitlenmesi beklenmektedir. Böylece, sac parça üzerindeki hatalar minimuma indirilmiş ve sac ile makaralar arasında kayma yaşanmaksızın daha bir çekiş elde edilmiş olur [18].



Şekil 3.19 : İstasyonunun millerine bağlı tahrik mili ve dişli kutusu görseli [18]

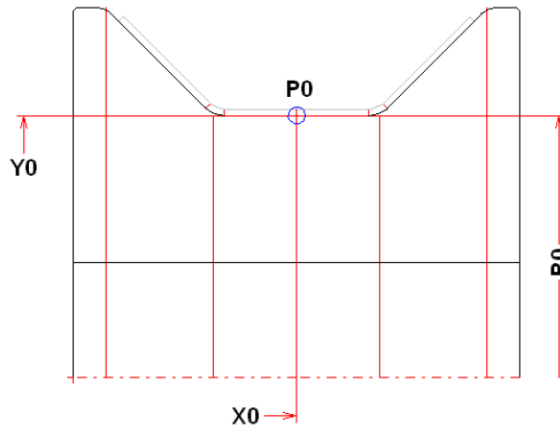


Şekil 3.20 : Diş sayısına bağlı olarak 1:1.6 aktarma oranı örneği [18]

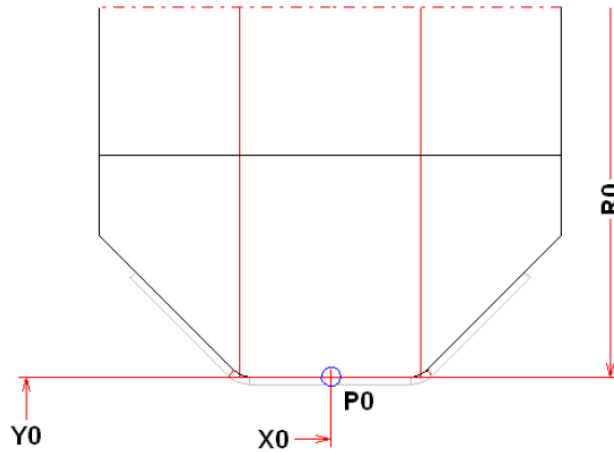
Tez çalışması kapsamında profil yükseklikleri fazla olduğundan 1:1.5 aktarma oranının seçilmesi uygun bulunmuş ve çalışmalar bu oran doğrultusunda yapılmıştır.

3.3.2 Makaraların çalışma çapları

Makaraların çalışma çapları rollform makinesinin tasarımını yapan mühendisler tarafından hattın hangi profili üreteceğine göre belirlenmektedir. Rollform hatlarında bulunan istasyonların alt ve üst millerinin yukarı ve aşağı hareketlerinin bir minimum ve maksimum sınırı vardır. Bu sınırlar doğrultusunda makaralar için maksimum ve minimum çalışma çapları referans noktasına bağlı olarak elde edilmektedir. Bir U-Profil için referans noktasının yeri Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'deki gibi profilin simetri eksenini ile makara ile profilin temas yüzeyinin kesişim noktası olarak tanımlanmaktadır.

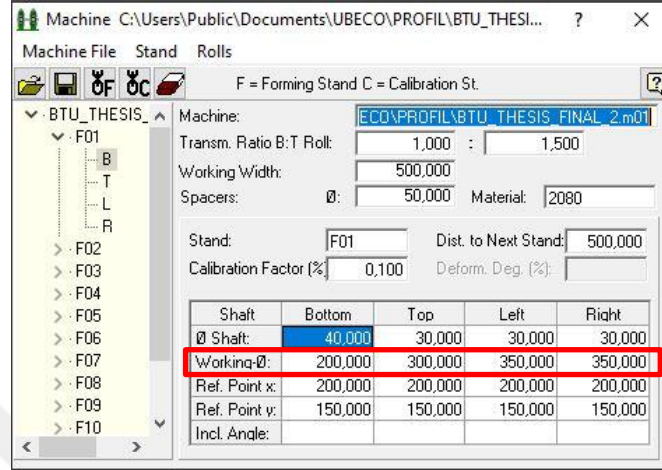


Şekil 3.21 : Alt makara için referans noktasının yeri [18]



Şekil 3.22 : Üst makara için referans noktasının yeri [18]

Buna göre, makaraların çalışma çapları; Şekil 3.23'ten görülebileceği gibi alt makara için 200 mm, üst makara için 300 mm, sol ve sağ makara için 350 mm olacak makine datalarında tanımlanmış ve çalışmalar buna göre devam etmiştir.

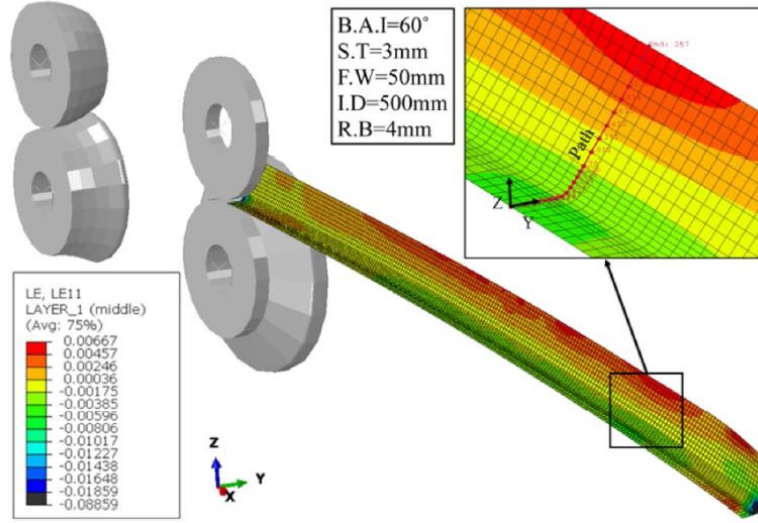


Şekil 3.23 : Tez çalışmasında kullanılan makaraların çalışma çapları (mm)

3.3.3 İstasyonlar arası mesafe

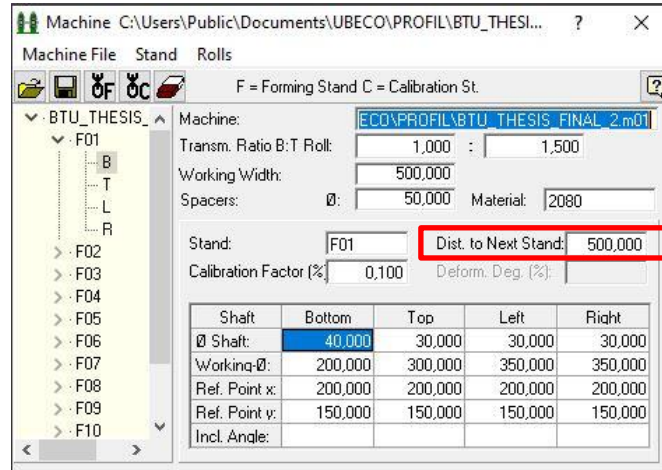
İstasyonlar arası mesafenin belirlenmesinde; kullanılan profilin özellikleri, rollform prosesinin nümerik analizi, tecrübe ile kazanılan bilgiler ve maliyetler gibi kriterler oldukça önemli bir yer tutmaktadır. İstasyonlar arasındaki mesafe olması gerekenden fazla olursa sürülen sac üzerinde birtakım sehim verme durumları, az tutulursa malzeme üzerinde birtakım hatalar veya maliyetlerin artması gibi durumlarla karşılaşılabilir. O nedenle rollform hattı tasarlayan mühendisler profile bağlı olarak çeşitli tecrübe bilgilerini ve nümerik analiz programlarının sonuçlarını kullanarak en optimum çözümü en uygun maliyet ile tasarlamayı hedeflemektedirler.

Şekil 3.24'te istasyon mesafesi veya diğer başka nedenlere bağlı olarak gelişebilen profilin istasyon çıkışında sehim vermesi durumu ele alınmıştır [16].



Şekil 3.24 : İstasyon çıkışında profil üzerinde oluşan sehim [16]

Tez çalışması kapsamında istasyonlar arası mesafenin Şekil 3.25'ten de görülebileceği üzere 500 mm olarak alınması uygun bulunmuştur. Bunun nedeni, bu mesafenin sanayide sıklıkla kullanılan bir mesafe olarak karşımıza çıkması, bu parametrenin etkilerinin bu tez kapsamında ele alınmayacak olmasıdır.



Şekil 3.25 : Tez kapsamında kullanılan istasyon mesafesi (mm)

3.4 Prosesin UBECO-PROFIL İle Analizi

Proses tasarımı tamamlanan Rollform hattı için son aşama, tamamlanan tasarımın UBECO-PROFIL veya LS-DYNA gibi çeşitli mühendislik yazılımları ile kontrolü, gerekli verilerin elde edilmesi ve bu veriler doğrultusunda eğer gerekli ise geri beslemelerin tasarıma yansıtılması olarak tanımlanabilir. O bakımdan bu bölümde, UBECO-PROFIL programından elde edilen geri yaylanma değerleri üzerinde durulacaktır.

3.4.1 Eğilme teorisi

Eğilme teorisi üzerine hem elastik bölge hem de plastik bölge için geliştirilmiş analitik metotlar bulunmaktadır. Bu analitik metotlar UBECO-PROFIL yazılımı içerisinde arka plandaki algoritmada çalışmakta ve buna göre hesaplamalar yapılarak tasarım aşamasında gerilme, geri yaylanma gibi kriterler hakkında durumun ne olduğu tasarımcıya gösterilmektedir. Tasarımcı programın bu özelliği sayesinde sonlu elemanlar ile uzun vakitler alan çözüm sonuçlarını beklemeden henüz tasarım aşamasında fikir sahibi olabilmekte ve buna göre tasarımını şekillendirebilmektedir.

Eğilme teorisi, hem elastik hem de plastik şekil değiştirme durumları göz önüne alınarak kurulmuş ve bu durumlarla alakalı olarak çeşitli formüller ortaya atılmıştır. Elastik bölge için temel eğilme eşitlikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir [21].

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad (3.2)$$

$$\sigma_x = -\frac{y}{c} \sigma_m \quad (3.3)$$

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (3.5)$$

σ_x : x-ekseni doğrultusundaki aksenal gerilme değeri

σ_m : max. gerilme değeri

ρ : eğrilik yarıçapı

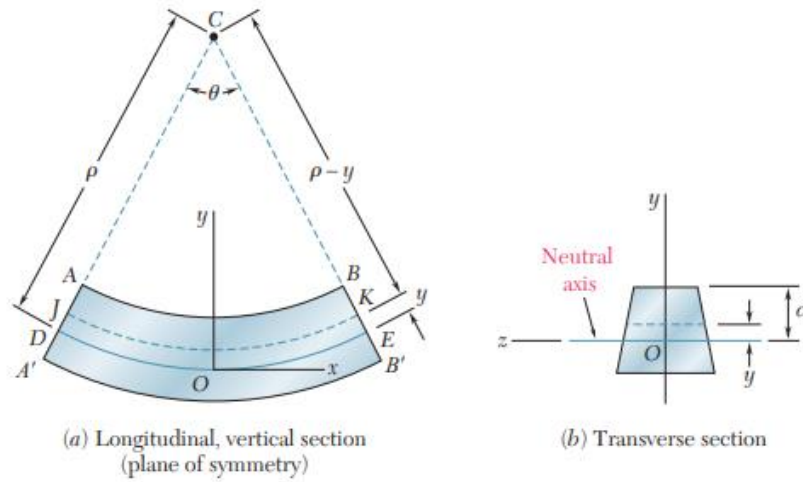
M : eğilme momenti değeri

I : eylemsizlik momenti

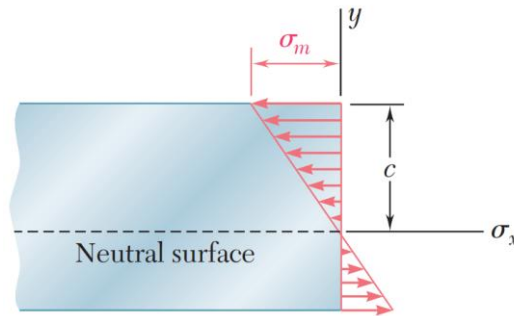
y : parça üzerindeki herhangi bir noktanın tarafsız eksene olan mesafesi

c : tarafsız eksene en uzak mesafe değeri

Maksimum gerilme, tarafsız eksen konumu, eğrilik yarıçapı, tarafsız eksene en uzak mesafe vb. kavramlar Şekil 3.26 ve 3.27 üzerinde gösterilmektedir [21].



Şekil 3.26 : Bir kiriş üzerindeki tarafsız eksen, eğrilik yarıçapı (ρ), tarafsız eksen ile kiriş arasındaki en uzak mesafe (c), parça üzerindeki belirli bir noktanın tarafsız eksene olan mesafesinin (y) şematik gösterimi [21]



Şekil 3.27 : Eğilme gerilmelerinin (σ_x, σ_m) şematik gösterimi [21]

Hem elastik hem de plastik deformasyonun hesaba katıldığı daha kapsamlı bir diğer eşitlikler bütünü ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Bu eşitliklerin yanısıra, elastik, mükemmel plastik davranış gösteren sac'ın bükümü için Şekil 3.28'de moment – eğrilik yarıçapı grafiği, Şekil 3.29'da ise gerilme dağılımı grafiği verilmiştir [22].

$$M = 2 \left\{ \int_0^{y_e} E' \frac{y}{\rho} dy + \int_{y_e}^{\frac{t}{2}} S y dy \right\} = \frac{S t^2}{12} (3 - m^2) \quad (3.6)$$

$$m = \frac{\left(\frac{1}{\rho}\right)_e}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad (3.7)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \vartheta^2} \quad (3.8)$$

$$\sigma_1 = S = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \quad (3.9)$$

σ_1 : asal gerilme değeri

σ_f : kopma gerilme değeri

ρ : eğrilik yarıçapı

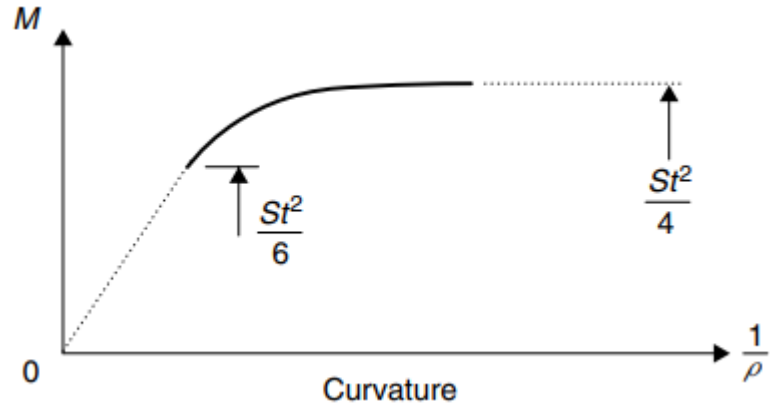
M : eğilme momenti değeri

ϑ : poisson oranı

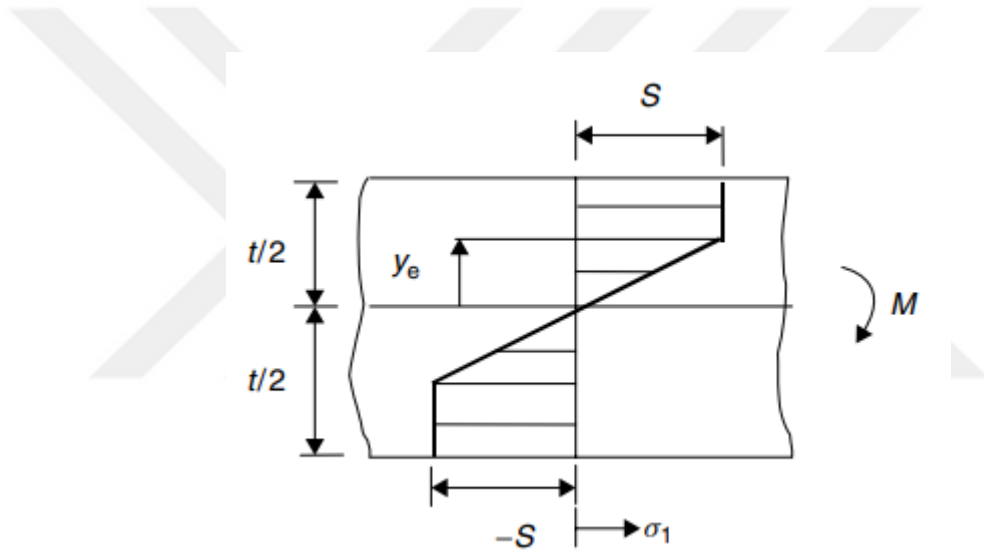
y : parça üzerindeki herhangi bir noktanın tarafsız eksene olan mesafesi

t : et kalınlığı

y_e : akma momentine karşılık gelen moment değeri için tarafsız eksene olan mesafe



Şekil 3.28 : Gerilme uygulanmadan büküm yapılan sac için moment-eğrilik eğrisi[22]



Şekil 3.29 : Elastik, mükemmel plastik sacın gerilme uygulanmadan bükümü durumu için gerilme dağılımı [22]

Deformasyona uğrayan sac parçalarda tarafsız eksenin konumu parçanın ortasından geçen doğrultudan sapmakta ve farklı bir doğrultu üzerinde yer edinmektedir. Bu gibi durumlar için tarafsız eksenin uzunluğunu hesaplayacak bir denklem geliştirilmiştir. Bu eşitlik içinde bazı test yöntemleriyle deneysel olarak belirlenebilen düzeltme faktörlerini de içermektedir. Geliştirilen bu eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$L = 2\pi \left(r_i + f \frac{s}{2} \right) \frac{\alpha}{360^\circ} \left(1 + \frac{k_1}{100} \right) + k_2 \quad (3.10)$$

L : tarafsız eksenin uzunluğu (mm)

r_i : iç radyus yarıçapı (mm)

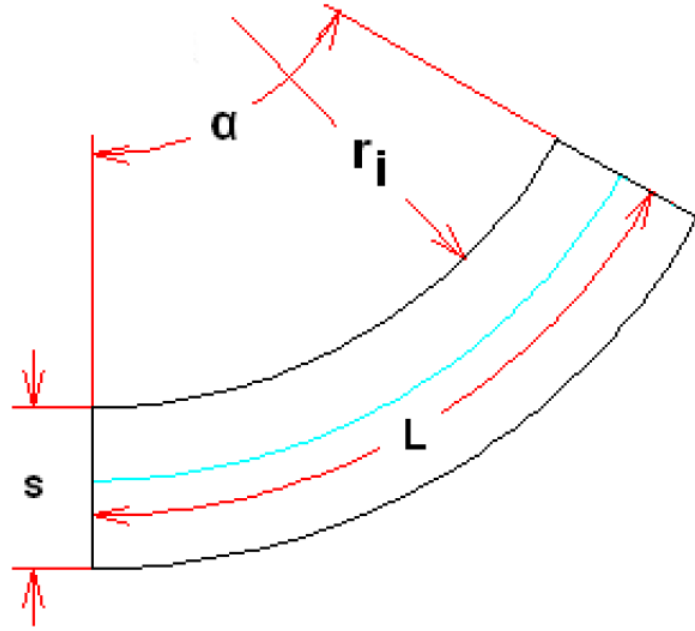
f : tarafsız eksenin konum faktörü (sacın iç tarafı için 0, merkezi için 1)

s : et kalınlığı (mm)

α : büküm açısı ($^\circ$)

k_1 : yüzde düzeltme faktörü (%)

k_2 : uzunluk düzeltme faktörü (mm)



Şekil 3.30 : Tarafsız eksen uzunluğu [18]

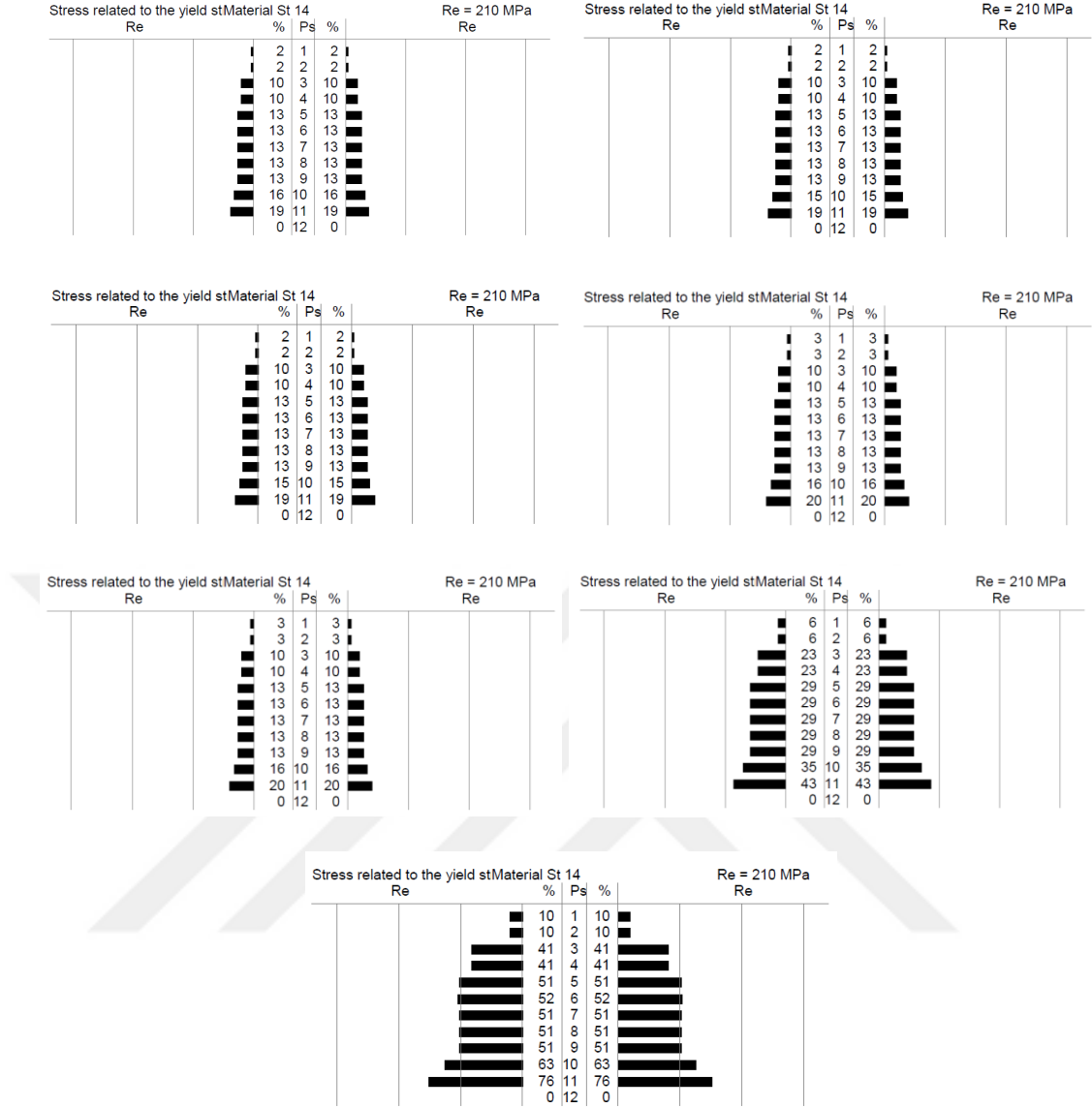
Şekil 3.30’da bir sacın büküldüğü durum ele alınmış ve tarafsız eksen uzunluğu (L), sacın et kalınlığı (s), iç yarıçap değeri (r_i), büküm açısı şematik olarak gösterilmiştir.

3.4.2 Büküm hattının gerilme değeri (PSA) sonuçları

Eğilme teorisi başlığı altında anlatılan analitik metodlar ve daha fazlası UBECO-PROFIL programı tarafından kullanılmakta ve büküm hattı üzerindeki gerilme değerleri bu sayede elde edilebilmektedir. Buna göre; UBECO-PROFIL programı kullanılarak tez kapsamında incelenecek olan 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1 U-Profil tipleri için yapılan tasarımlar ile beraber büküm stratejileri oluşturulmuş ve oluşturulan bu stratejiler ve istasyon sayıları Şekil 3.31’de paylaşılmıştır. Büküm stratejisi ve istasyon sayıları belirlenirken her istasyon için yüzde gerilme değerleri, geri yaylanma değerleri, parçaların geometrik farklılıkları gibi etmenler göz önünde bulundurulmuş ve bunların neticesinde UBECO-PROFIL programından alınan Şekil 3.31’deki sonuç ortaya çıkmıştır.

Büküm stratejisi ve buna bağlı olarak istasyon sayısı belirlenirken yüzde gerilme değerinin en yüksek olduğu profil tipi baz alınmış olup diğer tüm profiller de aynı sayıda istasyon sayısına sahip olacak şekilde büküm tasarımı yapılmıştır. Buna göre; incelenecek olan tüm U-Profiller rollform hattı üzerinde 12 istasyon kullanarak bükülmekte ve nihai kesite ulaşılmaktadır. İstasyon sayılarının aynı olmasının sebebi, bu profil tipleri için incelenecek olan gerilme dağılımı, yüzde kalınlık değişimi gibi sonuçların profillerin geometrik farklılıklarından ne kadar etkileneceğini görmek, hangi geometrik değişimlerin yarattığı etkinin daha kritik olabileceğini anlamak olarak özetlenebilir. Şekil 3.31’den görülebileceği üzere büküm stratejisi ilk istasyonlarda yüzde gerilmeleri daha yüksek son istasyonlara yaklaştıkça bu değerler daha düşük olacak şekilde oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre; en yüksek yüzde gerilme değeri 80x70x1 profilinin ilk istasyonunda, en düşük yüzde gerilme değeri ise 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 profillerinin ilk istasyonunda ortaya çıktığı gözlemlenmiş ayrıca 40x70x1 – 60x70x1 – 80x70x1 arasındaki gerilme farkları incelendiğinde profilin yükseklik (flange) değeri arttıkça büküm hattı üzerindeki gerilme değerinin de doğru orantılı olarak arttığı ortaya çıkmıştır.

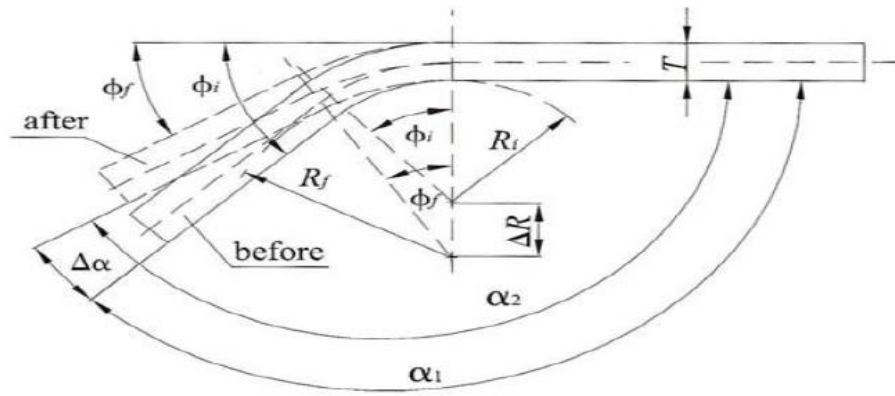


Şekil 3.31 : UBECO-PROFIL sonuçlarına göre tez kapsamında incelenecek olan U-Profillerin her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı (Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla U-Profil Tipleri : 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1)

3.4.3 UBECO-PROFIL geri yaylanma (springback) sonuçları

Her plastik deformasyonu elastik geri toparlanma takip eder. Bu durumun bir sonucu olarak, plastik deformasyon etkisi altındaki bir parçanın üzerindeki yükün kaldırılmasıyla parça üzerinde birtakım şekil ve boyut değişiklikleri meydana gelmektedir. Bu durum geri yaylanma etkisi olarak adlandırılmakta ve özellikle sac parçalara form verilen tüm operasyonlarda çeşitli parametrelere bağlı olarak daha az veya daha çok olarak gerçekleşmektedir [23].

Geri yaylanma değerleri sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilebileceği gibi analitik yöntemlerle de elde edilebilmektedir. Geri yaylanma değerleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda birçok farklı analitik metod ve formülasyon geliştirilmiştir. Bu formülasyonlardan biri ve geri yaylanmanın Şekil 3.32'deki şematik gösterimi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [23].



Şekil 3.32 : Geri yaylanmanın şematik gösterimi [23]

$$L_n = \left(R_i + \frac{T}{2}\right) \phi_i = \left(R_f + \frac{T}{2}\right) \phi_f \quad (3.11)$$

$$K = \frac{R_i + \frac{T}{2}}{R_f + \frac{T}{2}} = \frac{\frac{2R_i}{T} + 1}{\frac{2R_f}{T} + 1} = \frac{\phi_f}{\phi_i} = \frac{180 - \alpha_2}{180 - \alpha_1} \quad (3.12)$$

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left[\frac{R_i \sigma_{ys}}{ET} \right]^3 - 3 \left[\frac{R_i \sigma_{ys}}{ET} \right] + 1 \quad (3.13)$$

L_n : büküm hattının tarafsız eksen uzunluğu (mm)

R_i : büküm yarıçapı (mm)

R_f : yük kaldırıldıktan sonraki büküm yarıçapı (mm)

T : et kalınlığı (mm)

$\emptyset_i$: büküm açısı ($^\circ$)

$\emptyset_f$: geri yaylanma sonrası büküm açısı ($^\circ$)

K : geri yaylanma faktörü

α_1 : büküm açısını 180° 'ye tamamlayan açı ($^\circ$)

α_2 : geri yaylanma sonrası büküm açısını 180° 'ye tamamlayan açı ($^\circ$)

σ_{ys} : akma gerilmesi değeri (MPa)

E : elastisite modülü (GPa)

UBECO-PROFIL yazılımı kullanılarak bütün U-Profil tipleri ve bu tiplerin tüm istasyonları için geri yaylanma değerleri elde edilmiş ve bu değerler Çizelge 3.2'de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2 : Tüm U-Profil tipleri ve tüm istasyonlar için UBECO-PROFIL’den elde edilen geri yaylanma sonuçları

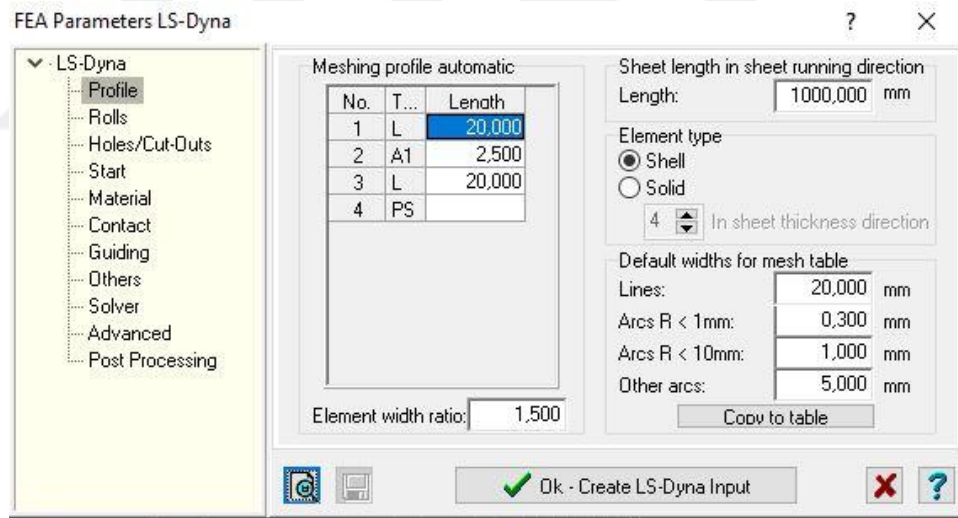
Tip	İstasyon Numarasına Göre Geri Yaylanma Değerleri (°)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
40x70x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
40x70x1.2	0,974°	1,081°	1,178°	1,276°	1,374°	1,472°	1,570°	1,657°	1,745°	1,789°	1,832°
40x70x1.5	0,771°	0,878°	0,976°	1,074°	1,172°	1,271°	1,370°	1,458°	1,546°	1,590°	1,634°
40x140x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
40x210x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
60x70x1	1,041°	1,149°	1,246°	1,343°	1,440°	1,538°	1,636°	1,724°	1,811°	1,855°	1,898°
80x70x1	1,041°	1,149°	1,246°	1,343°	1,440°	1,538°	1,636°	1,724°	1,811°	1,855°	1,898°

UBECO-PROFIL yazılımının verdiği geri yaylanma sonuçları incelendiğinde, kalınlık arttıkça geri yaylanma derecesinin azaldığı net bir biçimde gözlemlenmektedir. 40x70x1 ve 60x70x1 arasında bir gözlem yapılırsa profil yüksekliği artışının geri yaylanma derecesini bir miktar azalttığı fakat 60x70x1 ve 80x70x1 için geri yaylanma değerleri incelendiğinde bu azalış miktarının 60 mm’den 80 mm’ye geçişte görülmediği gözlemlenmiştir. 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 incelendiğinde profil genişliğinin geri yaylanma dereceleri üzerinde bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

3.5 Prosesin FEA Metodu Kullanılarak LS-DYNA İle Analizi

UBECO-PROFIL ve LS-DYNA programları birbiriyle ortak çalışabilen programlardır. LS-DYNA için gerekli olan bütün data ve sınır koşulları UBEKO-PROFIL programı içindeki 'FEA Parameters LS-DYNA' arayüzünden LS-DYNA'ya çıktı olarak aktarılmıştır.

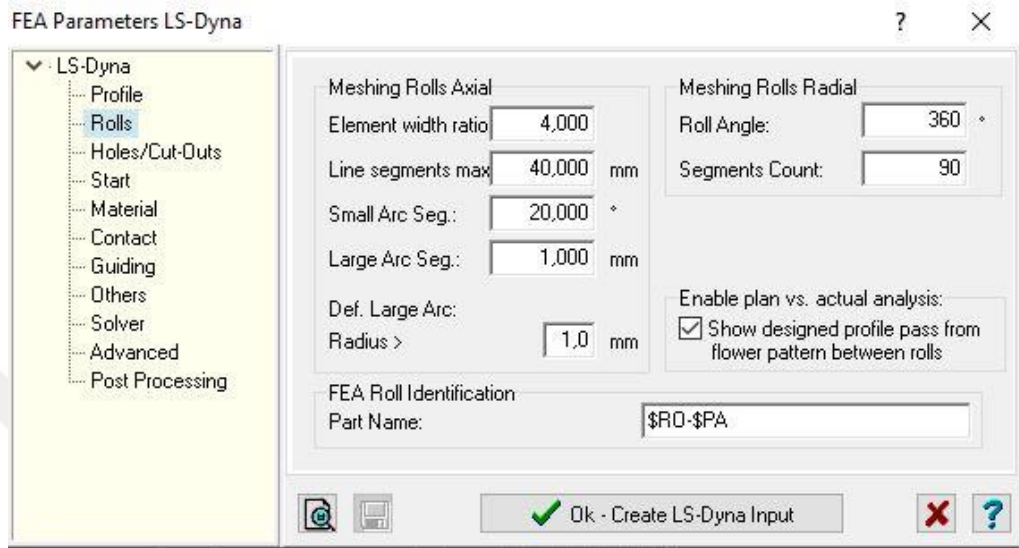
Buna göre, profilin mesh yapısı ile ilgili değerler; uzunluk için 20 mm, büküm hattı için 2.5 mm seçilmiştir. Sonlu elemanlarda kullanılan yöntemlerden biri de mesh elemanlarını komşu elemanlara göre belli bir oranda büyüterek çözüm süresini kısaltmayı amaçlamaktadır. Bu oran UBEKO-PROFIL programında element genişlik oranı olarak geçmekte olup yapılan analizlerde 1.5 olarak seçilmiştir. Kabuk model yada katı model tipi yapılan analizlerin çeşidine göre seçilmiş olup, hat yönündeki parçanın uzunluğu 1000 mm olarak seçilmiştir. Şekil 3.33'ten girilen bu değerler ve diğer değerler görülebilmektedir.



Şekil 3.33 : Profilin mesh yapısı için LS-DYNA girdileri

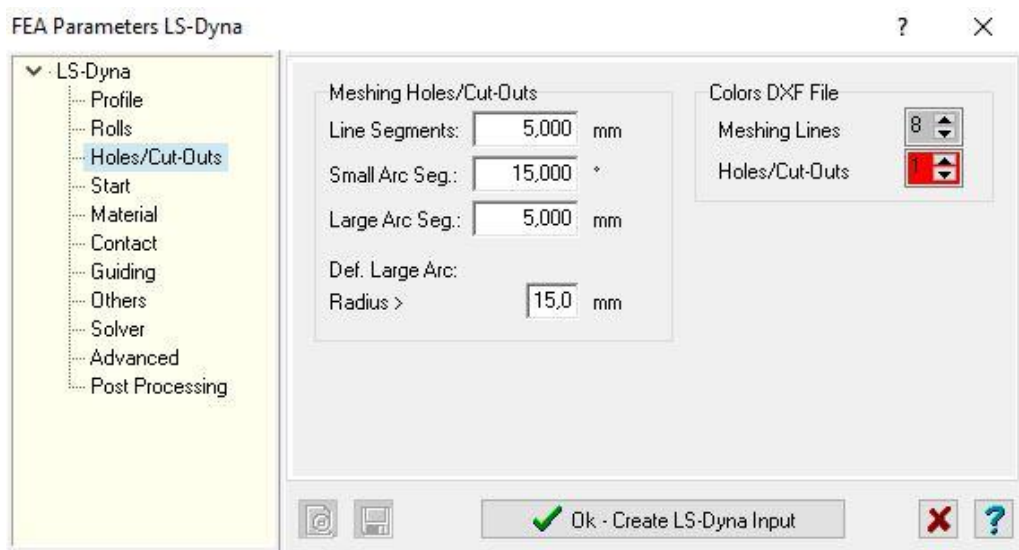
Profildeki mesh elemanlarının oluşturulmasının ardından makaralar için de mesh oluşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda; element genişlik oranı 4, max. uzunluk segmenti 40 mm, küçük büküm segmenti 20 mm, geniş büküm segmenti 1 mm olarak seçilmiştir. Çözümü hızlandırmak adına bazen makaralar 360° olarak seçilmeyebilmektedir. Ancak yapılan bu tez çalışması kapsamında makaralar 360° olarak modellenmiştir. Geniş ve küçük büküm segmenti arasındaki limit 1 olarak

seçilmiş ve dizayn edilen modelin kesitini LS-Prepost analiz ekranında gösterebilen kısım aktif edilmiştir. Şekil 3.34'ten girilen bu değerler ve diğer değerler görülebilmektedir.



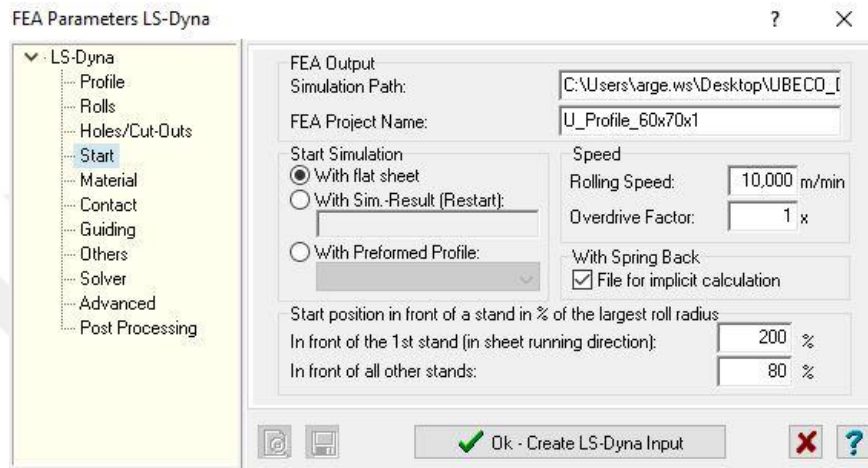
Şekil 3.34 : Makaraların mesh yapısı için LS-DYNA girdileri

Delik ve boşaltmalar için standart mesh değerleri girilmiştir. Çünkü analiz edilen profillerde delik ve boşaltmalar bulunmamaktadır. Bu değerler Şekil 3.35'den görülebilmektedir.



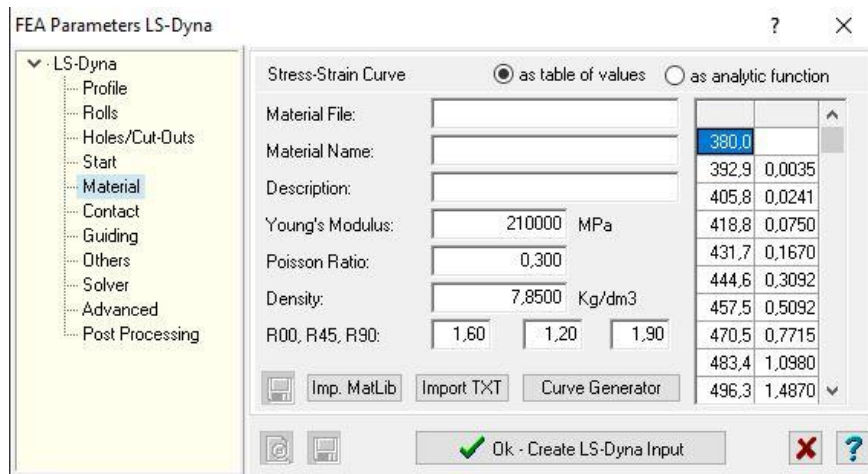
Şekil 3.35 : Delik ve boşaltmaların mesh yapısı için LS-DYNA girdileri

Bir diğer FEA parametresi 'Start' bölümüdür. Bu bölümde; simülasyonun düz sac ile başlayacağı, hat hızının 10 m/dk olacağı, ilk istasyon ve diğer istasyon simülasyonlarının en büyük makara çapının yüzde kaç kadarlık bir mesafeden başlayacağı seçilmiştir. Bu standart değerler, ilk istasyon için % 200, diğer tüm istasyonlar için %80 olarak belirlenmiştir. Girilen tüm değerler Şekil 3.36'dan görülebilmektedir.



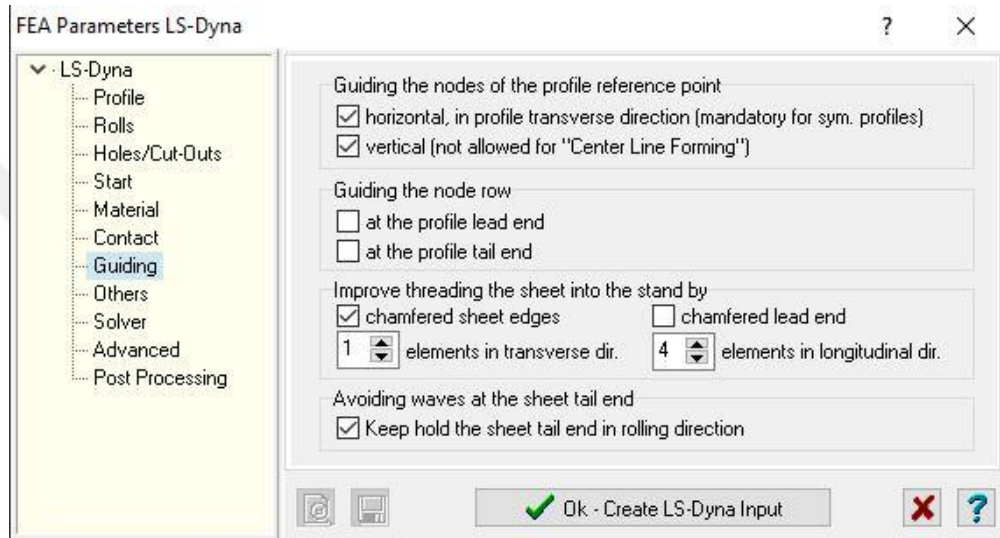
Şekil 3.36 : LS-DYNA için başlangıç parametreleri

LS-DYNA için verilmesi gereken bir diğer parametre de Şekil 3.37'de verilen malzeme parametresidir. Buna göre; UBECO-PROFIL kütüphanesinde tanımlı olan St14 çeliği için hazır olan tablo değerleri burada kullanılmıştır.



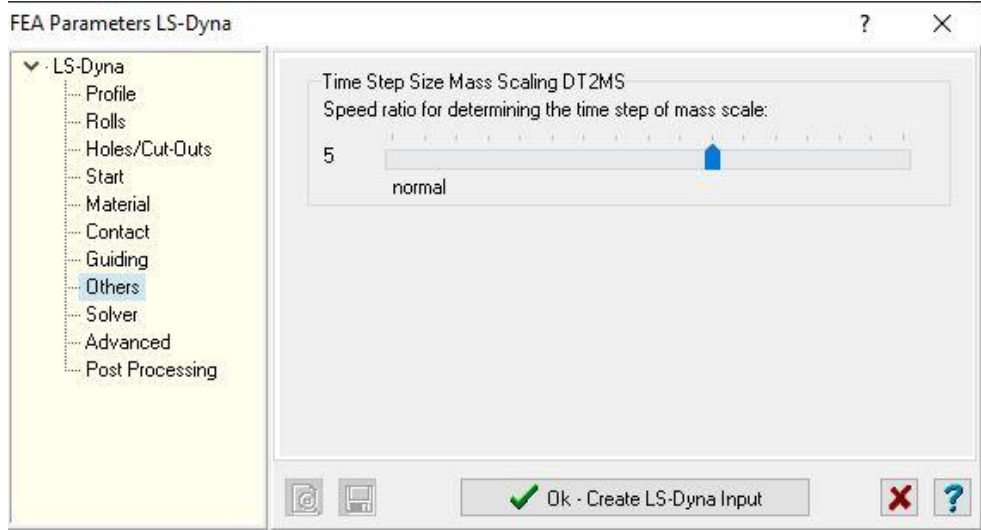
Şekil 3.37 : LS-DYNA malzeme parametreleri

LS-DYNA'ya çıktı olarak verilmesi gereken bir diğer parametre de kılavuzlama parametresidir. Bu parametre kapsamında; sacın yatay ve dikey yönde hareketi kısıtlanmış, sacın ucuna başlangıçta sacın makaraya girişini kolaylaştırmak için pah kırılmıştır. Kırılan pahın boyutları, yatayda 1 boyda 4 elementi kapsayacak şekilde seçilmiştir. Sac yan duvarlarının ucundaki dalgalanmanın analizde herhangi bir sonuca negatif etki etmemesi için bu dalgalanmalar durdurulmuştur. Girilen parametre değerleri Şekil 3.38'den görülebilmektedir.



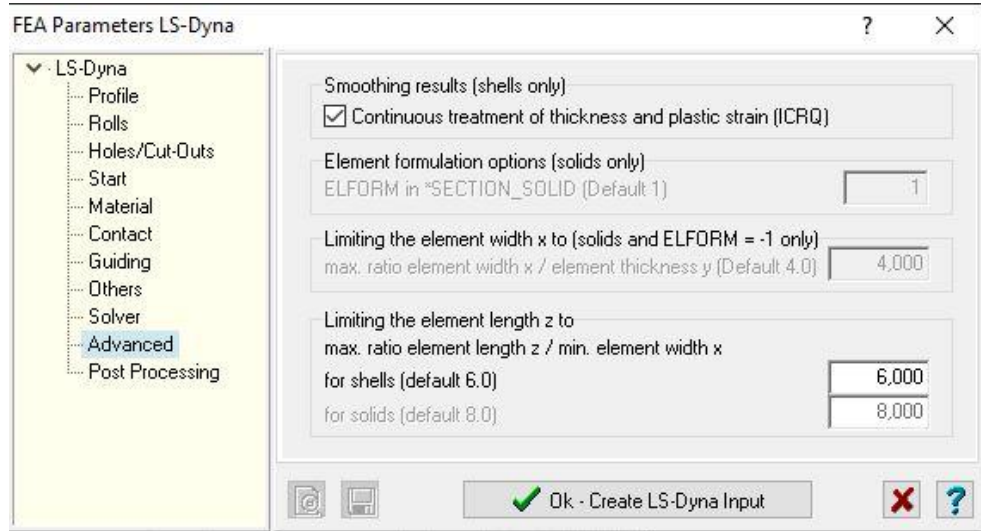
Şekil 3.38 : LS-DYNA kılavuzlama parametreleri

Değer girilmesi gereken bir diğer parametre de 'Diğer' sekmesi altın bulunan ve kütle ölçeğinin zaman adımını hesaplamak için kullanılan hız oranıdır. Bu kısımda seçilen değere göre analizin hızı oldukça değişebilmektedir. Tez çalışması için bu kısımdaki değer normal kategoriye giren '5' değeri seçilmesi uygun görülmüş ve analiz sonuçları bu değere göre elde edilmiştir. Girilen parametre değerleri Şekil 3.39'dan görülebilmektedir.



Şekil 3.39 : LS-DYNA hız oranı parametresi

Son olarak girilmesi gereken parametre de gelişmiş sekmesi altındaki parametredir. Bu kısımda, kabul elemanlar için iyileştirilmiş sonuç kısmı aktif edilmiş ve standard olarak kabuk elemanlar için z yönündeki element uzunluk faktörü 6, solid elemanlar için 8 olarak seçilmiştir. Seçilen bu değerler Şekil 3.40'dan görülebilmektedir.

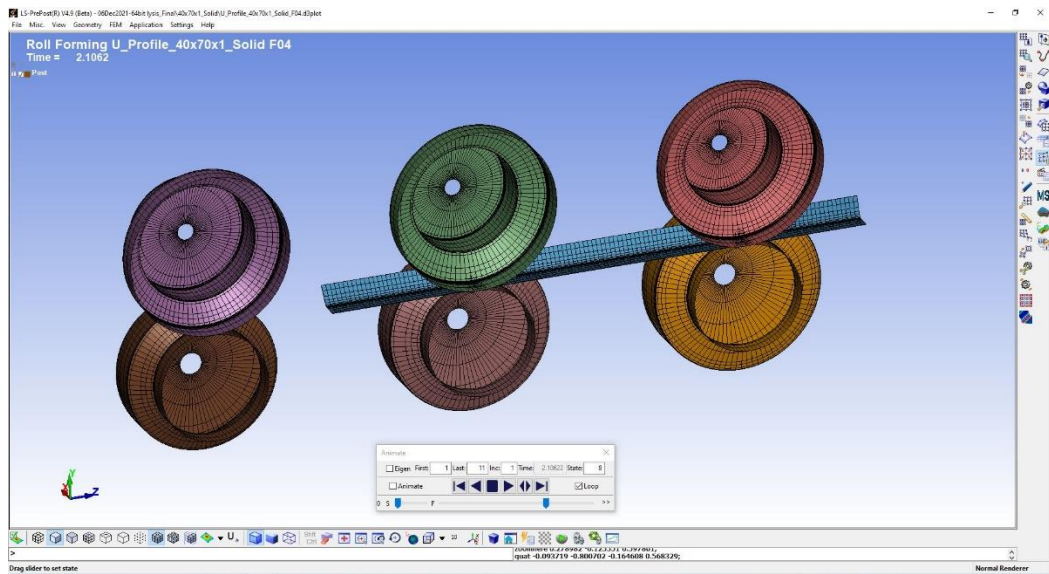


Şekil 3.40 : LS-DYNA için gelişmiş parametre girdileri

Ayarlanan tüm parametreler bütün profil tipleri için uygulanmıştır. Bunun sonucunda; kabuk modeldeki profiller için 1764 adet düğüm ve 1625 adet element, katı modeldeki profiller için 5292 adet düğüm ve 3250 adet element oluşturulmuştur. Bir istasyon (alt ve üst makara) ve profilden oluşan kabuk model için yaklaşık olarak 7344 adet düğüm ve 7025 adet element oluşturulmuş olup, katı model için yaklaşık olarak 10422 adet düğüm ve 8200 adet element oluşturulmuştur. Modellerin hepsinin simülasyonu yarı model kullanılarak yapılmış olup tam model kullanımında bu değerlerin en az iki katı düğüm ve element sayısı elde edilecektir.

3.5.1 Von-Misses kriterine göre gerilme analizi

Dizaynı ve proses tasarımı yapılan bütün U-Profiller için çeşitli değişken parametrelerin gerilme üzerinde yarattığı etkiyi incelemek adına FEA metodu kullanılarak LS-DYNA programında Şekil 3.41'den görülebileceği üzere Von-Misses kriterine göre gerilme analizi yapılmıştır. Geometrik değişikliklerin gerilme üzerinde yarattığı etkiyi görebilmek adına yarı model olarak modellenen sac profilin orta düzleminden geçecek şekilde orta eksenden yan duvarların ucuna kadar uzanan bir yol boyunca uzanan elementlerin ortalama kuvvet değerleri göz önüne alınmıştır. Bu kapsamda; U-Profillerin yükseklik, kalınlık ve en değişimlerinin parça üzerindeki gerilmeyi nasıl etkilediği incelenmeye çalışılmıştır. Kalınlıktaki etkiyi görebilmek için katı model, en ve yükseklikteki etkiyi görebilmek için ise kabuk model kullanılmıştır. Her bir profil için bazı grafikler bu bölümde, birbirine göre dağılım grafikleri ise bulgular ve tartışma bölümünde verilecektir.

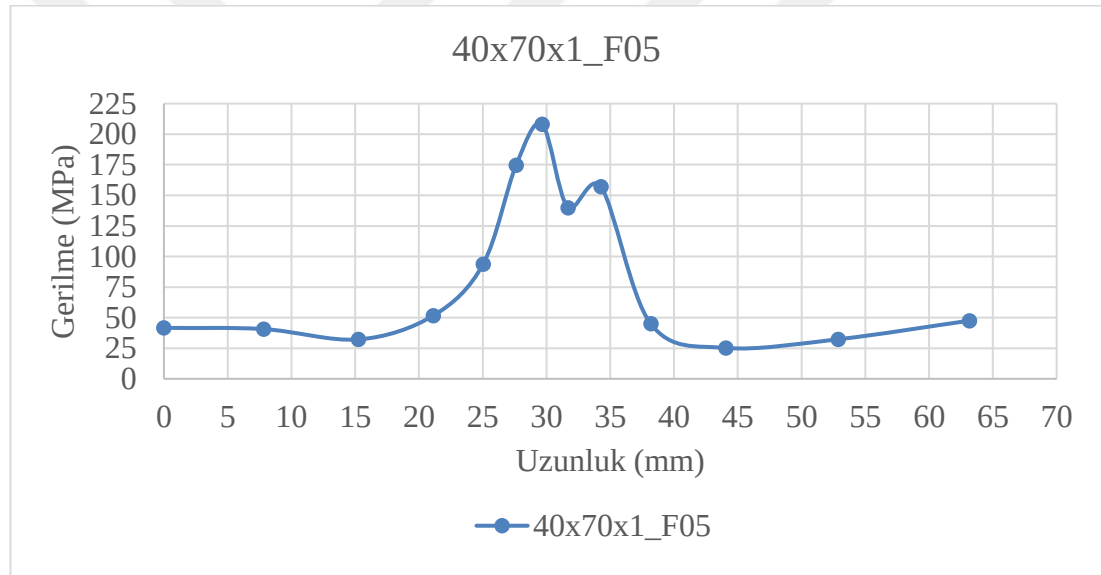


Şekil 3.41 : 40x70x1 katı modelin 4. istasyon analizi

3.5.1.1 Kalınlıkları farklı profiller için istasyon bazında gerilme dağılımı

Tasarlanan ve kalınlıkları birbirinden farklı 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 U-Profiller için LS-DYNA programından elde edilen sonuçlar ve grafikler bu bölümde paylaşılacaktır. Kalınlık etkisini görebilmek adına burada kullanılan modeller katı model olarak tasarlanmıştır. Ls-Dyna'nın kullanıcı arayüzü olan LS-Prepost'ta sac parça iki makaranın arasındayken orta düzlem seçilmiş ve bu düzlem üzerindeki elementler seçilerek gerilmenin parçanın orta ekseninden yan duvarların ucuna kadar uzanan şekilde nasıl değiştiği üzerinde durulmuştur.

Buna göre 40x70x1 tip U-Profil'in 5. istasyonunda parça üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 3.42 üzerinden gözlemlenebilir.

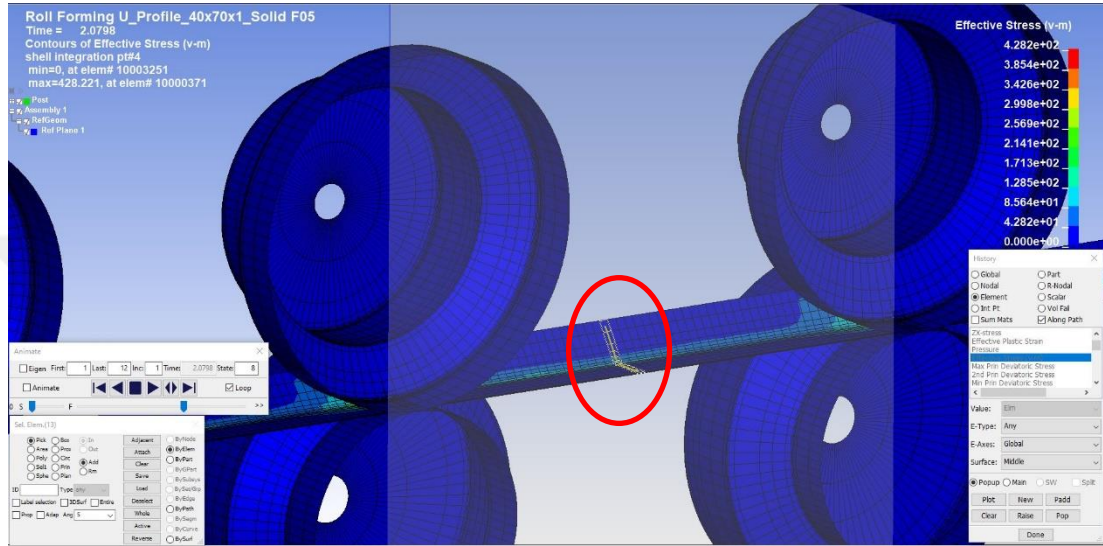


Şekil 3.42 : 40x70x1 katı modelin 5. istasyonu için gerilme - uzunluk grafiği

Şekil 3.42'deki grafikte sol taraf profilin simetri eksenine göre orta tarafa yakın olan elementi, tepe noktası profilin büküm hattı üzerindeki elementi, sağ taraf ise yan duvarın uç noktasına yakın taraftaki elementi göstermektedir. Beklendiği üzere profilin en yüksek gerilme değeri 213 MPa ile büküm hattı üzerindeki elementte meydana gelmiştir. 213 MPa'lık bu değer bizlere akma gerilmesi 210 MPa olan St14 malzemenin akma sınırının geçildiği ve plastik deformasyon oluştuğunu göstermektedir. 5. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerin hepsi

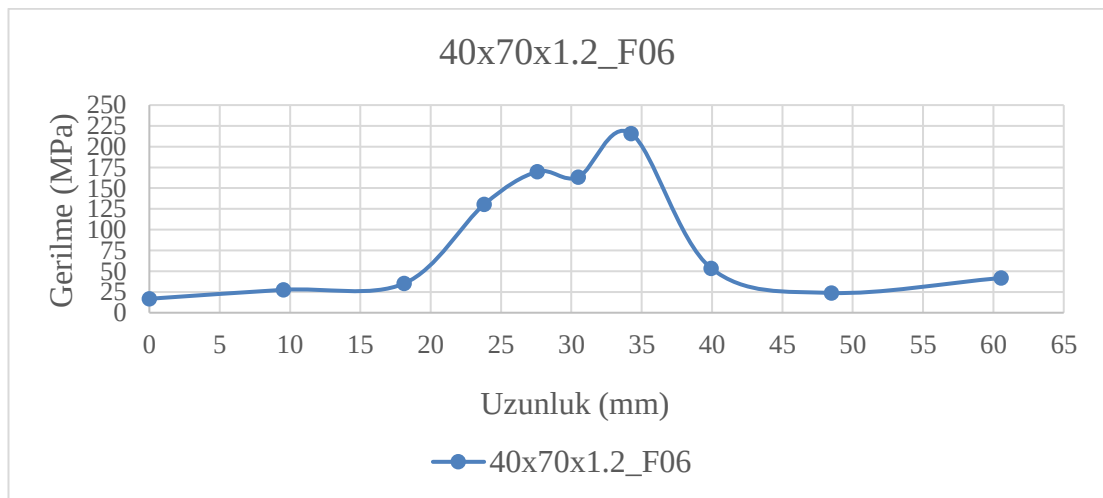
tez kapsamında çok fazla sayıda olmalarından dolayı ayrı ayrı paylaşılmayacak bunun yerine bulgular ve tartışma kısmında bu grafiklerin ortalamaları alınıp istasyon bazında dağılım grafikleri oluşturulacaktır.

40x70x1 tip U-Profilin mesh yapısı üzerindeki elementlerin nasıl seçildiği Şekil 3.43 üzerinden gözlemlenebilir.



Şekil 3.43 : 40x70x1 katı modelin 5. istasyonu için seçilen elementler

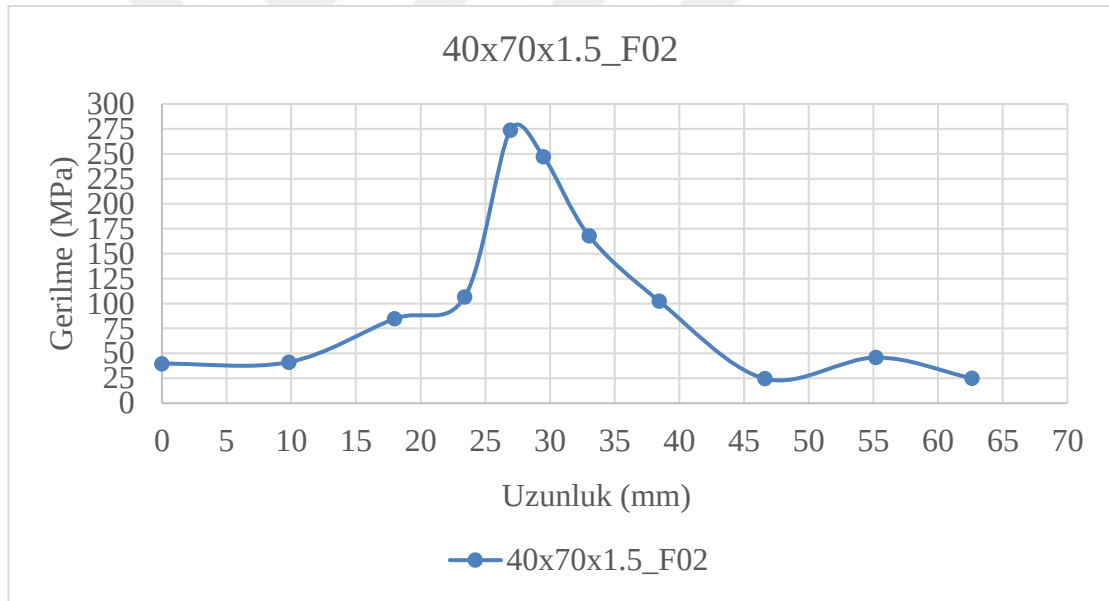
40x70x1.2 tip U-Profil'in 6. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.44'te verilmiştir.



Şekil 3.44 : 40x70x1.2 katı modelin 6. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği

Bir önceki grafik ile aynı şekilde bu grafikte de en yüksek gerilme değeri büküm hattında 220 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır. Büküm hattı için yine plastic deformasyon durumu söz konusudur. Büküm hatlarının aslında anlık olarak en yüksek gerilmeye maruz kaldığı ve dolayısıyla asıl plastik deformasyona uğradığı durum makaraların üzerinden geçtiği durumdur. Bizim incelediğimiz grafiklerdeki durum ise sac'ın çoğunlukla hat boyunca maruz kaldığı stabil gerilme durumudur. 6. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir. Element seçimi, 40x70x1.2 tip U-Profil için yaptığımız bu analizde de Şekil 3.43'teki gibi profil simetri ekseninden başlayıp yan duvarlara uzanacak şekilde yapılmıştır.

40x70x1.5 tip U-Profil'in 2. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.45 : 40x70x1.5 katı modelin 2. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği

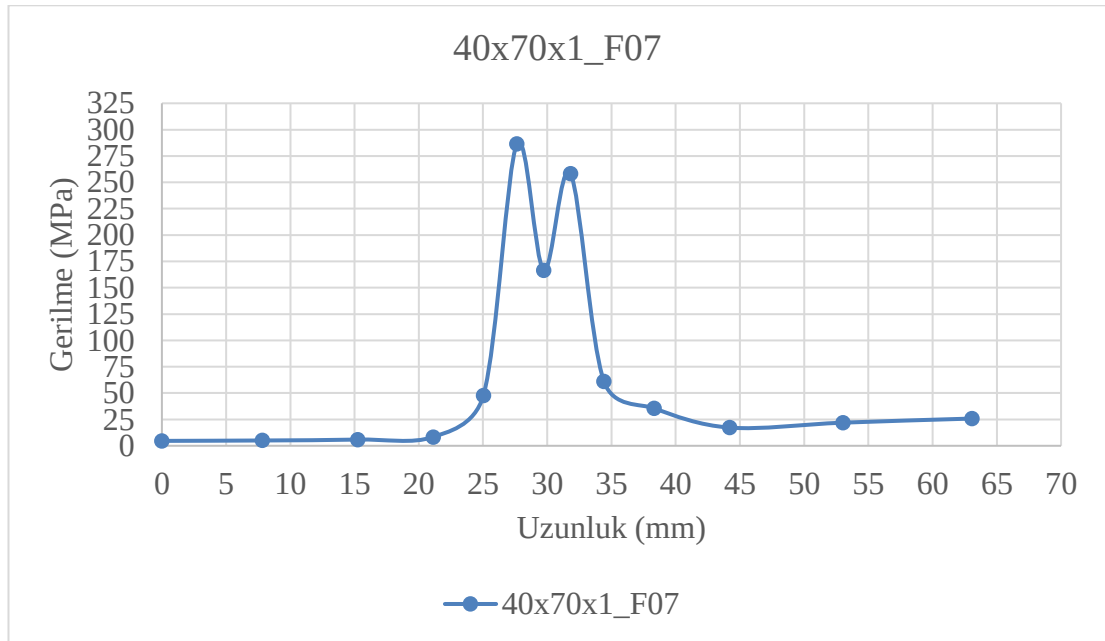
40x70x1.5 tip U-Profilin 2. İstasyonu için yapılan gerilme – uzunluk grafiğinde diğer grafiklerle benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre; tepe noktası büküm hattını göstermekte ve yaklaşık olarak 281 MPa değerine ulaşmaktadır. Element hattı uzunluğu yaklaşık olarak 63 mm'dir. 2. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer sonuçlar yakalanmıştır.

Element seçimi, 40x70x1.5 tip U-Profil için yaptığımız bu analizde de Şekil 3.43'teki gibi profil simetri ekseninden başlayıp yan duvarlara uzanacak şekilde yapılmıştır.

3.5.1.2 Genişlikleri farklı profiller için istasyon bazında gerilme dağılımı

Tez kapsamında genişlikleri farklı U-Profiller dizayn edilmiştir. Bu profiller sırasıyla; 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 ölçülerine sahip profillerdir. U-Profillerin yabancı literatürde 'web' diye tabir edilen taban genişlikleri bu tez çalışmasında 70 mm, 140 mm ve 210 mm olarak tasarlanmış ve bu değişken değişirken kalınlık ve yükseklik gibi diğer tüm değişkenler sabit tutulmuştur. LS-DYNA analizleri kabuk model kullanılarak oluşturulmuştur. LS-DYNA'nın kullanıcı arayüzü olan LS-Prepost'ta sac parça iki makaranın arasındayken orta düzlem seçilmiş ve bu düzlem üzerindeki elementler seçilerek gerilmenin parçanın orta ekseninden yan duvarların ucuna kadar uzanan şekilde nasıl değiştiği üzerinde durulmuştur. Kalınlıkları aynı profillerdeki element seçiminin aksine genişlikleri farklı olan profiller için seçilen element sayıları birbirinden farklı olmaktadır. Bu durum, genişlik farkı yaratan kısmın taban olmasından dolayı ortalama kuvvet değerlerinde olağan dışı bir farklılığa sebep olmamaktadır. Bu yüzden boydan boya element seçimi yapılmasında ve element sayılarının birbirinden farklı olmasında herhangi bir sakınca görülmemiştir.

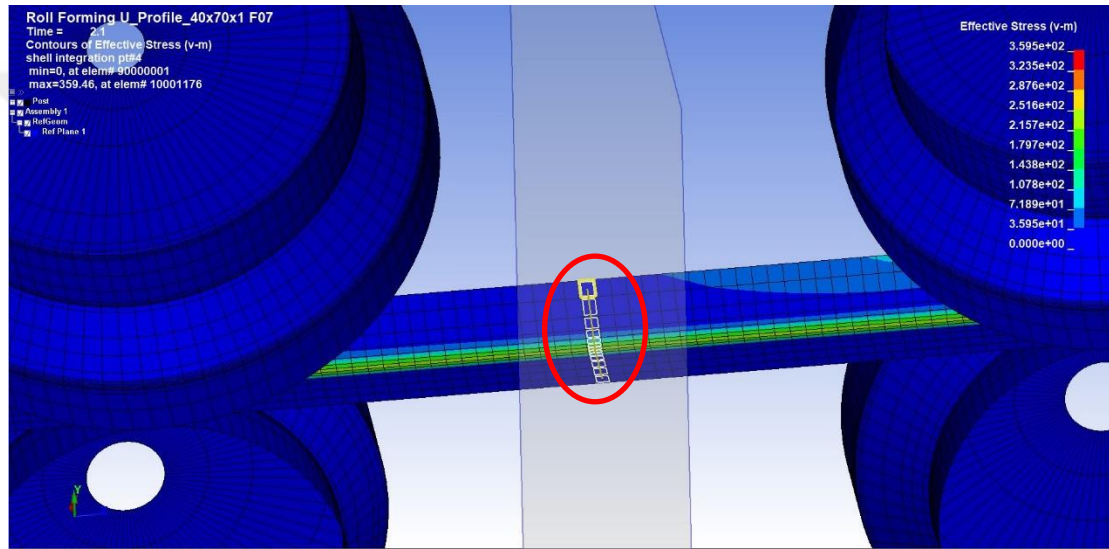
Buna göre 40x70x1 U-Profil'in 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.46'daki şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.46 : 40x70x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği

Grafikten de görülebileceği üzere taban kısmından büküm hattına kadar yükselen ve en yüksek gerilme değerine 289 MPa ile büküm hattı üzerinde ulaşan gerilme – uzunluk değerleri elde edilmiştir. Grafik tepe noktasından sonra düşüşe geçmiş ve profilin yan duvarları üzerinde ilerledikçe uç noktalara doğru bir miktar daha artış göstermiştir. 7. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

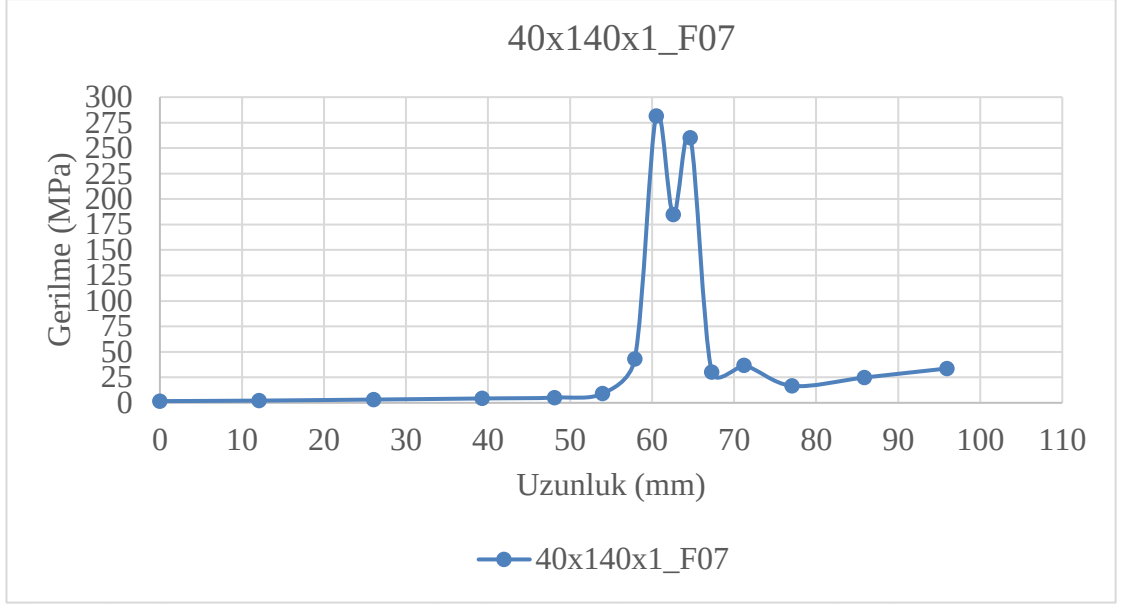
40x70x1 tip U-Profilin mesh yapısı üzerindeki elementlerin nasıl seçildiği Şekil 3.47 üzerinden gözlemlenebilir.



Şekil 3.47 : 40x70x1 kabuk modelin 7. istasyonu için seçilen elementler

40x70x1 tip U-Profilin 7. istasyonunda kullanılan bu element seçim yöntemi de diğer tüm profil tipleri ve istasyonları için uygulanmıştır.

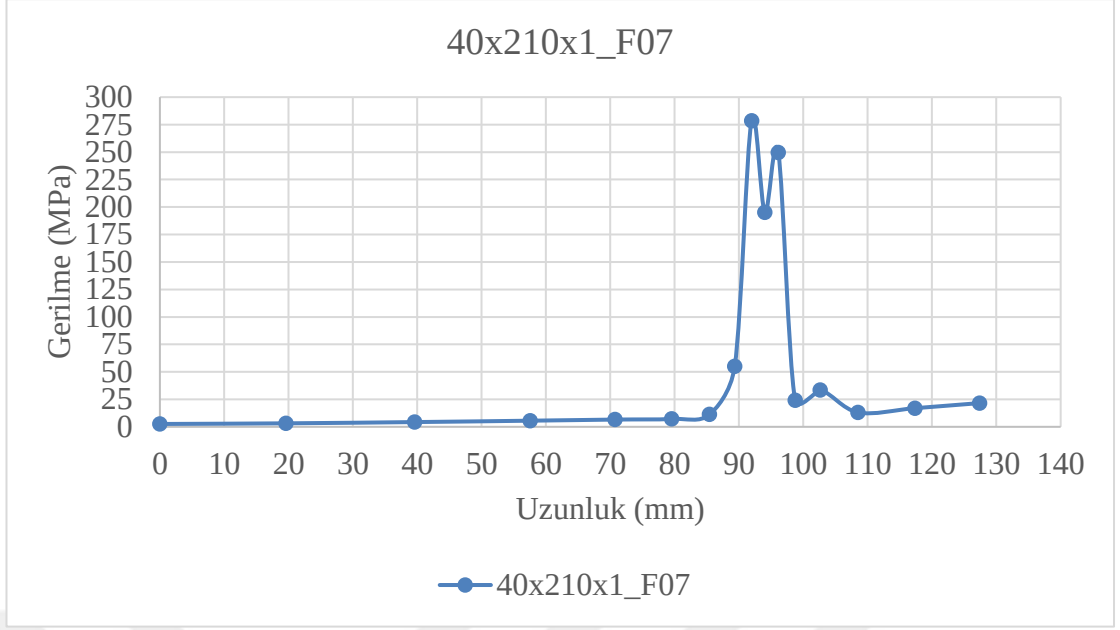
40x140x1 tip U-Profil'in 7. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.48'te verilmiştir.



Şekil 3.48 : 40x140x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği

40x140x1 tip U-Profil'in grafiği incelendiğinde gerilmenin diğer grafiklerde olduğu gibi büküm hattında maksimum noktaya ulaştığı ve 285 MPa gibi bir değer aldığı görülmektedir. Daha sonrasında gerilme değeri azalmakta fakat yan duvarlarda taban kısmındaki seviyeye düşmemekte ve bu seviyenin üzerinde kalarak yan duvarların uç kısımlarına doğru bir miktar yükselmektedir. 40x70x1 tip U-Profilin grafiği ile karşılaştırıldığında 40x140x1 tip U-Profilin maksimum değere ulaşp sonra düşüşe geçtiği uzunluk bandının daha dar olduğu gözlemlenmekte ve bu etkinin ortalama kuvvet değerlerini düşüreceği grafikten öngörülebilmektedir. 7. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

40x210x1 tip U-Profil'in 7. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.49'da verilmiştir.



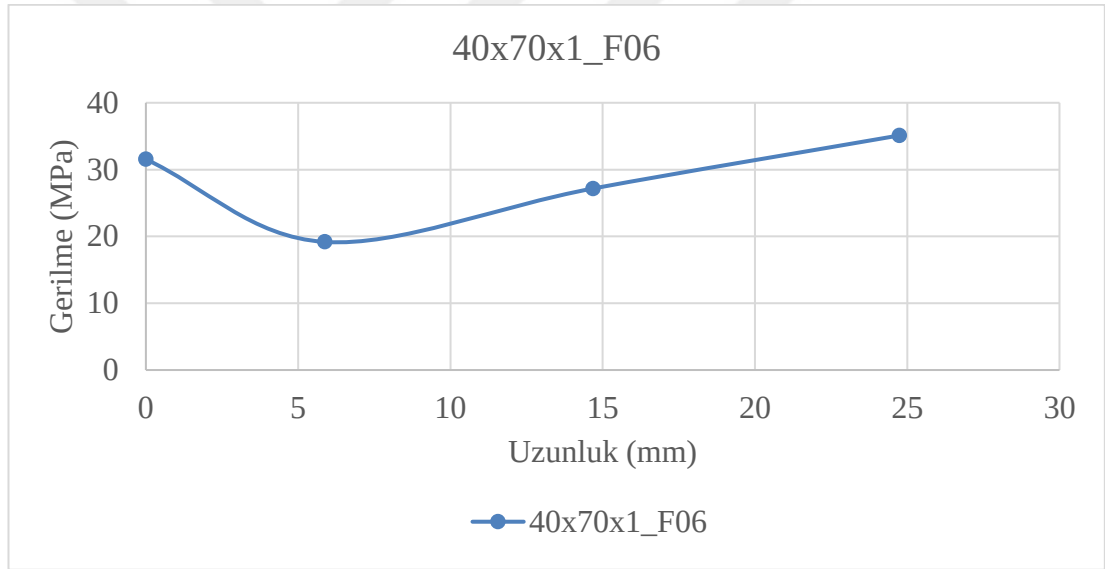
Şekil 3.49 : 40x210x1 kabuk modelin 7. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği

40x210x1 tip U-Profil'in grafiği incelendiğinde gerilmenin diğer grafiklerde olduğu gibi büküm hattında maksimum noktaya ulaştığı ve 280 MPa gibi bir değer aldığı görülmektedir. Daha sonrasında gerilme değeri azalmakta fakat yan duvarlarda taban kısmındaki seviyeye düşmemekte ve bu seviyenin üzerinde kalarak yan duvarların uç kısımlarına doğru bir miktar yükselmektedir. 40x210x1 tip U-Profilin grafiği diğer grafikler ile karşılaştırıldığında 40x140x1 ve 40x70x1 tip U-Profillerin maksimum değerlerinden bir miktar daha düşük bir maksimum değere ulaştığı gözlemlenebilir. Bu durumun ortalama kuvvetler üzerinde bir miktar etkiye sahip olacağı öngörülebilir. 7. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

3.5.1.3 Yükseklikleri farklı profiller için istasyon bazında gerilme dağılımı

Tez kapsamında yükseklikleri farklı U-Profiller dizayn edilmiştir. Bu profiller sırasıyla; 40x70x1, 60x70x1 ve 80x70x1 ölçülerine sahip profillerdir. U-Profillerin yabancı literatürde 'flange' diye tabir edilen yan duvar yükseklikleri bu tez çalışmasında 40 mm, 60 mm ve 80 mm olarak tasarlanmış ve bu değişken değişirken kalınlık, genişlik ve malzeme gibi diğer tüm değişkenler sabit tutulmuştur. LS-DYNA analizleri kabuk model kullanılarak oluşturulmuştur. LS-DYNA'nın kullanıcı arayüzü olan LS-Prepost'ta yükseklik etkisini görebilmek için büküm hattının bittiği noktadan

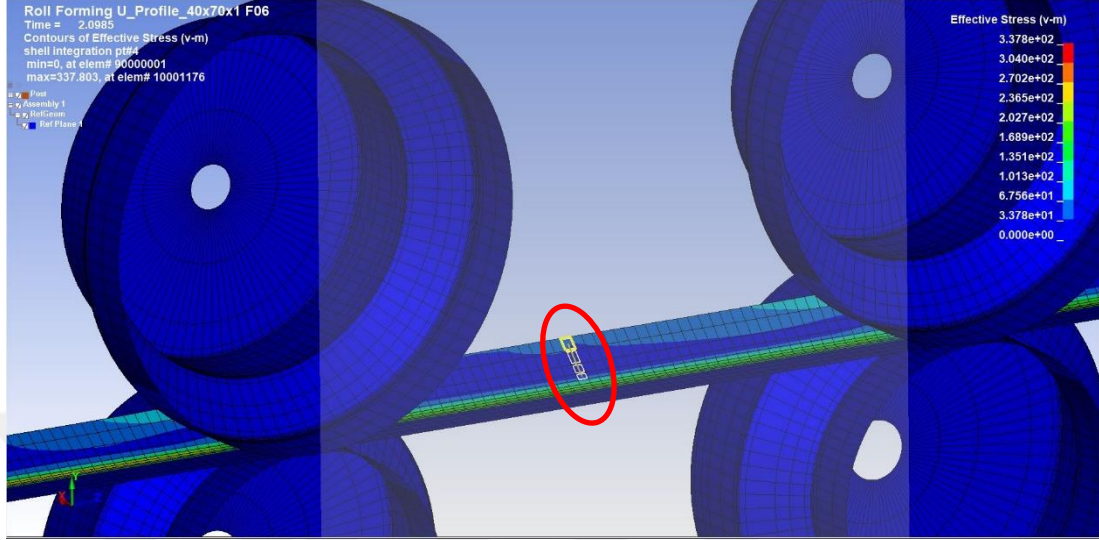
yan duvarların uç kısımlarına kadar olan elementler seçilmiştir. Bu seçimin sebebi, biribiri ile karşılaştırılacak U-Profil tiplerinin yükseklikleri ve dolayısıyla element sayılarının birbirinden farklı olmasıdır. Yan duvarlar makaraların doğrudan büküm uyguladığı bölge olmasından dolayı daha fazla gerilme etkisi altında kalmakta ve bu bölgedeki gerilim dalgalanması örneğin taban bölgesine göre çok daha fazla olmaktadır. Eğer bütün profiller için profil simetri eksenine göre orta noktadan yan duvarlara uzanan bir element seçimi uygulanırsa bu durum ortalama kuvvet değerlerinin element sayısı ile bağlantılı (element sayısı arttıkça) olduğundan daha düşük gözükmesine ve dolayısıyla yanlış sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Buna göre 40x70x1 U-Profil'in 6. istasyonu için gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.50'deki şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.50 : 40x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği

Yalnızca yan duvar etkisinin gözlemlenmeye çalışıldığı Şekil 3.50'deki grafik incelendiğinde bu grafiğin diğer grafiklerin son kısmı ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Büküm hattı sonrasındaki düşüş etkisi grafiğin sol kısmında görülebilirken bu düşüşü yan duvarın uç kısmına doğru bir artış takip etmekte ve gerilme maksimum noktada 35 MPa değerine ulaşmaktadır. 6. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

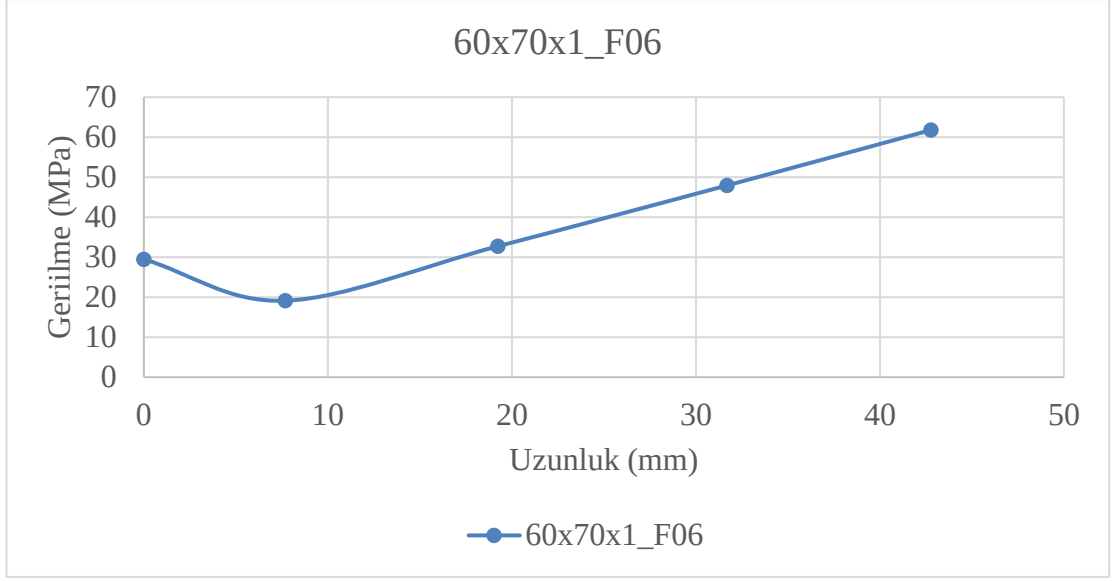
40x70x1 tip U-Profilin mesh yapısı üzerindeki elementlerin yan duvar yüksekliği etkisini incelemek amacıyla nasıl seçildiği Şekil 3.51 üzerinden gözlemlenebilir.



Şekil 3.51 : 40x70x1 kabuk modelin 6. istasyonunda yan duvar yüksekliği etkisini incelemek için seçilen elementler

40x70x1 tip U-Profilin 6. istasyonunda kullanılan bu element seçim yöntemi diğer tüm profil tipleri ve istasyonları için uygulanmıştır.

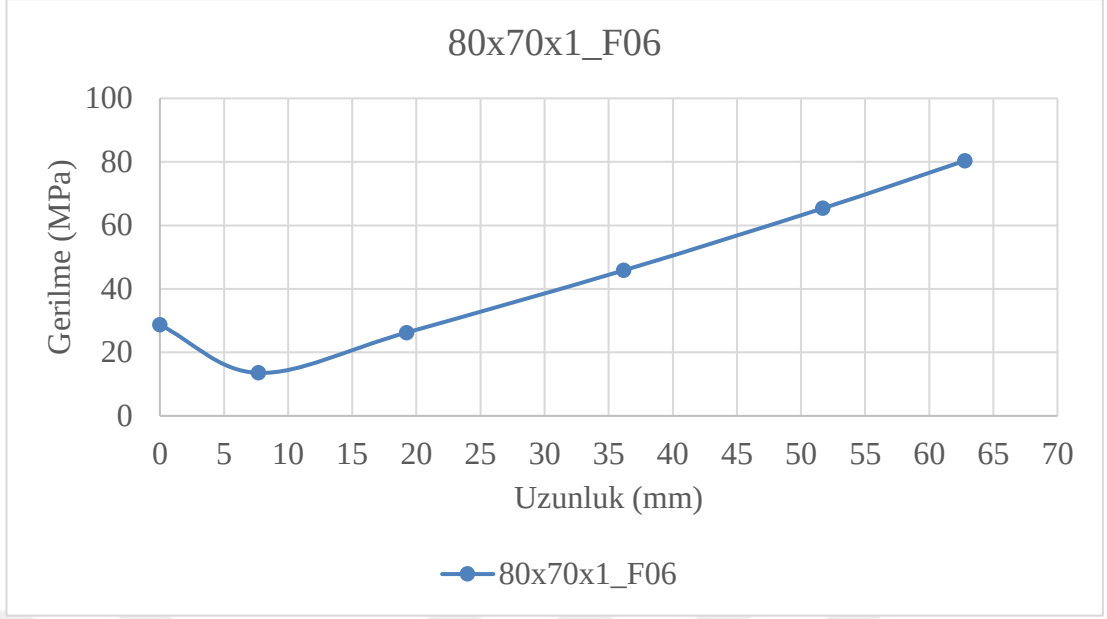
60x70x1 tip U-Profil'in 6. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.52'de verilmiştir.



Şekil 3.52 : 60x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği

Yalnızca yan duvar etkisinin gözlemlenmeye çalışıldığı Şekil 3.52'deki grafik incelendiğinde bu grafiğin diğer grafiklerin son kısmı ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Büküm hattı sonrasındaki düşüş etkisi grafiğin sol kısmında görülebilmekte bu düşüşü yan duvarın uç kısmına doğru bir artış takip etmekte ve gerilme maksimum noktada 62 MPa değerine ulaşmaktadır. 40x70x1 tip U-Profil ile karşılaştırıldığında grafiğin sol tarafındaki gerilme değeri ve düşüş Şekil 3.50 ile benzerlik göstermektedir. Ancak maksimum değerlere bakıldığında 60x70x1 tip U-Profilin yan duvar ucundaki maksimum gerilme değerinin 40x70x1'in yan duvarın uç noktasındaki maksimum değerden oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 6. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

80x70x1 tip U-Profil'in 6. istasyonuna ait bir gerilme – uzunluk grafiği Şekil 3.53'de verilmiştir.



Şekil 3.53 : 80x70x1 kabuk modelin 6. istasyonu için yan duvar gerilme – uzunluk grafiği

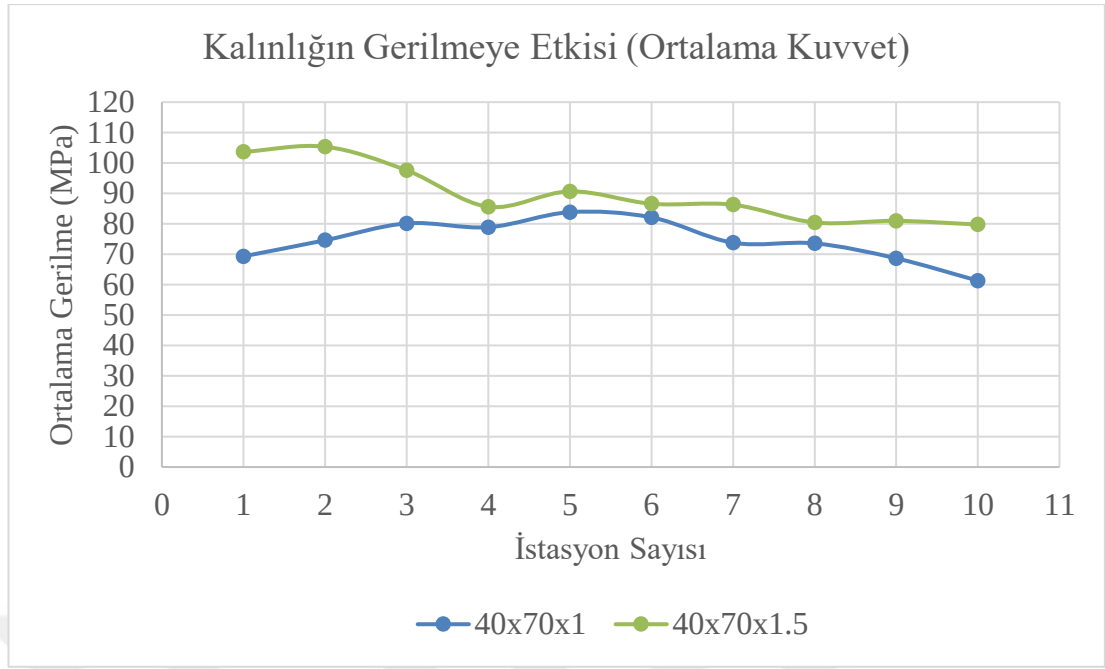
Yalnızca yan duvar etkisinin gözlemlenmeye çalışıldığı Şekil 3.53'deki grafik incelendiğinde bu grafiğin diğer grafiklerin son kısmı ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Büküm hattı sonrasındaki düşüş etkisi grafiğin sol kısmında görülebilirken bu düşüşü yan duvarın uç kısmına doğru bir artış takip etmekte ve gerilme maksimum noktada 80 MPa değerine ulaşmaktadır. 40x70x1 ve 60x70x1 tip U-Profiller ile karşılaştırıldığında grafiğin sol tarafındaki gerilme değeri ve düşüş Şekil 3.50 ve Şekil 3.52 ile benzerlik göstermektedir. Ancak maksimum değerlere bakıldığında 80x70x1 tip U-Profilin yan duvar ucundaki maksimum gerilme değerinin 40x70x1 ve 60x70x1'in yan duvarın uç noktasındaki maksimum değerden oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 6. istasyon için elde edilen bu grafik diğer tüm istasyonlar için de elde edilmiş ve hepsinde bu grafiğe benzer grafikler elde edilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 LS-DYNA Analiz Sonuçları

LS-DYNA analiz programında yapılacak olan FEA incelemesi için shell ve solid olarak 2 farklı model kullanıldığından, toplamda 10 adet analiz dosyası oluşturulmuştur. Bu analiz dosyalarından 3 adeti solid model için oluşturulmuş olup, bunlar sırasıyla; 40x70x1 (Solid) – 40x70x1.2 (Solid) – 40x70x1.5 (Solid) olarak sıralanmaktadır. Bu dosyalar dışında 7 adet daha dosya shell model için oluşturulmuş olup, bunlar sırasıyla; 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1 olarak tayin edilmiştir. Oluşturulan bu analiz dosyaları ile yükseklik, kalınlık ve genişlik gibi faktörlerin parça üzerindeki bir bandın gerilme dağılımını nasıl etkilediği incelenmiş ve sonuçlar dağılım grafikleriyle elde edilmiştir. Grafikler çizilirken ‘Von-Misses kriterine göre gerilme analizi’ bölümünde anlatıldığı gibi element seçimleri yapılarak her istasyon için seçilen gerilme bandındaki elementlerin kuvvet değerleri çıkarılmış ve sonrasında da bu değerlerin ortalamaları alınarak her istasyon için ortalama kuvvet değerleri çıkarılarak tüm U-Profil tiplerinin dağılım grafiği çizdirilmiştir.

Buna göre, 40x70x1 ve 40x70x1.5 tip U-Profillerin solid modellerinin arasında yapılan incelemede elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı dağılım grafiği Şekil 4.1’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.1 : 40x70x1 ve 40x70x1.5 katı modellerin ortalama gerilme-istasyon sayısı grafiği

40x70x1 ve 40x70x1.5 katı modellerinin ortalama gerilme – istasyon sayısı grafiği incelendiğinde 40x70x1.5 tip U-Profilin ortalama gerilme değerleri beklendiği gibi 40x70x1 tip U-Profilinden daha yüksek çıkmaktadır. Başlangıçtaki (istasyon no:10) ortalama gerilme farkı daha az iken parçanın hattan çıkacağı son istasyona (istasyon no:1) doğru aradaki fark gittikçe açılmaktadır. Hattın ortalarındaki ortalama gerilme değerleri ise birbirine daha yakın değerler olarak elde edilmiştir.

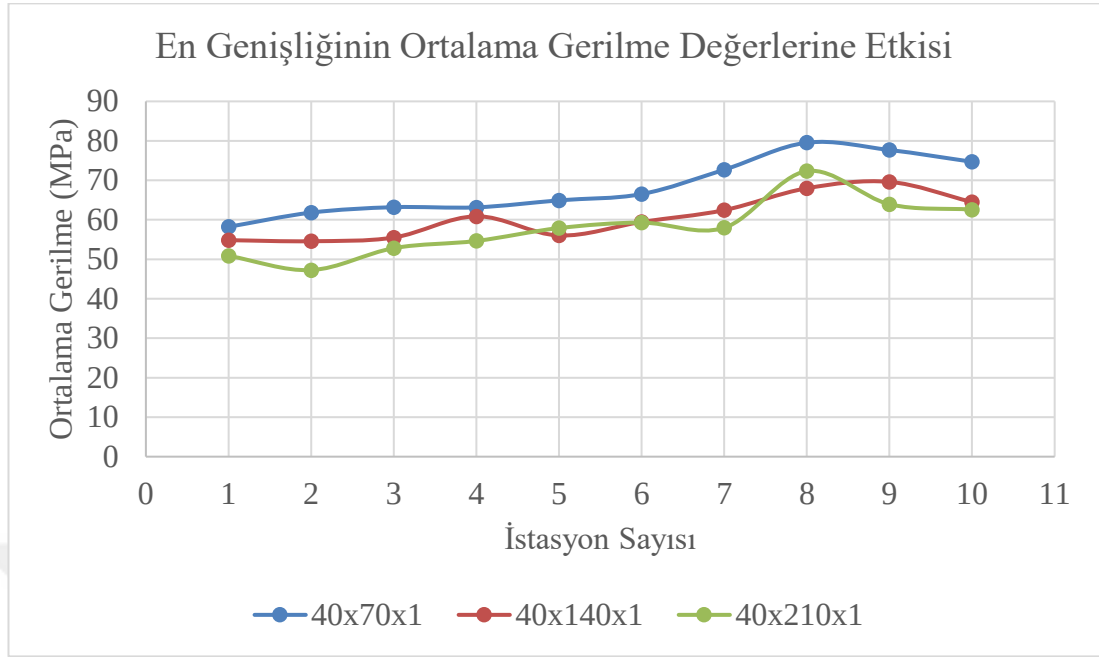
İki profilin değerleri arasındaki fark Çizelge 4.1 üzerinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Kalınlık etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri

Ortalama Gerilme – İstasyon Sayısı Değerleri				
İstasyon No.	40x70x1 Ortalama Gerilme Değerleri (MPa)	40x70x1.5 Ortalama Gerilme Değerleri (MPa)	Ortalama Gerilme Değerleri Arasındaki Fark	Ortalama Gerilme Değerleri Arasındaki Oran
10	61,29	79,76	18,47	1,30
9	68,64	80,97	12,33	1,18
8	73,57	80,43	6,86	1,09
7	73,76	86,27	12,51	1,17
6	82,11	86,58	4,48	1,05
5	83,82	90,66	6,84	1,08
4	78,88	85,60	6,73	1,09
3	80,14	97,58	17,44	1,22
2	74,58	105,35	30,77	1,41
1	69,30	103,65	34,35	1,50

Çizelge 4.1’ye göre kalınlıkları farklı iki profil için en yüksek fark 1. istasyonda 34,5 MPa ve 1,5 kat olarak elde edilmiş, en düşük fark ise 6. istasyonda 4,48 MPa ve 1,05 kat olarak bulunmuştur.

Genişlikleri farklı 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 tip U-Profillerin kabuk modellerin arasında yapılan incelemede elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı dağılım grafiği Şekil 4.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.2 : 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 kabuk modellerin ortalama gerilme - istasyon sayısı grafiği

Şekil 4.2’deki grafik incelendiğinde profilin taban genişliğiyle ortalama gerilme değerleri arasında ters orantının olduğu görülmektedir. 40x70x1 tip U-Profil en yüksek ortalama gerilme değerlerinin meydana geldiği profil olarak karşımıza çıkarken, ikinci sırada 40x140x1 tip U-Profilin ortalama gerilme değerleri bulunmaktadır. En düşük ortalama gerilme değerleri ise 40x210x1 tip U-Profil üzerinde yer almaktadır. Grafiğin bazı noktalarında 40x210x1’in ortalama gerilme değerlerinin 40x140x1’in üzerine çıktığı görülse de bu tip durumlar oldukça doğaldır ve genel duruma bakmak yanıltıcı sonuçlar elde etmenin önüne geçmektedir. Bunun dışında Şekil 4.2’deki grafik incelendiğinde başlangıç istasyonundan (istasyon no:10) son istasyona (istasyon no:1) doğru ortalama gerilme değerlerinin tüm profillerde düşüş yaşadığı gözlemlenmektedir.

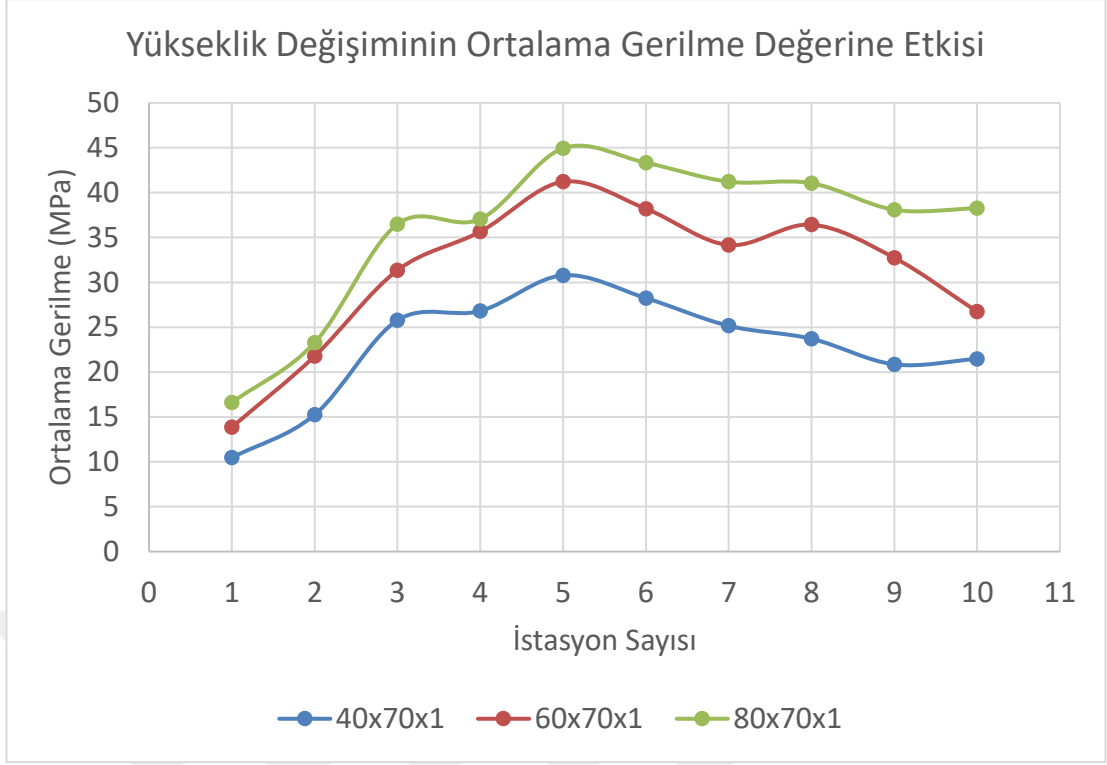
Dağılım grafiği paylaşılan profillerin ortalama gerilme değerleri arasındaki fark Çizelge 4.2 üzerinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 : Genişlik etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri

Ortalama Gerilme – İstasyon Sayısı Değerleri							
İstasyon No.	40x70x1 Ort. Gerilme Değ. (MPa)	40x140x1 Ort. Gerilme Değ. (MPa)	40x210x1 Ort. Gerilme Değ. (MPa)	40x70x1 - 40x140x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Fark	40x70x1 - 40x140x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Oran	40x70x1 - 40x210x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Fark	40x70x1 - 40x210x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Oran
10	74,70	64,51	62,59	10,20	1,16	12,12	1,19
9	77,69	69,61	63,95	8,08	1,12	13,74	1,21
8	79,54	67,99	72,33	11,55	1,17	7,21	1,10
7	72,69	62,45	57,98	10,24	1,16	14,71	1,25
6	66,52	59,46	59,30	7,06	1,12	7,22	1,12
5	64,93	56,03	57,91	8,90	1,16	7,02	1,12
4	63,16	60,89	54,65	2,27	1,04	8,51	1,16
3	63,20	55,51	52,82	7,68	1,14	10,38	1,20
2	61,82	54,58	47,26	7,24	1,13	14,55	1,31
1	58,22	54,84	50,87	3,38	1,06	7,35	1,14

Çizelge 4.2’ye göre genişlikleri farklı üç profil için, 40x70x1 ile 40x140x1 arasındaki en yüksek fark 8. istasyonda 11,55 MPa ve 1,17 kat olarak, en düşük fark ise 4. istasyonda 2,27 MPa ve 1,04 kat olarak elde edilmiştir. 40x70x1 ile 40x210x1 arasındaki en yüksek fark 7. istasyonda 14,71 MPa ve 1,25 kat olarak, en düşük fark ise 8. istasyonda 7,21 MPa ve 1,10 kat olarak elde edilmiştir.

Yükseklikleri farklı 40x70x1, 60x70x1 ve 80x70x1 tip U-Profillerin kabuk modellerin arasında yapılan incelemede elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı dağılım grafiği Şekil 4.3’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.3 : 40x70x1, 60x70x1 ve 80x70x1 kabuk modellerin ortalama gerilme - istasyon sayısı grafiği

Şekil 4.3'deki grafik incelendiğinde profil yüksekliği ile ortalama gerilme değerleri arasında bir doğru orantı olduğu doğrudan gözlemlenebilmektedir. Buna göre, en yüksek ortalama gerilme değerine sahip profil 80x70x1 tip U-Profil olurken, ikinci sırada 60x70x1 tip U-Profil bulunmakta ve son sırada da 40x70x1 tip U-Profil yer almaktadır. Grafiğin artış ve azalış eğilimi incelendiğinde, başlangıçtaki 10. istasyondan 5. istasyona kadar olan olan kısımda artış sonrasında son istasyon olan 1. istasyona doğru da azalış olduğu rahatlıkla görülebilmektedir. Ortalama gerilme değerleri 5. istasyonda bütün profillerde maksimum değere ulaşmaktadır.

Dağılım grafiği paylaşılan profillerin ortalama gerilme değerleri arasındaki fark Çizelge 4.3 üzerinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 : Yükseklik etkisini görmek amacıyla elde edilen ortalama gerilme – istasyon sayısı değerleri

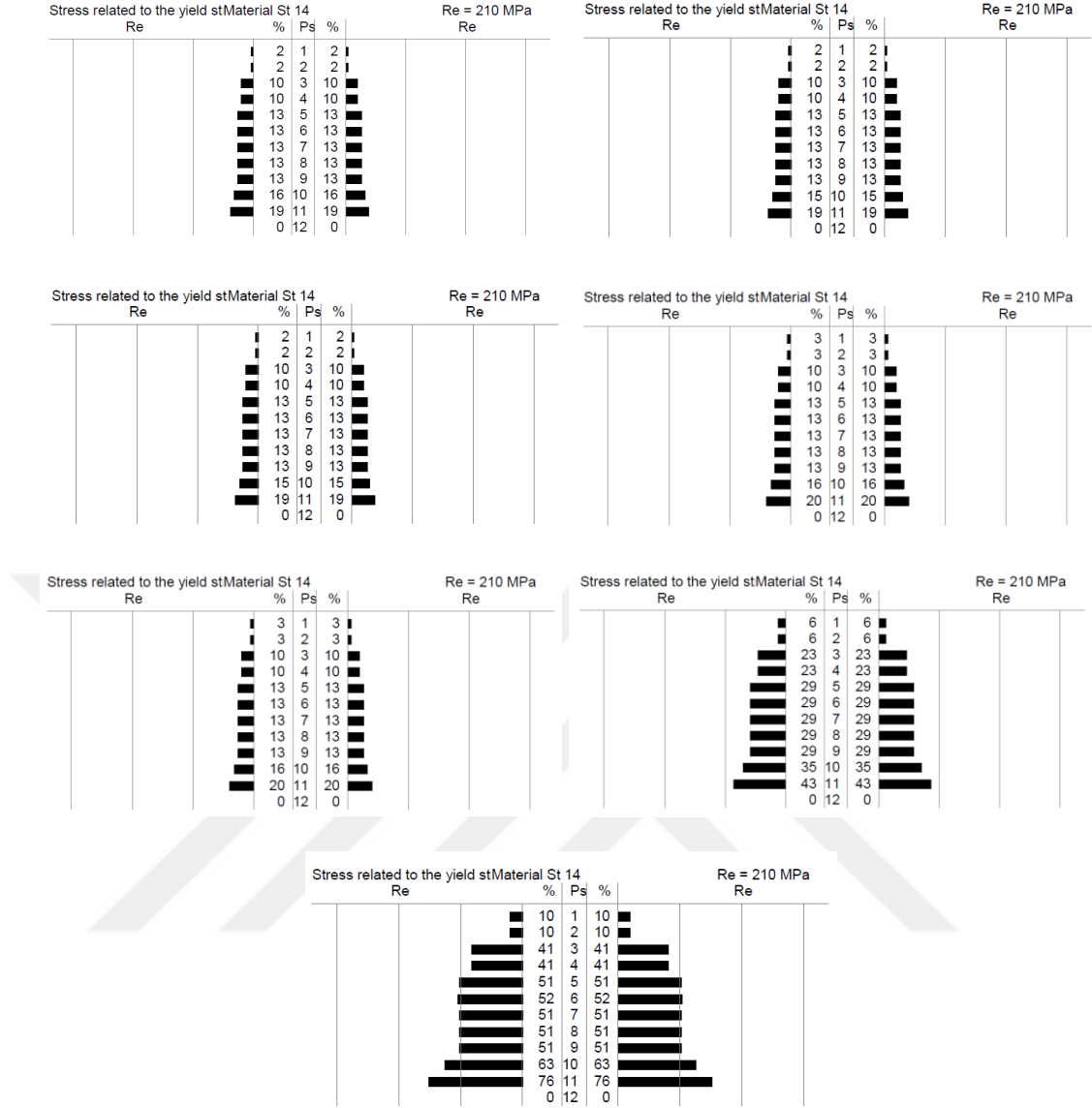
Ortalama Gerilme – İstasyon Sayısı Değerleri							
İstasyon No.	40x70x1 Ort.Gerilme Değ.	60x70x1 Ort. Gerilme Değ.	80x70x1 Ort. Gerilme Değ.	80x70x1 - 40x70x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Fark	80x70x1 - 40x70x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Oran	80x70x1 - 60x70x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Fark	80x70x1 - 60x70x1 Ort. Gerilme Değ. Arasındaki Oran
10	21,47	26,74	38,25	28,13	1,78	11,52	1,43
9	20,86	32,74	38,09	17,23	1,83	5,35	1,16
8	23,71	36,43	41,06	17,34	1,73	4,62	1,13
7	25,16	34,16	41,22	16,06	1,64	7,06	1,21
6	28,25	38,21	43,33	15,08	1,53	5,12	1,13
5	30,78	41,21	44,94	14,16	1,46	3,73	1,09
4	26,81	35,65	37,06	10,25	1,38	1,41	1,04
3	25,77	31,35	36,49	10,72	1,42	5,14	1,16
2	15,25	21,78	23,29	8,03	1,53	1,51	1,07
1	10,47	13,86	16,61	6,14	1,59	2,75	1,20

Çizelge 4.3'e göre yükseklikleri farklı üç profil için, 80x70x1 ile 40x70x1 arasındaki en yüksek fark 9. istasyonda 17,23 MPa ve 1,83 kat olarak, en düşük fark ise 4. istasyonda 10,25 MPa ve 1,38 kat olarak elde edilmiştir. 80x70x1 ile 60x70x1 arasındaki en yüksek fark 10. istasyonda 11,52 MPa ve 1,43 kat olarak, en düşük fark ise 4. istasyonda 1,41 MPa ve 1,04 kat olarak elde edilmiştir.

4.2 UBECO-PROFIL Analiz Sonuçları

Dizayn edilen U-Profillerin UBECO-PROFIL programı ile hem proses tasarımı yapılmış hem de büküm hattı gerilme değerleri ve springback değerleri elde edilmiştir. UBECO-PROFIL programı analiz kısmındaki verileri arka planda çalışan algoritmadaki analitik veya empirik bazı formülasyonlar ile elde etmekte ve buna göre sonuçları kullanıcıya yansıtmaktadır. Buna göre; büküm hattı sonuçları 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1 profilleri için elde edilmiş ve daha önceki bölümlerde bu sonuçlar paylaşılmıştır. Paylaşılan bu sonuçlar burada da tekrar paylaşılacak ve bu sonuçların üzerinde durulacaktır.

UBECO-PROFIL programının büküm hattı için verdiği Şekil 4.4'deki sonuçlar incelendiğinde gerilme artışına sebep olan en önemli etkenlerin yüksekliğin fazla, taban genişliğinin dar olması durumları olduğu gözlemlenmiştir. 40x70x1 – 60x70x1 – 80x70x1 arasındaki yüzde gerilme değerleri farkına bakıldığında 40x70x1 tip U-Profil ile 60x70x1 arasında yükseklik ile doğru orantılı olarak yüzde 200'ün üzerinde bir artış gözlemlenmiştir. 60x70x1 tip U-Profil ile 80x70x1 arasındaki yüzde gerilme değerleri farkına bakıldığında ise yine yükseklik artışıyla doğru orantılı olarak yüzde 175'in üzerinde bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Genişlik ve kalınlık değişimlerinin etkileri UBECO-PROFIL programının verdiği sonuçlara göre birbirine benzer seviyelerde çıktığından tam olarak gözlemlenememiş, bu yüzden bu değişimlerin parça üzerinde yarattığı etkiler ve birbirine göre kıyaslamaları LS-DYNA programı kullanılarak sonraki bölümde yapılmıştır.



Şekil 4.4 : UBECO-PROFİL sonuçlarına göre tez kapsamında incelenecek olan U-Profillerin her istasyon için büküm hattı üzerindeki gerilme dağılımı (Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla U-Profil Tipleri : 40x70x1 – 40x70x1.2 – 40x70x1.5 – 40x140x1 – 40x210x1 – 60x70x1 – 80x70x1)

Çizelge 4.4 : Tüm U-Profil tipleri ve tüm istasyonlar için UBECO-PROFIL’den elde edilen geri yaylanma sonuçları

Tip	İstasyon Numarasına Göre Geri Yaylanma Değerleri (°)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
40x70x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
40x70x1.2	0,974°	1,081°	1,178°	1,276°	1,374°	1,472°	1,570°	1,657°	1,745°	1,789°	1,832°
40x70x1.5	0,771°	0,878°	0,976°	1,074°	1,172°	1,271°	1,370°	1,458°	1,546°	1,590°	1,634°
40x140x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
40x210x1	1,174°	1,283°	1,379°	1,477°	1,574°	1,671°	1,769°	1,856°	1,943°	1,987°	2,030°
60x70x1	1,041°	1,149°	1,246°	1,343°	1,440°	1,538°	1,636°	1,724°	1,811°	1,855°	1,898°
80x70x1	1,041°	1,149°	1,246°	1,343°	1,440°	1,538°	1,636°	1,724°	1,811°	1,855°	1,898°

UBECO-PROFIL yazılımının verdiği Çizelge 4.4’deki geri yaylanma sonuçları incelendiğinde, kalınlık arttıkça geri yaylanma derecesinin azaldığı net bir biçimde gözlemlenmektedir. Benzer bir duruma Dametew ve Gebresenbet tarafından yapılan bir makalede de rastlanmış ve yapılan incelemeler sonucunda kalınlık 0.8 mm’den 4.5 mm’ye doğru arttıkça geri yaylanma değerlerinin %16 seviyesinde düştüğü sonucu elde edilmiştir [13].

40x70x1 ve 60x70x1 arasında bir gözlem yapılırsa profil yüksekliği artışının geri yaylanma derecesini bir miktar azalttığı fakat 60x70x1 ve 80x70x1 için geri yaylanma değerleri incelendiğinde bu azalış miktarının 60 mm’den 80 mm’ye geçişte görülmediği gözlemlenmiştir. 40x70x1, 40x140x1 ve 40x210x1 incelendiğinde profil genişliğinin geri yaylanma dereceleri üzerinde bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; kalınlık değişiminin U-Profil için en önemli kriter olduğu, genişlik ve yükseklik değişimlerinin U-Profil geri yaylanma değerlerini çok değiştirmedığı yorumu yapılabilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, genel anlamda rollform prosesi ile ilgili bilgiler verilmiş, otomotiv sektöründeki yeri ve önemi üzerinde durulmuş ve rollform hatlarıyla üretilen parçalar konu edilmiştir. Daha sonra, çeşitli U-Profil tipleri CATIA-V5 3D modelleme programı kullanılarak dizayn edilmiş ve modellenen profillerin kesitleri rollform için özelleşmiş olan UBECO-PROFIL programına aktarılmıştır. UBECO-PROFIL programı içinde malzeme seçimi, proses tasarımı yapılan profiller için programın verdiği yüzdesel büküm hattı değerleri elde edilmiş ve yine programdan alınan geri yaylanma sonuçlarına tez çalışması kapsamında yer verilmiştir. Son olarak, geometri ile ilgili kalınlık, yükseklik ve genişlik gibi değişkenlerin malzeme üzerindeki gerilmelere nasıl etki ettiğinin araştırılması adına sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak LS-DYNA yazılımı ile profilin Von-Misses kriterine göre gerilme analizi yapılmıştır. Sonuç olarak;

- UBECO-PROFIL programının verdiği gerilme sonuçlarına göre, büküm yapılan bölgenin sacın uç kısmı ile arasındaki mesafe ve dolayısıyla profil yüksekliği arttıkça ve taban genişliği azaldıkça elde edilen yüzdesel büküm hattı gerilmelerinin oldukça arttığı görülmüş ve tasarım yapılırken bu kriterin göz önünde bulundurulmasının oldukça önemli olduğu ortaya çıkmıştır.
- UBECO-PROFIL programından elde edilen geri yaylanma değerleri sonuçlarına göre, kalınlık artışının geri yaylanma sonuçları üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş olup, kalınlık arttıkça geri yaylanma değerlerinin azaldığı yani kalınlıkla geri yaylanma değerleri arasında U-Profil için ters orantı olduğu görülmüştür.
- U-Profiller üzerinde FEA metodu ile yapılan analizler arasından kalınlık etkisinin profil üzerinde yarattığı etki ile ilgili elde edilen sonuçlara göre, kalınlık artışının parça üzerindeki gerilme değerlerini arttırdığı ve 40x70x1.5 tip U-Profil'in istasyon bazındaki ortalama gerilme değerlerinin 40x70x1 tip U-Profil'in ortalama gerilme değerlerinin 1.5 katına kadar çıkabildiği görülmüştür. Dolayısıyla, kalınlık artışının parça üzerindeki gerilme değerlerini yükselttiği ve kalınlık artışı ile parça üzerindeki gerilme değerleri arasında doğru orantı olduğu sonucu çıkarılabilir. O bakımdan, profil tasarımı

yapılırken bu etkinin göz önünde bulundurulması oldukça büyük önem arz etmektedir.

- U-Profiller üzerinde FEA metodu ile yapılan analizler arasından genişlik etkisinin profil üzerinde yarattığı etki ile ilgili elde edilen sonuçlara göre, bütün profillerin ortalama gerilme değerleri başlangıç istasyonundan son istasyona doğru düşüş göstermiştir. Diğer yandan, en yüksek ortalama gerilme değeri 40x70x1 tip U-Profilde elde edilirken en düşük ortalama gerilme değeri ise 40x210x1 tip U-Profilde elde edilmiştir. 40x140x1 tip U-Profil ise ortalama gerilme değerleri bakımından en yüksekten en düşüğe doğru bir sıralama yapıldığında ikinci sırada yer almaktadır. Elde edilen bu sonuçlara göre, bir U-Profil'in taban genişliği arttıkça profil üzerindeki ortalama gerilme değerlerinin düşmekte olduğu sonucu çıkarılabilir. O bakımdan, profilin taban genişliği ile ortalama gerilme değerleri arasında ters orantının olduğu yorumu yapılabilir.
- U-Profiller üzerinde FEA metodu ile yapılan analizler arasından yükseklik etkisinin profil üzerinde yarattığı etki ile ilgili elde edilen sonuçlara göre, elde edilen en ortalama gerilmeler yüksekten düşüğe doğru sıralandığında ilk sırada 80x70x1 tip U-Profil, ikinci sırada 60x70x1 tip U-Profil ve son sırada ise 40x70x1 tip U-Profil yer almaktadır. Dolayısıyla, profil yüksekliği arttıkça profil üzerindeki ortalama gerilme değerlerinin artmakta olduğu ve profil yüksekliği ile ortalama gerilme değerleri arasında doğru orantı olduğu yorumu yapılabilmektedir.
- LS-DYNA yazılımı ile elde edilen profil yüksekliği artışı ve taban genişliği azalışı ile profil üzerindeki ortalama gerilme değerlerinin artması durumu, UBECO-PROFIL yazılımının en yüksek büküm hattı gerilme değerini 80x70x1 tip U-Profil üzerinde vermesi durumu ile örtüşmekte ve bu iki mühendislik yazılımından alınan değerler birbirini doğrulamaktadır.

Öneriler ve ilerdeki çalışmalar,

- LS-DYNA veya başka mühendislik yazılımları ile kalınlık etkisinin incelenmesi ve farklı kalınlıklardaki profiller üzerindeki gerilme dağılımlarının birbiri ile net bir biçimde kıyaslanması için profiller arasındaki kalınlık farkının minimum 0.5 mm veya üzeri olmasının kıyaslamayı kolaylaştıracağı sonucuna varılmıştır.
- Tez kapsamında yapılan çalışma ile elde edilen sonuçların, ilerdeki çalışmalarda hatta entegre edilebilecek çeşitli ekipmanlar vasıtasıyla fiziksel olarak profil üretimi yapılması ile deneysel olarak doğrulanması hedeflenmektedir.
- İlerleyen dönemlerde yapılacak çalışmalarla, rollform hatlarına entegre edilen lazer kaynak, kesme ünitesi, ön delme ve boşaltma kalıpları. vb ünitelerle ilgili de çeşitli simülasyonların yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi hedeflenen bir diğer çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmanın bir benzerinin sonraki çalışmalarda 3D rollform hattı için de yapılmasının bu alandaki literatüre vereceği katkı ve bu teknolojinin ülkemizde kullanımının yaygınlaşmasının önündeki engellerin kaldırılması açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Halmos, G. T.** (2006). *Roll Forming Handbook*. Boca Raton, Florida: Taylor&Francis.
- [2] **Güner, A.** (2007). Assessment of Roll-Formed Products Including the Cold Forming Effects (Yüksek lisans tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] **Url-1** <<https://ahssinsights.org/category/forming/roll-forming/>>, date retrieved 12.12.2021.
- [4] **Ozturk, F. & Kacar I.** (2014). Roll Forming Applications for Automotive Industry. *Otekon*, Bursa.
- [5] **Url-2** <<https://www.ubeco.com/profil.htm>>, date retrieved 10.11.2021.
- [6] **Url-3** <<https://www.copra.info/en/>>, date retrieved 10.11.2021.
- [7] **Url-4** <<https://www.dlubal.com/en/>>, date retrieved 24.11.2021.
- [8] **Crutzen, Y. & Boman R. & Papeleux L. & Ponthot J. P.** (2016). Lagrangian and arbitrary Lagrangian Eulerian simulations of complex roll-forming processes, *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 344, no. 4–5. Elsevier Masson SAS, (pp. 251–266).
- [9] **Duggal, N.** (1995). Process Simulation of Rollforming and Roll Pass Design (Yüksek lisans tezi). The Ohio State University, Ohio.
- [10] **Paralikas, J. & Salonitis K. & Chryssolouris G.** (2009). Investigation of the effects of main roll-forming process parameters on quality for a V-section profile from AHSS, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 3–4, (pp. 223–237).
- [11] **Url-5** <<https://www.dreistern.com/>>, date retrieved 02.01.2022.
- [12] **Aboutalebi, F. H. & Farzin M. & Poursina M.** (2011). Numerical simulation and experimental validation of a ductile damage model for DIN 1623 St14 steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1–4, (pp. 157–165).
- [13] **Hashemi, R. & Ghazanfari A. & Abrinia K. & Assempour A.** (2012). Forming Limit Diagrams of Ground St14 Steel Sheets with Different Thicknesses, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 5, no. 1, (pp. 60–64).
- [14] **Brandegger, R.** (2021). *UBECO PROFIL - Rollform Design Software*. User Manual.
- [15] **Wifi, A. S. & Al-Mokadem A. E. & Saber M.** (2008). Computer-aided roll design for open sections contour roll-forming process, *Proceedings of the ninth Cairo University International Conference on Mechanical Design and Production (MDP-9)*, Cairo, Egypt

- [16] **Ferreira, P. B. F.** (2016). Roll Forming-a study on machine deflection by means of experimental analysis and numerical developments (Yüksek lisans tezi). Universidade Do Porto, Porto.
- [17] **Soyaslan, M.** (2018). The Effects of Roll Forming Pass Design on Edge Stresses, *Sigma J Eng & Nat Sci* 36 (3), 677-691.
- [18] **Nisitani, H.** (1994). *Computational and Experimental Fracture Mechanics*. Southampton : Computational Mechanics Publications.
- [19] **Bidabadi, B. S. & Naeini, H. M. & Tehrani M. S. & Barghikar H.** (2016). Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, U-channel sections, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 118, (pp. 243–253).
- [20] **Beer, F. P. & Johnston E. R. & Dewolf J. T. & Mazurek D. F.** (2011). *Mechanics of materials*. New York : McGraw-Hill.
- [21] **Marciniak, Z. & Duncan J. L. & Hu S. J.** (2002). *Mechanics of sheet metal forming*. London : Butterworth-Heinemann.
- [22] **Ahmed, G. M. S. & Ahmed, M. & Mohiuddin M. V. & Sajid S. M. S.** (2016). Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and its Validation Using LS-DYNA, *Procedia Materials Science*, vol. 6, (pp. 1376–1385).
- [23] **Gebresenbet, T. & Dametew, A. W.** (2017). Study the Effects of Spring Back on Sheet Metal Bending using Mathematical Methods, *Journal of Material Science & Engineering*, vol. 06, no. 05.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Abdullah PALA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü