KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEŞİTLİ SAC MALZEMELERİN U PROFİLLİ BÜKÜMLERİNDEKİ GERİ YAYLANMA VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

ERSEL ÖZDEN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEŞİTLİ SAC MALZEMELERİN U PROFİLLİ BÜKÜMLERİNDEKİ GERİ YAYLANMA VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

ERSEL ÖZDEN

Doç.Dr. A.Armağan ARICI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr.Öğr.Üyesi Eren BİLLUR
Eş Danışman, Atılım Üniversitesi .....

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Sedat KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr.Öğr.Üyesi Nimet KARDEŞ SEVER
Jüri Üyesi, Pamukkale Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Otomotiv sektöründe yüksek mukavemetli malzemeler kullanılarak enerji tasarrufu sağlanmaya çalışıldığı bilinen bir gerçektir. Ancak burada sıkça atlanan gerçek bu yüksek mukavemetli malzemelerin nasıl ve ne şekilde üretileceğidir.

İşte bu sorunun belirli açılardan ele alındığı yüksek lisans tezimde bana bu olanağı sağlayan sayın hocam Doç.Dr.Armağan Arıcı'ya, teorik çalışmamı deneysel ortama taşımamda, teknik altyapı, atölye ve tecrübelerini esirgemeyen Toyotetsu – Türkiye Ar-Ge departmanına, malzeme karakterizasyonu konusunda, hem test cihazlarını kullandığımız hem de bilgilerinden yararlandığım Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde görev alan ikinci danışman hocam sayın Dr.Öğr.Üyesi Eren Billur'a ve son olarak bana her zaman ve her koşulda destek olan ailem, eşim ve oğluma teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs - 2018 Ersel ÖZDEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1.LİTERATÜR ÇALIŞMASI 3
1.1.Yüksek Mukavemetli Sac Malzemeler 3
1.1.1. Birinci nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler 3
1.1.2. İkinci nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler 7
1.1.3. Üçüncü nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler 8
1.1.4. Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanım alanları 9
1.2.Yüksek Mukavemetli Malzemelerde Geri Yaylanma 10
1.2.1. Açı değişimi 12
1.2.2. Eğik yan duvar 13
1.2.3. Burulma 15
2.DENEYSEL ÇALIŞMA 17
2.1.Malzeme Temini 17
2.2.Malzeme Karakterizasyonu ve Malzeme Kartının Oluşturulması 18
2.3.Prototip Parça Seçimi ve Tasarımı 21
2.4.Geri Yaylanma Simülasyonları ve Prototip Parça Revizyonları 22
2.5.Kalıp Tasarımı ve İmalatı 29
2.6.Prototip Parçaların Üretimi 34
2.7.Kafes Yapı Analiz Hazırlığı 35
3.ANALİZLER 37
3.1.Parça Geometri Ölçümü 38
3.2.Şekillendirme Analizi 41
3.3.Sayısal Analiz Sonuçlarının Nihai Ürünle Kıyaslanması 43
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER 47
KAYNAKÇA 50
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 55
ÖZGEÇMİŞ 56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çeşitli çelik sınıflarının kopma dayanımı-toplam uzama eğrisi 3
Şekil 1.2. Çift fazlı bir çeliğin şematik mikro yapısı 4
Şekil 1.3. TRIP çeliğinin şematik mikro yapısı 5
Şekil 1.4. CP çeliğinin şematik mikro yapısı 5
Şekil 1.5. Martenzit çeliğin şematik mikro yapısı 6
Şekil 1.6. a) Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi
b) ZSD diyagramı, soğuma eğrisi 7
Şekil 1.7. TWIP çeliklerinin şematik mikro yapısı 8
Şekil 1.8. TWIP çeliklerinin gerilme-genleme diyagramı 8
Şekil 1.9. Q&P çeliğinin üretim metodolojisi 9
Şekil 1.10. Enerji bölgesi ve Güvenlik kafesi 10
Şekil 1.11. Gelecek Nesil Çeliklerin Aracı; Gövde yapısı 10
Şekil 1.12. Şematik geri yaylanma 11
Şekil 1.13. Geri yaylanma oluşumunun şematik gösterimi 12
Şekil 1.14. Açı değişimi 13
Şekil 1.15. Bükme anında oluşan çekme-basma gerilimleri 13
Şekil 1.16. Yüksek mukavemetli malzemelerde eğik yan duvar
geri yaylanması 14
Şekil 1.17. Eğik yan duvar 14
Şekil 1.18. Burulma geri yaylanması 15
Şekil 2.1. Standart ekstensometre ile çekme testinden elde edilen
mühendislik genlemesi-gerilimi eğrileri 19
Şekil 2.2. (a) GOM Aramis sistemi ile çekme düzeneği, (b) örnek veri
(c) örnek analiz 20
Şekil 2.3. TWIP980 sacı çekme ve şişirme testinin kıyaslanması 20
Şekil 2.4. Q&P1180 sacının standart ve optik ekstensometre sonuç
kıyaslanması 20
Şekil 2.5. Oluşturulan malzeme kartları (a) Q&P1180 (b) TWIP980 21
Şekil 2.6. (a) Seçilen parçanın gövdedeki yeri,
(b) ölçeklendirilmiş prototipin ilk taslağı. 22
Şekil 2.7. Q&P1180 çeliğinin ilk tasarıma göre geri yaylanma mesafeleri 23
Şekil 2.8. TWIP980 çeliğinin ilk tasarıma göre geri yaylanma mesafeleri 23
Şekil 2.9. Prototip tasarıma kuvvetlendirici formların eklenmesi 24
Şekil 2.10. İlk revizyon sonrası Q&P1180 malzemesinin geri yaylanması 24
Şekil 2.11. Tasarım revizyon 2 25
Şekil 2.12. Q&P1180 çeliğinin revizyon 2'de oluşan geri yaylanma sonucu 25
Şekil 2.13. Tasarım revizyon 3 26
Şekil 2.14. Q&P1180 çeliğinin revizyon 3'de oluşan geri yaylanma sonucu 27

Şekil 2.15. Tasarım revizyon 4 28
Şekil 2.16. Q&P1180 çeliğinin revizyon 4'te oluşan geri yaylanma sonucu 28
Şekil 2.17. Revizyon 4'e göre parça kesitinin son hali 29
Şekil 2.18. Üst kalıbın genel görünümü ve standart elemanları 29
Şekil 2.19. Alt kalıbın genel görünümü ve standart elemanları 30
Şekil 2.20. Kapalı kalp görünümü ve boyutları 30
Şekil 2.21. Gazlı yayların kullanılması ve kalıbın iç görünümü 31
Şekil 2.22. Prototip parça büküm noktaları 32
Şekil 2.23. İmalat ve tasarım görünümleri 34
Şekil 2.24. Pres hareket diyagramı 35
Şekil 2.25. Özel kafes yapı ve kalıp içi görüntü 36
Şekil 3.1. Üretilen parçalar ve görsel kıyaslaması 37
Şekil 3.2. ATOS tarama cihazı ve gom Inspect program ara yüzü 38
Şekil 3.3. TWIP980(0°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması 39
Şekil 3.4. TWIP980(90°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması 39
Şekil 3.5. Q&P1180(0°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması 40
Şekil 3.6. Q&P1180(90°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması 40
Şekil 3.7. Argus tarama sonuç örneği 41
Şekil 3.8. TWIP980 Ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması 42
Şekil 3.9. Q&P1180 ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması 42
Şekil 3.10. DP980 ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması 42
Şekil 3.11. Kıyaslama kesit bölgesinin program üzerinde görünümü 44
Şekil 3.12. DP malzemenin simulasyon ve ürün kıyaslaması 44
Şekil 3.13. TWIP980 malzemenin simülasyon ve ürün kıyaslaması 45
Şekil 3.14. Q&P1180 malzemenin simülasyon ve ürün kıyaslaması 46

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Malzemelerin kimyasal içerikleri.....18
Tablo 2.2. Standart ekstensometre ile çekme testi sonuçları.....19
Tablo 2.3. İlk revizyon sonrası olan değişimlerin karşılaştırılması.....24
Tablo 2.4. Revizyon 1 ve 2'nin ilk tasarıma göre kıyaslanması.....26
Tablo 2.5. Revizyonların ilk tasarıma göre kıyaslanması.....27
Tablo 2.6. Revizyonların ilk tasarıma göre kıyaslanması.....28

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

e	: Sac kalınlığı, (mm)
K	: Geri yaylanma faktörü
k	: Bükme katsayısı
L	: Alt-üst bükme çeliklerinin radyus arası mesafesi, (mm)
P_G	: Ped plaka tutma kuvveti, (N)
P_U	: Bükme kuvveti, (N)
w	: Toplam bükme uzunluğu, (mm)
α	: Bükme açısı, (^{o})
$\sigma_ç$	: Çekme mukavemeti, (MPa)

Kısaltmalar

AHSS	: Advanced High Strength Steels (Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler)
BEV	: Body Electrical Vehicle (Elektrikli Araç Gövdesi)
CP	: Complex Phase (Karmaşık Fazlı)
DP	: Dual Phase (Çift Fazlı)
FLC	: Forming Limit Curve (Şekillendirilebilirlik Limit Çizgisi)
FLD	: Forming Limit Diagram (Şekillendirilebilirlik Limit Diyagramı)
FSV	: Future Steel Vehicle (Gelecek Çeliklerin Aracı)
HDY	: Hadde Yönü
HSLA	: High Strength Low Alloy (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı)
HSS	: High Strength Steels (Yüksek Mukavemetli Çelikler)
MP	: Multi Phase (Çoklu Faz)
OEM	: Original Equipment Manufacturer (Orijinal Ekipman Üretici)
PHS	: Press Hardened Steel (Preste Sertleştirilmiş Çelik)
TBF	: TRIP-Aided Bainitic Ferrite (TRIP Etkili Beynitik Ferritik)
TRIP	: Transformation-Induced Plasticity (Dönüşüm Kaynaklı Plastisite)
TWIP	: Twining-Induced Plasticity (İkizleme Kaynaklı Plastisite)
Q&P	: Quenching and Partitioning (Sertleştirilmiş ve Karbonları Ayrıştırılmış)

ÇEŞİTLİ SAC MALZEMELERİN U PROFİLLİ BÜKÜMLERİNDEKİ GERİ YAYLANMA VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

ÖZET

Otomotiv sektöründe gövdeden ağırlık azaltma yöntemlerinden en yaygını sac komponentlerde daha yüksek dayanımlı çelik kullanarak, sac kalınlığını azaltmaktır. Çeliklerin dayanım değerleri arttıkça, şekillendirilebilirlikleri azalmakta, geri yaylanma eğilimleri ise artmaktadır. Geleneksel yöntemlerle gövde parçalarında çift fazlı 980 MPa kopma dayanımına sahip çelikler şekillendirilebilmektedir. Hammadde üreticileri yüksek dayanımla birlikte yüksek süneklik sunan çelikler geliştirmeye ve piyasaya sunmaya devam etmektedir. Bu çalışmada yüksek sünekliğe sahip TWIP980 çeliği ve daha yüksek dayanımlı Q&P1180 çeliği kullanılarak bir otomobil komponentinin tasarım ve üretim aşamaları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Malzeme Karakterizasyonu, TWIP, Q&P, Yüksek Dayanımlı Çelikler.

MATERIAL CHARACTERIZATION AND SPRINGBACK COMPARISON UNDER THE U-BENDING OPERATION OF SOME SHEET STEEL

ABSTRACT

In the automotive industry, one of the most common methods to lower the weight of the car body is to downgage the sheets using higher strength steels. As the strength level of a steel is increased, typically its formability is lowered and the tendency of higher spring back is increased. With conventional methods, car body parts can be formed using Dual Phase steels with 980 MPa UTS. Steelmakers are continuously developing and marketing higher strength-higher elongation materials. In this study, TWIP 980 steel – a grade with very high formability - and Q&P 1180 - an ultra high strength - steels are studied experimentally and numerically for design and manufacturability.

Keywords: Material Characterization, TWIP , Q&P, Advanced High Strength Steels.

GİRİŞ

At ya da başka bir hayvanın yardımı olmaksızın hareket edebilen ilk araç, Nicolas-Joseph Cugnot'nun 1769 yılında yaptığı buharlı otomobildi. Bir seferde 15 dakika çalışabilen aracın en yüksek hızı saatte 3,6 km'ydi. Bu hız bir insanın yürüyüş hızından bile daha azdır [1]. İlk araç ile birlikte ilk kazanında kayıtlara girmesi pek gecikmemiş ve de 1771 yılında aynı araçla Paris'te bir tophane ya da bir bahçe duvarının bu araçla devrildiğine dair ufak bir kaza raporu da tutanaklara geçmiştir [2]. Otomobillerin ilerleyen tarihinde içten yanmalı motorların evrimleri beklenmiştir ta ki 1886 yılında Karl Benz, benzin yakıtlı bir otomobil için ilk patenti alıncaya kadar [3]. Bu, günümüzde bilinen otomobillerin atası olarak kabul edilen ve üretilen ilk otomobildir. Bundan sonraki yıllardaysa otomobil tasarımları giderek gelişmiştir. 20.yy başlarında araç hızlarının yavaş olması ve de sayılarının azlığından dolayı kaza oranlarının düşük olması tasarımlarda herhangi bir kısıtlamaya gitmeyi gereksiz kılmıştır. Bunun sonucunda ağır ama bir o kadar da güvenilmez araçlar doğmuştur.

İlk otomobil gövdelerinde tahta ve belirli oranlarda demir kullanılmıştır. Bunları takiben 1914 yılında Dodge&Budd tamamı çelik gövdeye sahip otomobiller üretmiştir. Ancak dünya ekonomisinde süre gelecek olan sarsıntılı yıllar ve de o zamanın teknolojisine göre üretimi oldukça pahalı olan çelik, otomobil tasarımlarında çeliğin ana plan olmasını biraz daha geciktirerek 1950-1960'lı yıllar arasında güvenlik ve de hafiflik beklentileriyle kullanım oranlarını arttırabilmiştir [4].

Günümüzde sosyo-ekonomik gelişmişlik artmaya devam ettikçe son müşterilerin otomobillerinden beklentileri artmaktadır. Kullanıcılar hem daha dinamik (burulma ve bükülme direnci yüksek gövde), daha güvenli, daha geniş hacimli, daha performanslı ve daha donanımlı otomobiller istemektedir [5]. Buna karşın, regülasyonlar daha güvenli ve daha az emisyon salan otomobil üretimini zorlamaktadır [6]. Otomobil gövdesinden daha yüksek kaza güvenliği, daha kullanışlı ve geniş iç hacim, daha yüksek rijitlik ve daha düşük ağırlığın aynı anda elde edilebilmesi otomotiv sektörünün en önemli Ar-Ge başlıklarından birini oluşturmaktadır [7].

Ortalama bir otomobilde gövde ağırlığı, otomobilin toplam ağırlığının %25-30'una denk gelmektedir. Gövdede yapılabilecek 1 kg'lık bir ağırlık tasarrufu, süspansiyon ve güç üretim/aktarma organlarında da 0,5 kg'lık bir "ikincil tasarruf" sağlayabilmektedir [8]. Tipik bir otomobil gövdesi yaklaşık 400 sac metalin birleştirilmesi ile oluşmaktadır [9]. Son yıllarda üst segment otomobillerin gövdelerinde sac metallerin yanısıra, alüminyum döküm ve ekstrüzyon parçaların kullanımı da artış göstermektedir [10-11].

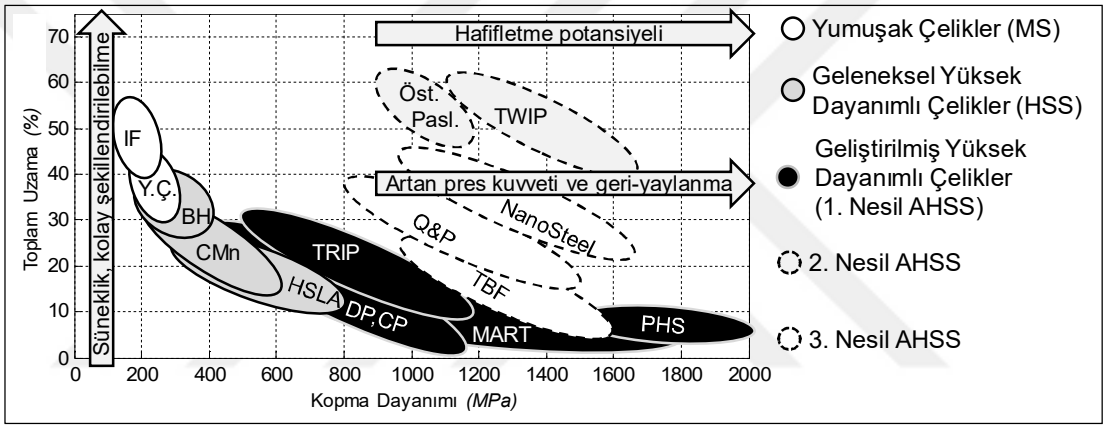
Sac gövdenin hafifletilme kapsamında yapılan araştırmalar yüksek mukavemetli çeliklerin (HSS) doğuşunu devamındaysa gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerle (AHSS) süregelip bu malzemeler alt jenerasyonlarıyla gelişmeye devam etmektedir. Ancak bu gelişimin yanında getirdiği dezavantajlarda oluşmuştur. Araç tasarımları karmaşık yapılara ulaştıkça alt parçalardan da aynı karmaşık yapılar istenir olmuştur. Bu da geri yaylanma davranışının giderek artmasına parçaların şekillendirilebilirliklerini en üst sınırlarda sınamalarına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, üçüncü jenerasyon AHSS malzemelerden Q&P1180 çeliği ve ikinci jenerasyon malzemelerden TWIP980 çeliği geleneksel çift fazlı 980 MPa malzemeye göre U bükme sırasında gösterecekleri geri yaylanma davranışları hem sayısal analiz hem de gerçek üründen elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Ayrıca şekillendirilebilirlik karşılaştırılması da yapılmıştır. Bu sayede kullanım ihtiyaçlarına göre en uygun malzeme seçimine karar verilmiştir.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1.Yüksek Mukavemetli Sac Malzemeler

Yüksek dayanımlı çelik kullanılarak hem gövdeden hem de şasi/aktarma organlarından ikincil ağırlık tasarrufu yapılabileceği fikri 1970'li yıllardan beri bilinmektedir [12]. Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmakta olan sac malzemelerin genel bir özeti aşağıdaki Şekil 1.1'de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Çeşitli çelik sınıflarının kopma dayanımı-toplam uzama eğrisi [13]

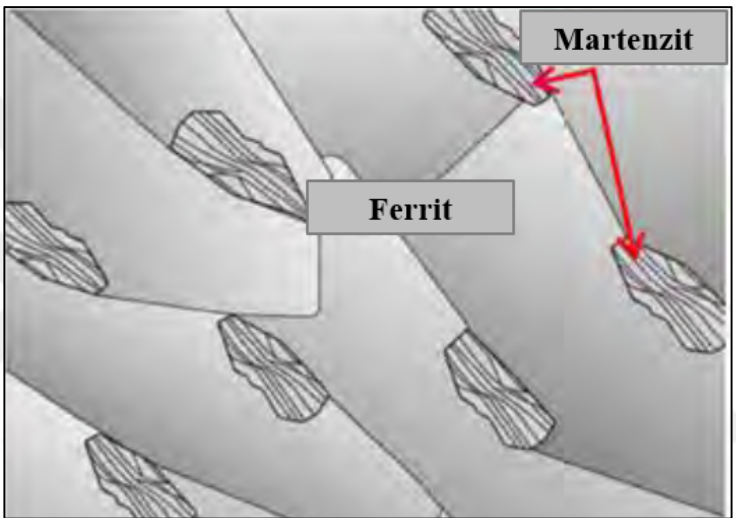
Geleneksel olarak adlandırılan yüksek dayanımlı çeliklerin otomobil gövdelerindeki kullanımı ilk kez 1979'da HSLA (High strength low alloy – Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı) çelikleri ile başlamıştır [14]. Bu çeliklerin dayanımı arttıkça süneklikleri çok düşmektedir. Bu nedenle HSLA çeliklerin otomobil gövdesinde kullanım oranları 1990'ların ortalarına kadar kütlece %20 seviyelerini geçememiştir [15-16].

1.1.1. Birinci nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler

Birden çok fazdan oluşan yüksek dayanımlı çeliklere "gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler" denmektedir. Bu tip çeliklerin ilki olan ve ferritik ve martenzitik fazlardan oluşan çift fazlı çeliklerin hem sünek hem de yüksek dayanımlı olabileceği 1970'lerden beri bilinmekteydi [17-18]. Ancak bu çeliklerin otomotiv sektörünün talebini karşılayacak arzı ancak 1990'ların ortalarında mümkün oldu [19]. 1997'de Jambor ve Beyer, DP çeliği kullanılması halinde tünel sacı parçasının 0,2 mm incelti-

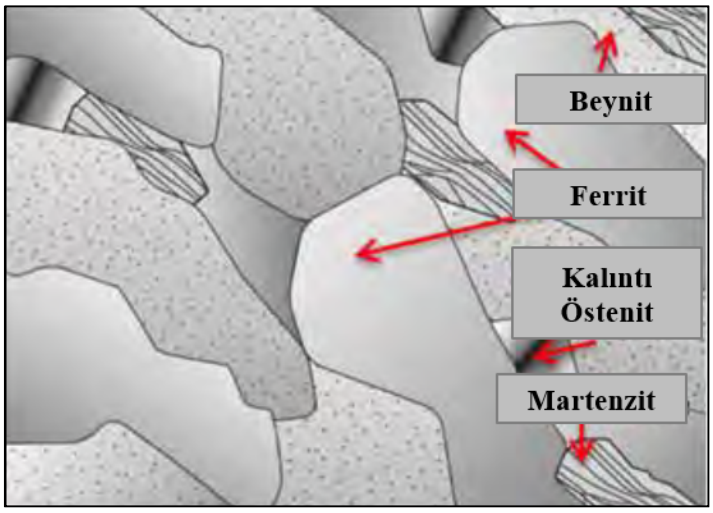
lebileceğini gösterdi [15]. 1998'de DP çeliği ilk kez Volvo S80 modelinde seri olarak kullanılmaya başlandı [20]. Nissan ise DP590'ı ilk kez 1999'da, DP780'i ise ilk kez 2002'de seri kullanıma aldı [21].

DP çeliklerin mikro yapıları ferritik matrisinde sert martenzitik adacıklar barındırmaktadır. Sert ikinci fazların hacimsel oranlarının artması genellikle mukavemetin artmasını sağlamaktadır. İç yapılarında üretim yöntemlerinden dolayı az miktarlarda kalıntı beynit ve/veya östenit bulundurabilirler. Mikro yapının temsili gösterimi Şekil 1.2'de verilmiştir [22].



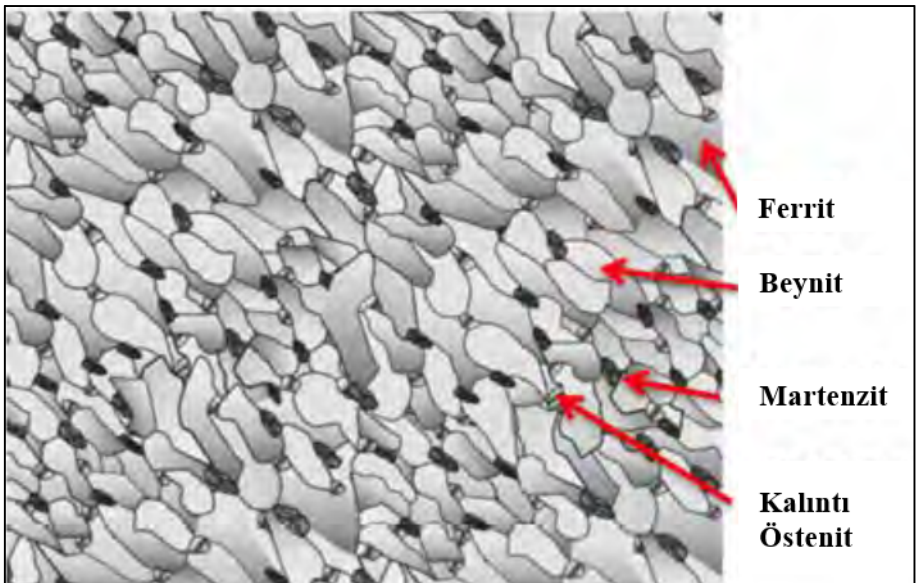
Şekil 1.2. Çift fazlı bir çeliğin şematik mikro yapısı [22]

Bir diğer yüksek dayanımlı çelik tipi olan TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri ise ilk kez 1967'de tanımlandı [23]. Çeliğin yapısında kalıntı östenit kalması halinde, şekil değiştirme anında kalıntı östenitin martenzite dönüşmekte, bu durum yüksek pekleşmeye (strain hardening) sebep olmaktadır. Buna TRIP etkisi de denir [24]. TRIP çeliklerinin yüksek silikon ve karbon içeriği, son mikro yapıda önemli miktarda kalıntı östenit oluşumuna neden olur. Ayrıca üretim safhalarında beynitte ortaya çıkmaktadır. Şematik gösterim Şekil 1.3'te verilmiştir [22]. 1992'de Sugimoto vd. DP ve TRIP çeliklerinin sünekliklerini çalıştı [25], ancak bu çeliklerin ticarileşmesi 1998'de oldu. [19] Otomotiv endüstrisinde TRIP çelikleri 2000'lerin başında Audi, BMW, Opel ve Renault tarafından kullanılmaya başlandı [26-27].



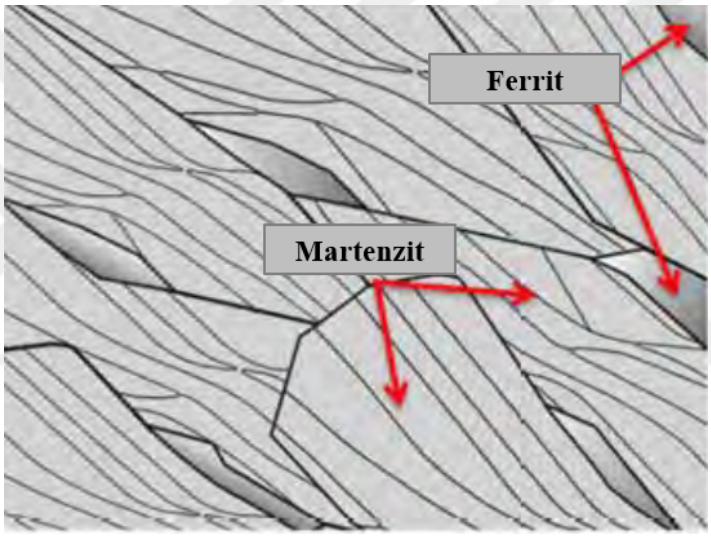
Şekil 1.3. TRIP çeliğinin şematik mikro yapısı [22]

Karmaşık fazlı (complex phase, CP) çelikler ilk kez 1998'de tanıtılırken [28], otomotiv endüstrisinde seri üretime geçmesi çok hızlı gerçekleşmiştir. 2000 yılında Mercedes CL serisinin B sütunu takviyesinde sıcak haddelenmiş CP800 sacı kullanılmıştır [29]. CP çelikleri bazı kaynaklarda MP (multi-phase) olarak da geçmektedir. Bu çeliklerde DP'den farklı olarak martenzitin bir kısmı beynite dönüştürülmüştür. Mikro yapının şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir [22]. Özellikle delik genişletmenin yüksek olduğu ya da lokal şekil değişikliklerinin fazla olduğu yerlerde tercih edilir [30].



Şekil 1.4. CP çeliğinin şematik mikro yapısı [22]

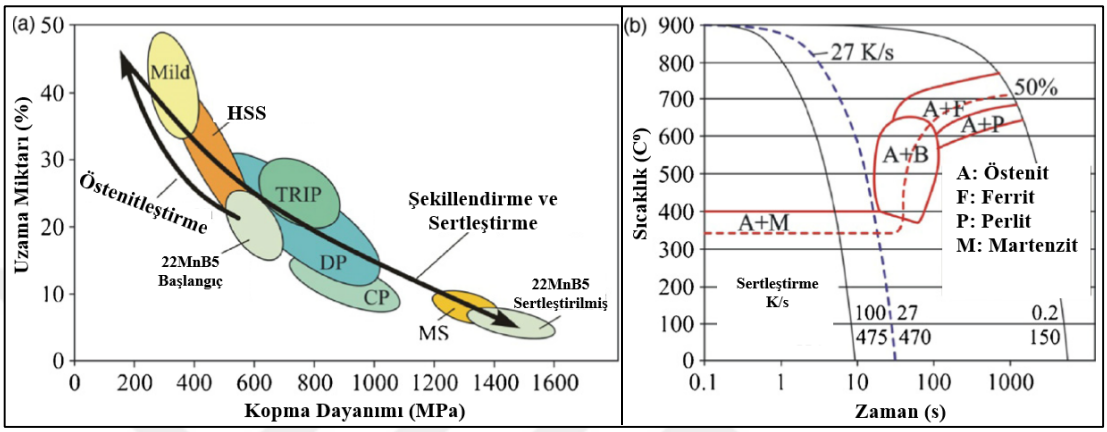
Martenzitik çelikler ise çoğunlukla martenzit, ve kalıntı miktarlarda diğer fazlardan oluşmaktadır. Çeliğin en sert fazının martenzit olduğu, ve bu şekilde üretilebilecek çeliklerin çok yüksek dayanım sahip olacağı 1960'lardan beri bilinmekteydi [31]. Pres atölyesinde şekil verilebilir sünekliğe sahip martenzitik çelikler 1990'ların sonlarında ticarileşti [19] ve 2000'lerin hemen başında özellikle kapı içi çelik bar ve tampon parçalarında kullanılmaya başlandı [29]. Bu çeliklerin şekillendirilebilirlikleri düşük olsa da, çok yüksek dayanıma sahiptirler. Bu nedenle genellikle roll-form ile şekillendirilmeleri yaygındır [30]. Bu çelikler isimlendirilmesinden de anlaşılacağı üzere mikro yapısında yüksek oranlarda martenzit içermektedirler. Mikro yapılarının şematik gösterimi Şekil 1.5'te verilmiştir [22].



Şekil 1.5. Martenzit çeliğin şematik mikro yapısı [22]

Martenzitik çeliğe preste şekil vermek zor olduğundan, sıcak şekillendirilip preste su verilerek martenzite dönüştürülen çelikler (Press hardened steel, PHS) son yıllarda güvenlik kafesi tabir edilen parçaların neredeyse tamamında kullanılmaktadır [32]. Sıcak şekillendirme diye de adlandırılan bu yöntemde kullanılan çeliklerle ilgili ilk patent 1970'lerde alınmış [33], otomotivde ilk uygulamaları ise 1980'lerde başlamıştır [34]. Bu çelikler için özel bir üretim hattı gerekmektedir [35]. Otomotivde en sık kullanılan türü 22MnB5 yapısında olan çeliklerdir. Sac malzeme 900 c^o sıcaklıkta 4~12 dakika bekletilerek iç yapısının tamamen östenitleşmesi sağlanır. Tamamen östenitleşen iç yapıdaki malzeme pres içerisine taşınıp kalıbın kapanmasıyla form verme işlemi gerçekleşir. Uygulama yöntemine göre direk su vererek ya da kalıp içi sistemlerle minimum 27 K/s hızda soğutularak (Şekil 1.6.b) içyapısı tamamen

martenzit olarak form almış son ürün olarak işlem tamamlanır (Şekil 1.6.a), istenen özelliklere göre lazer kesme ile son ölçüleri başka bir hatta kesilebilir [36]. Soğuk şekillendirme çeliklerine nazaran oldukça yavaş olan bu şekillendirme işlemleri, ilk yatırım maliyetleri ve işletim maliyetlerinin yüksek oluşu bu çeliklerin sadece önemli noktalarda kullanılmasını sınırlandıran faktörlerdir.

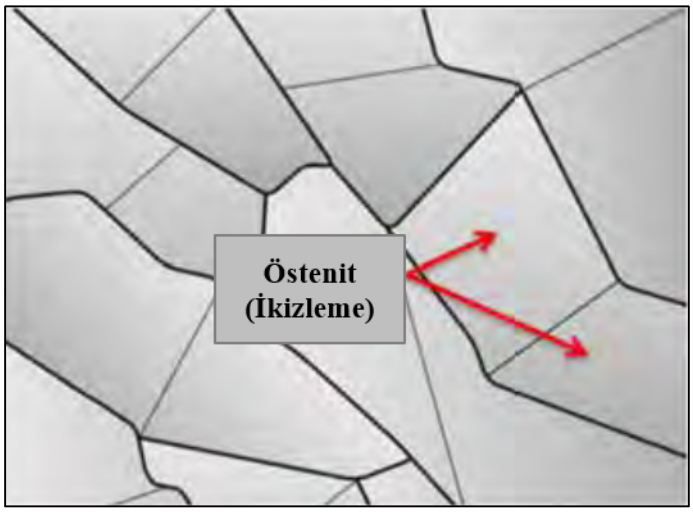


Şekil 1.6. a) Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi b) ZSD diyagramı, soğuma eğrisi [36]

1.1.2. İkinci nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler

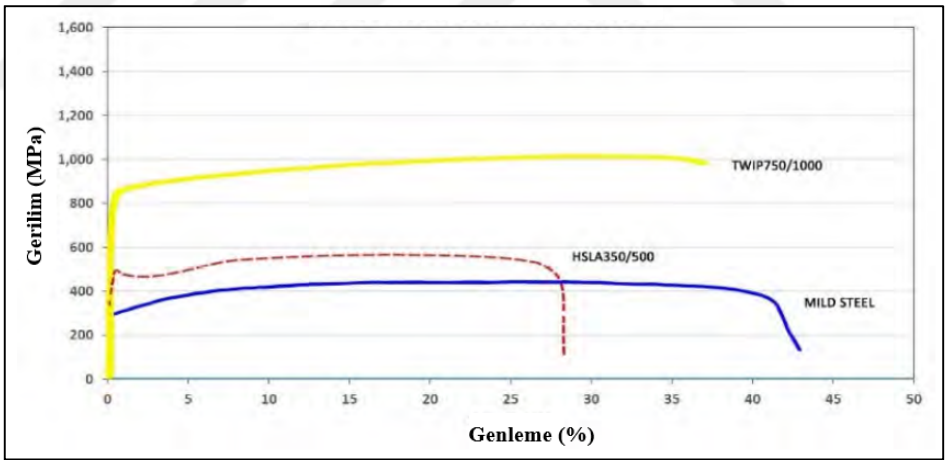
Çoğunlukla östenit fazda bulunan çelikler, 2. nesil AHSS olarak adlandırılmaktadır. Bunların ilki otomotiv gövdesinde kullanımları birkaç istisna dışında bulunmayan östenitik paslanmaz çeliklerdir. İkincisi ise ilk kez 1995'te Posco tarafından patentlenen [37], ancak adı 1998'de Grässel ve Frommeyer tarafından konan, ikizlenme ile plastisitesi artan TWIP (Twining Induced Plasticity) çelikleridir [38]. Bu çeliklerin ticarileşmesi 2010'u bulurken [39], otomotivdeki ilk uygulaması ise 2012'de başlamıştır. Günümüzde TWIP çelikleri, binek otomobillerde ön kaza komponentleri (tampon barı ve crashbox) gibi yerlerde seri üretimde kullanılmaktadır [40].

TWIP çeliklerinin yapısında %17~24 aralığında yüksek miktarda Manganez bulunmaktadır ve bu sayede oda sıcaklığında iç yapısı östenit olarak kalabilmektedir. Yük altında oluşan ikizleme deformasyonları mikro yapıyı daha ince ve daha iyi bir hale getirir. İkizleme sınırları tanecik sınırı gibi davranarak çeliği daha mukavim bir yapıya getirir. Şekil 1.7'de şematik mikro yapı gösterilmiştir [22].



Şekil 1.7. TWIP çeliklerinin şematik mikro yapısı [22]

TWIP çelikleri yüksek mukavemet değerlerinin yanında yüksek uzama değerlerine de sahiptirler. Ani sertleşme oranı (n-değeri) %30 uzama değerlerinde 0,4 oranını bulmaktadır ve bundan sonrada toplam uzama oranı %50'lere kadar sabit kalmaktadır [22]. Bu sayede enerji absorbe değerleri oldukça yüksek olmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. TWIP çeliklerinin gerilme-genleme diyagramı [22]

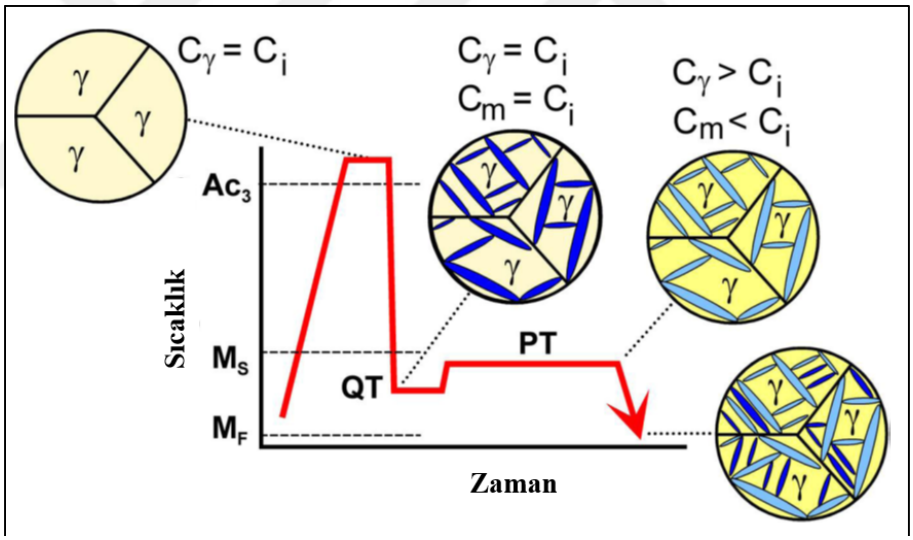
1.1.3. Üçüncü nesil gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler

İkinci nesil AHSS'de yüksek miktarda Mn ya da Cr alaşımı bulunduğundan hem maliyetleri, hem de kaynaklanabilirlikleri sorun teşkil etmektedir [41]. Bu nedenle Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından, sünekliği 1.nesil AHSS'den yüksek, alaşım miktarları 2.nesil AHSS'den düşük olan 3.nesil AHSS hedefi konmuştur [42]. 2017 itibarı ile Q&P ve TBF çelikleri ticari olarak üretilmektedir [43], NanoSteel ise bobin

ölçeğinde üretime başlanmış ve örnek B-sütunu çalışmalar için ana üreticilerde test aşamasındadır [44].

Quenching and Partitioning (Q&P, su verilmiş ve karbonları ayrıştırılmış) çelikleri ilk kez 2003 yılında Speer vd tarafından tanıtılmıştır [45]. 2012 yılından bu yana Q&P çelikleri ticari olarak üretilmektedir [46]. Bu çeliklerin Çin iç pazarındaki araçlarda kullanımı başlamıştır [47]. Amerika'da ise Auto/Steel Partnership bu çelikleri test etmiş ve Q&P980 ile B sütunu üretiminin mümkün olduğu kararına varılmıştır [48].

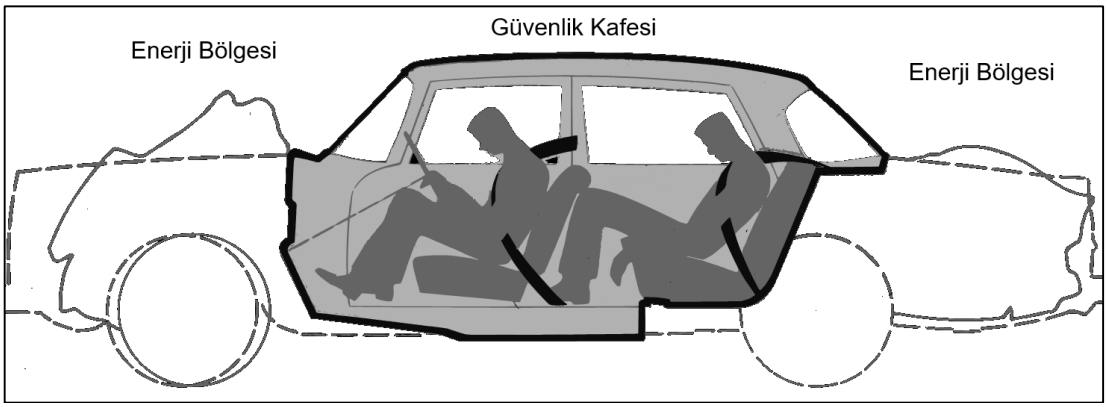
Malzemenin üretim yöntemi martenzit sac malzemelerin üretim yöntemine benzer olarak başlamakta, ancak Ms sıcaklığından sonra bir gerilme giderme tavına tabii tutularak iç yapının bölgesel dönüşüme uğratılıp, sert martenzit yapının yanında yumuşak ve oda sıcaklığında dönüşüme uğramayan kalıntı östenitlerin oluşturulması sağlanmaktadır (Şekil 1.9) [49].



Şekil 1.9. Q&P çeliğinin üretim metodolojisi [49]

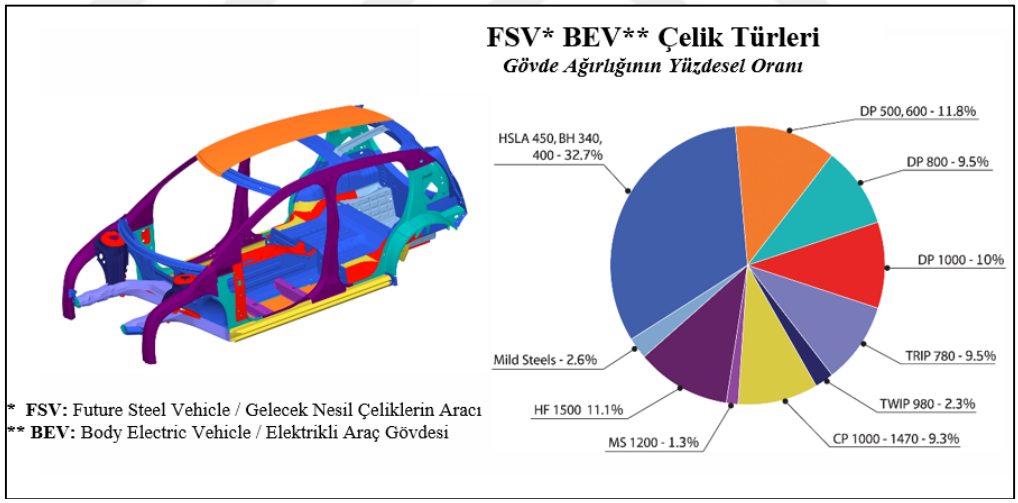
1.1.4. Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanım alanları

Yüksek mukavemetli malzemelerden araçların iki farklı bölgesi (Şekil 1.10) için iki farklı beklenti bulunmaktadır. Bunlar güvenlik kafesi bölgesi için; yüksek akma dayananmı, enerji bölgesi içinse; enerji emebilme (dayanım x süneklik) kabiliyetlerinin iyi olmasıdır [50].



Şekil 1.10. Enerji bölgesi ve Güvenlik kafesi [50]

Otomobil üreticileri yukarıda belirtilmiş olan talepler doğrultusunda parça seçimlerinde bulunmaktadırlar. Firmalar bilgi birikimlerini arttırabilmek için ortaklaşa çalışıp konsept tasarımlarda gelişimlerde bulunmaktadır. Bunun en bilindik örneklerinden WorldAutoSteel organizasyonun geliştirdiği Geleceğin Çelikleri (FSV-future steel vehicle) isimli araç konseptinde kullanılan yeni nesil çelikler ve bunların gövde üzerindeki konumları Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. Gelecek Nesil Çeliklerin Aracı; Gövde yapısı [22]

1.2.Yüksek Mukavemetli Malzemelerde Geri Yaylanma

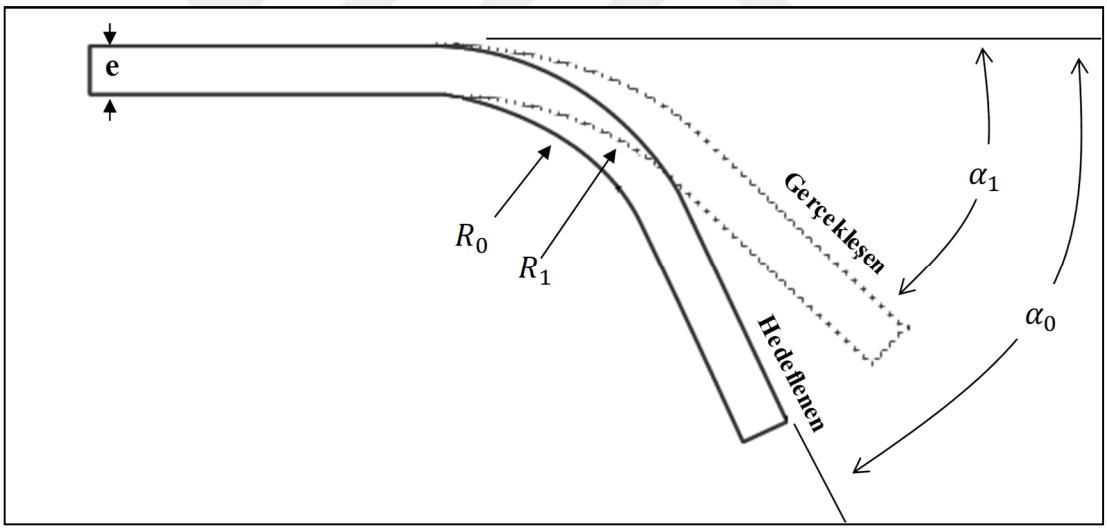
Geçmişte sac malzemeye form verme sırasında karşılaşılan en büyük problemler yırtılma ve incelme problemleriydi. Bu problemlerin ana nedeni parça tasarımlarında gereken plastik uzama katsayısının malzemenin kritik değerinden yüksek olmasıydı ve FLD (forming limit diagram – şekillendirme sınır diyagramı) üzerinde kolayca saptanabilmekteydi.

Günümüzdeki en büyük problemse parçaların beklene kalite seviyelerine ulaşamayıp tutarlı bir ölçüsel yapıya kavuşamamalarıdır. Bu problemlerinse asıl nedeni şekil verme sırasında oluşan elastik gerilmelerin giderilememesi ya da eksik giderilmesidir. Bu ölçüsel problem yani geri yaylanma sac metal şekillendirmede her zaman mevcuttu, ancak gelişmiş yüksek mukavemetli malzemelerle birlikte bu etki daha fazla oranda gözlenir olmuştur.

Büküm işlemlerinde oluşan geri yaylanma faktörü (K) $K=\alpha_1/\alpha_0$ olmak üzere Denklem (1.1) ile hesaplanabilir (Şekil 1.12);

$$K = \frac{(2R_0/e)+1}{(2R_1/e)+1} \tag{1.1}$$

K=1 geri yaylanma olmadığını, K=0 ise kalıcı şekil değişiminin olmadığını gösterir [51].



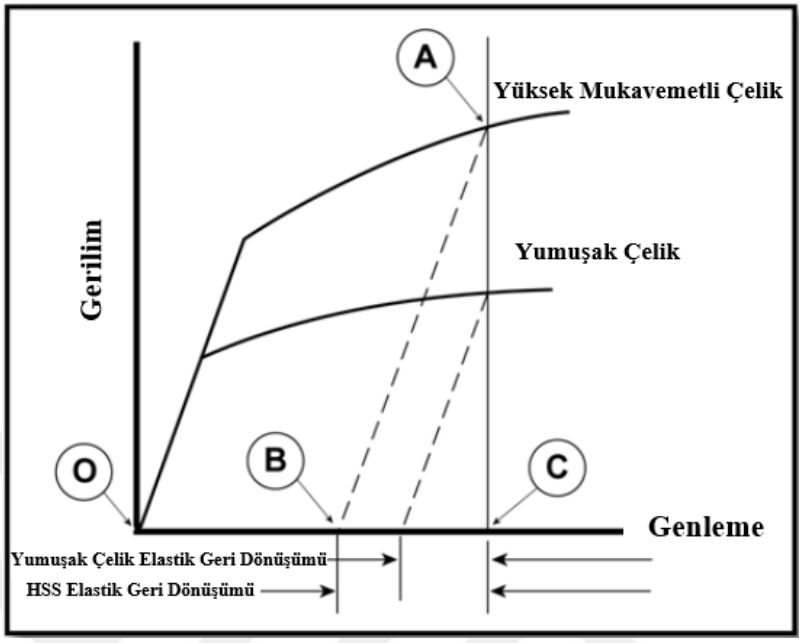
Şekil 1.12. Şematik geri yaylanma [51]

Geri yaylanma miktarı ise yaklaşık olarak aşağıdaki ampirik Denklem (1.2) ile hesaplanabilir;

$$\frac{R_0}{R_1} = 4\left(\frac{R_0\sigma_{0,2}}{Ee}\right)^3 - 3\left(\frac{R_0\sigma_{0,2}}{Ee}\right)+1 \tag{1.2}$$

Şirketlerin AHSS üzerindeki tecrübeleri, seçilen prosesin oluşacak elastik gerinimi gidermekteki yeterliliği ve de akma sınırıyla pekleşme oluşumları arasındaki ilişki geri

yaylanmayı arttırıcı unsurlar arasındadır. Geri yaylanmanın oluşu Şekil 1.13'de şematik olarak gerilim-genleme eğrisinde gösterilmiştir [22].



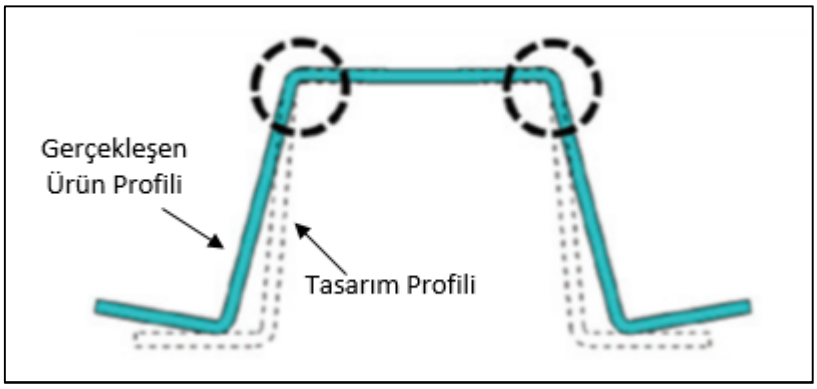
Şekil 1.13. Geri yaylanma oluşumunun şematik gösterimi [22]

A noktasında parçada plastik deformasyon oluştuğunda üzerinden yük kaldırılırsa malzeme AB çizgisini takip ederek B noktasına ulaşır. OB arasında kalan şekil değişimi plastik deformasyonu, BC arasında kalan kısımsa elastik deformasyonu yani geri yaylanmayı göstermektedir. Ayrıca Şekil 1.13'te görüldüğü üzere dayanım miktarı arttıkça elastik geri dönüşüm miktarı da artmaktadır. Bu durumun sonucunda yüksek dayanıma sahip malzemelerde yüksek geri yaylanma değerlerinin oluşması beklenmektedir.

Geri yaylanma problemi aşağıda anlatılacağı üzere 3 farklı tipte görülebilir.

1.2.1. Açı değişimi

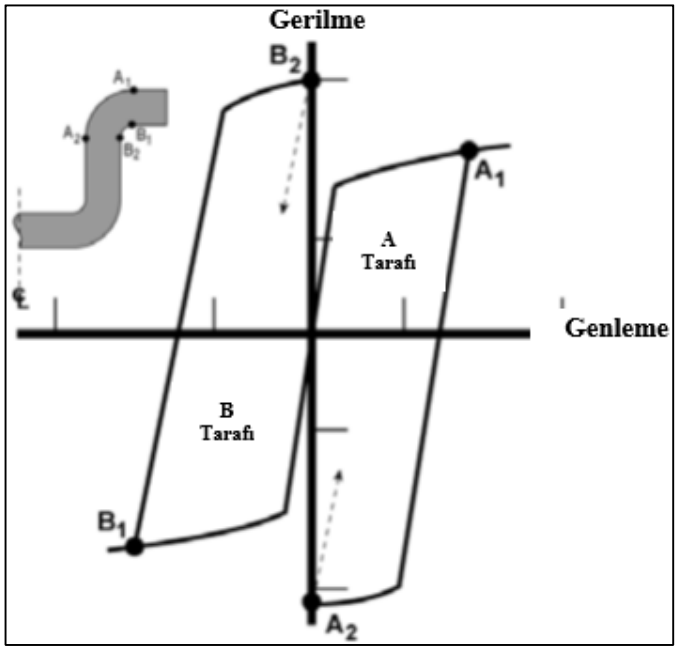
Bükme işlemi sırasında malzeme kalınlığı yönünde oluşan gerilimlerin şekil verme yükü kaldırıldıktan sonra oluşturdukları deformasyon farkıyla oluşan ve eğik duvar sorunu yoksa kalıbın köşe noktasına göre sabit olarak yer değişimine neden olan açısal değişimdir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. Açı değişimi [52]

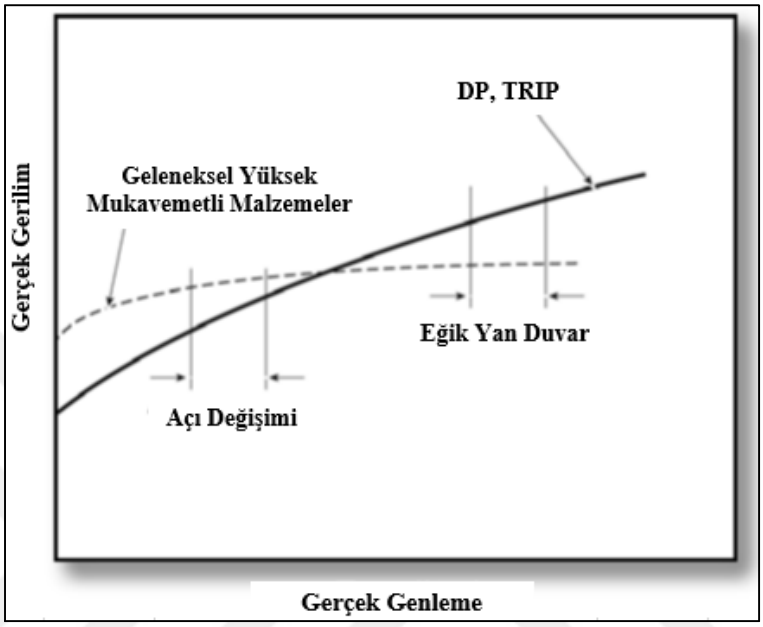
1.2.2. Eğik yan duvar

Genellikle çekme proseslerinde görülen bu geri yaylanma tipi, sac malzemenin kalınlığı boyunca oluşan gerilmelerden dolayı yan duvarda oluşturduğu elastik şekil değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 1.15'de görüleceği üzere bükülen parçanın dışı (A tarafı) çekme kuvvetine iç kısmı (B tarafı) ise basma kuvvetine maruz kalacaktır. Bu durumda basma ve çekme kuvvetlerinin oluşturduğu deformasyonlar, kalıp açıldıktan yani yük kaldırıldıktan sonra oluşacak olan elastik şekil değişim miktarlarında farklılıklar yaratacak ve yan duvarın eğik bir görüntüye kavuşmasına neden olacaktır.



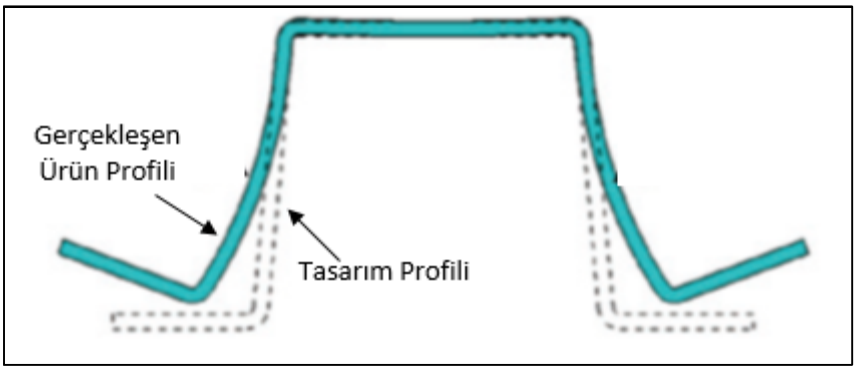
Şekil 1.15. Bükme anında oluşan çekme-basma gerilimleri [22]

Oluşan elastik deformasyon farkının yarattığı bu durum mukavemetin yüksek olmasıyla daha da artmaktadır (Şekil 1.16). Bu da geleneksel yüksek mukavemetli malzemelerle yeni nesil yüksek mukavemetli malzemeler arasındaki en temel sorunlardandır [22].



Şekil 1.16. Yüksek mukavemetli malzemelerde eğik yan duvar geri yaylanması [22]

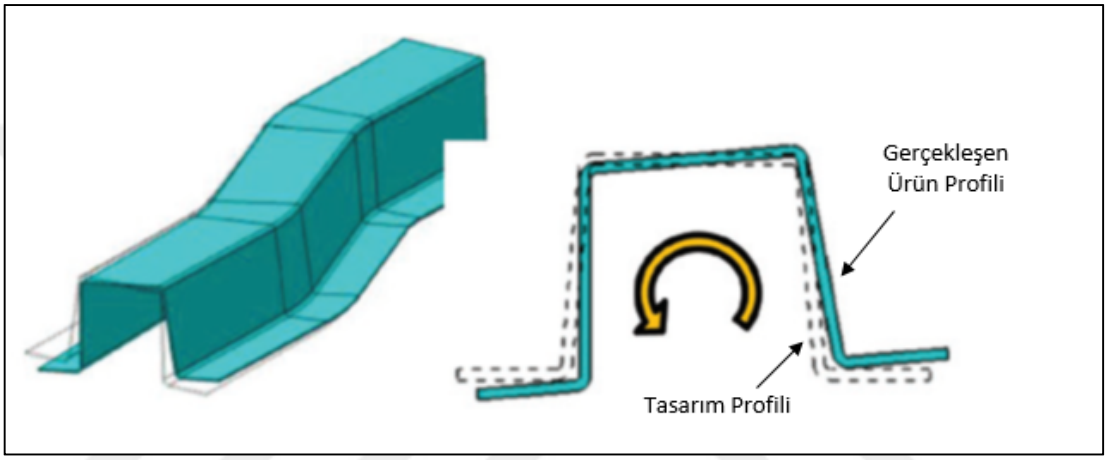
Yan duvarda iç bükey (Şekil 1.17) bir yapı oluşturacağından özellikle kaynaklanma sırasında diğer parçalarla girişim yapması ve kaynaklanabilirliği kötü etkilemesi olasıdır.



Şekil 1.17. Eğik yan duvar [52]

1.2.3. Burulma

Parça geometrisinin simetrik olmadığı ya da parçaya uygulanan kuvvetlerin dengeli olmadığı durumlarda meydana gelen bu geri yaylanma tipinde parça kesitine gelen burulma momenti oluşacak olan geri yaylanma miktarının belirlenmesinde oldukça etkindir. Parça, şekil ve malzeme kalınlığının da önemli faktör olduğu bu tipte oluşan geri yaylanma sadece yan duvarda olabileceği gibi alt büküm yüzeylerinde de meydana gelebilir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. Burulma geri yaylanması [52]

Oluşan bu geri yaylanmaların temelinde parçanın geometrisi, malzeme tipi, kalınlığı, tercih edilen şekil verme metodu ve kullanılan presler bulunmaktadır. Özellikle mukavemet değerinin artması teorik olarak geri yaylanmanın da artmasına neden olmaktadır. Ticari anlamda kullanımı en çok olan DP980 malzemeleri en yüksek geri yaylanmaya sahip olan malzemedir.

Malzemelerin mukavemetleri artarken şekillendirilebilirlikleri düşmekte ve bu durum üretim zorluklarını yanında getirmektedir.

Geri yaylanmaların giderilebilmesi için;

a) Parça geometrisinde iyileştirmeler yaparak güçlendirici olukların eklenmesi ya da oluşacak bükme momentlerini düşürebilmek için iyileştirmelerin yapılması,
b) Şekil verme metodolojisinde iyileştirmeler yapılarak parça geometrisine uygun metodun belirlenmesi,

c) Şekil vermek için gereken kuvveti uygulayacak olan presin iyi seçilmesi gerekmektedir.

Özellikle AHSS malzemelerin yaygınlaşmasıyla birlikte malzemelerin meydana getireceği geri yaylanmaların mevcut malzemelere göre kıyaslanıp ön görülerin yapılarak tasarım aşamasından itibaren geri yaylanmalara önlem alınması oldukça önem arz etmektedir. Yapılacak olan ön görüler hatalı proses seçiminin önüne geçebileceği gibi parça geometrisinin değiştirilebilmesi için tasarımcıya ihtiyacı olan bilgiyi önceden sunabilecektir. Bunlarla birlikte gerekli olan bilgilere sahip olan kalıp tasarımcısı bu bilgiler ışığında kalıplarını geri yaylanmalara uygun olarak tasarlayabilip pres altı alıştırma süresini kısaltabilecektir.

Bu kapsamda şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalar taranmış olsada DP, TWIP ve Q&P çeliklerinin birbirleriyle U profil bükme konusunda kıyaslanmasına rastlanmamıştır. 2016 yılında yapılan çalışmalardan Kılıç ve Öztürk [53] TWIP900 ile DP600'ü kıyaslamış ve TWIP900'ün daha yüksek geri yaylanma özelliklerine sahip olduğunu vurgulamışlardır. Daha yüksek dayanıma sahip TWIP çeliğinin daha fazla geri yaylanma değeri ortaya koyması beklenebilir bir durum olmuştur. Bunun yanında 2014 yılında Busch ve arkadaşlarının [54] TWIP980 ve DP980 kıyaslamasında sonuçları yakın çıkmakla birlikte TWIP980 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Diğer yandan Q&P çeliğiyle ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Wang ve arkadaşlarının [55] 2013 yılında yaptığı çalışmaya göre benzer mukavemet dayanımları altında Q&P çelikleri DP çeliklerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında ikinci nesil AHSS malzeme olan TWIP980 malzemesiyle üçüncü nesil olan Q&P1180 malzemesi, kullanımı artık gelenekselleşmiş olan çift fazlı 980 MPa mukavemete sahip DP980 malzemeye göre geri yaylanma ve şekillendirilebilirlik özellikleri açısından kıyaslanmıştır. Bunun için malzeme temininden başlamak üzere yapılan analiz çalışmasına kadar olan süreç takip eden bölüm ve alt başlıklarında açıklanmıştır. DP980 malzemesi şuan ticari anlamda en yaygın kullanılan AHSS malzeme tipi olduğundan ve özellikle hadde yönüne dik konumunda bilinen en zorlu malzemedir. Bu nedenle referans malzeme olarak seçilmiştir. Bu sayede yeni nesil AHSS'lerin kullanılmasında tasarımcıların ne ile karşılaşabileceğine yorumda bulunulabilmiştir.

2.1. Malzeme Temini

Bu çalışmada planlanan çeliklerin hiçbiri ülkemizde ticari ölçekte üretilmemektedir. Yalnızca TWIP çeliklerinin TÜBİTAK MAM tarafından deneysel miktarda üretildiği bilinmektedir. Dolayısıyla tüm çelik numuneleri yurt dışından ya da üreticilerin yerli temsilcileri vasıtası ile tedarik edilmiştir.

TWIP çelikleri halihazırda Posco (Güney Kore) ve BaoSteel (Çin) tarafından ticari ölçekte üretilmektedir. Posco firmadan bir miktar TWIP980 getirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılmak üzere 1,0 mm nominal kalınlıkta, kaplamasız ve soğuk haddelenmiş, 980 MPa kopma dayanımına sahip TWIP980 çeliği tedarik edilmiştir.

Q&P çelikleri de yine Çinli üreticiler AnSteel ve BaoSteel tarafından ticari olarak üretilmektedir. BaoSteel firmasından bir miktar Q&P1180 ithal edilmiştir. Sac malzeme 1,2 mm kalınlıkta soğuk haddelenmiş, 1180 MPa kopma dayanımına sahip Q&P1180 çeliğidir.

DP çelikleriyse mevcut durumda birden fazla Avrupalı ve de Asyalı üreticiler tarafından üretilebilmektedir. VoestAlpine firmasının üretimi olan 1,2 mm kalınlığında 980 MPa kopma dayanımına sahip çelikler ihtiyaç doğrultusunda temin

edilmiştir. Mevcut durumda ticari açıdan DP980 çeliklerinin özellikleri iyi bilindiğinden ve bu özelliklere ulaşımın kolay olması ayrıca bu özelliklerdeki bilinmezlerin yeni nesil çeliklere oranla daha az olmasından dolayı karakterizasyon çalışmaları DP980 çeliklerinde yapılmayarak, mevcut bilgiler kullanılmıştır.

2.2. Malzeme Karakterizasyonu ve Malzeme Kartının Oluşturulması

Yüksek dayanımlı çeliklerde, numunenin hazırlanış yönteminin çekme testinde elde edilebilen maksimum gerçek genlemeyi etkilediği bilinmektedir. 590 MPa kopma dayanımındaki bir çelikte açınım kesme ve lazer ile üretilen numuneler yaklaşık 0,24-0,26 gerçek genlemede koparken, su jeti ile hazırlanan numune 0,38 gerçek genlemede kopmuştur [56]. Bu çalışmada, çekme testi uzama değerleri standart ekstensometre ile değil, optik ekstensometre ile ölçülmüştür. Benzer bir çelik, standart ekstensometre ile ölçülseydi yaklaşık 0,15 gerçek genlemede kopabilirdi [57].

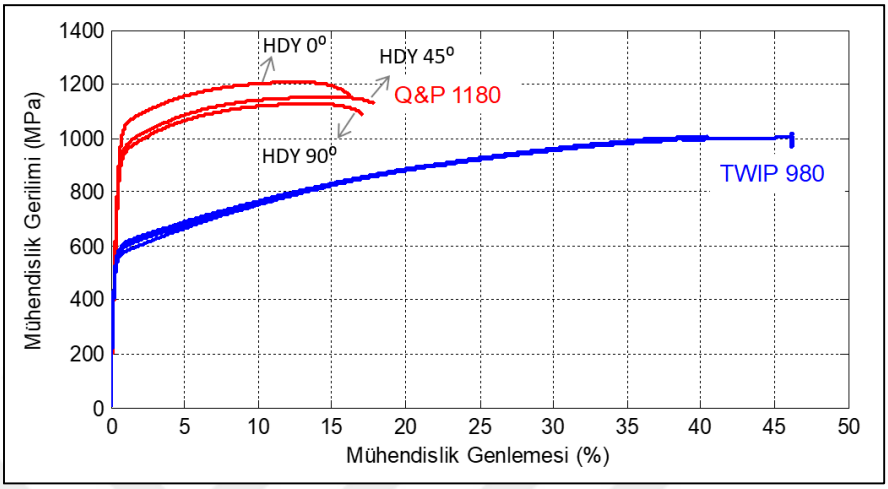
TWIP980 ve Q&P1180 malzemeleri için yapılan kimyasal içerik analizine göre DP980 ise malzeme üreticisinin hazırladığı katalog bilgilerine [58] göre malzeme iç yapıları Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Malzemelerin kimyasal içerikleri

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al
TWIP980	0,470	0,100	16,720	<0,005	<0,150	0,060	0,066	0,105	0,063	1,264
Q&P1180	0,194	1,476	~2,689	0,005	0,003	0,011	0,011	<0,002	0,004	0,033
DP980	0,215	1,000	2,900	0,050	0,010	1,400		-	0,200	0,500
	%As	%B	%Bi	%Ce	%Co	%Mg	%N	%Nb	%Pb	%Sb
TWIP980	0,011	0,001	0,060	<0,005	0,009	0,006	0,032	0,004	0,076	0,020
Q&P1180	0,002	0,001	0,031	0,008	0,002	-	0,024	0,006	0,007	<0,003
DP980	-	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-
	%Sn	%Ta	%La	%Ti	%V	%W	%Zn	%Zr	%Se	%Fe
TWIP980	<0,005	0,215	0,016	0,001	<0,005	0,107	0,003	0,013	0,041	80,360
Q&P1180	0,002	<0,010	0,005	0,004	0,003	0,011	-	0,004	-	95,450
DP980	-	-	-	-	-	-	-	-	-	balans

Çekme numuneleri hadde yönünde (HY, 0°), hadde yönüne dik (HYD, 90°) ve diyagonal yönde (DY, 45°) tel erozyon (EDM) yöntemi ile üretilmiştir. Çekme testleri, Zwick marka çekme test cihazında 20 mm/dk hızda önce standart ekstensometre kullanılarak 2 farklı malzeme (TWIP980 ve Q&P1180) için 3 farklı yönde ve 3 tekrar

ile yapılmıştır. Bu sonuçların ortalamaları Şekil 2.1 ve Tablo 2.2'de sunulmuştur. DP980, çekme test sonuçları üretici katalog bilgilerine [58] dayanılarak Tablo 2.2'ye eklenmiştir.

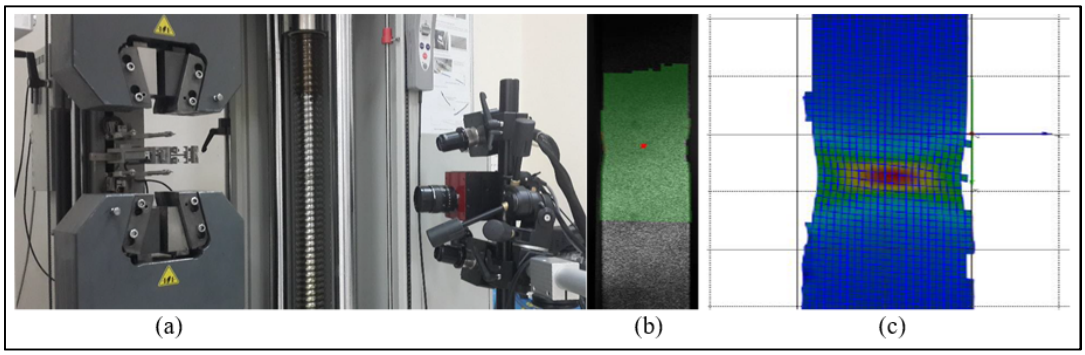


Şekil 2.1. Standart ekstensometre ile çekme testinden elde edilen mühendislik genlemesi-gerilimi eğrileri

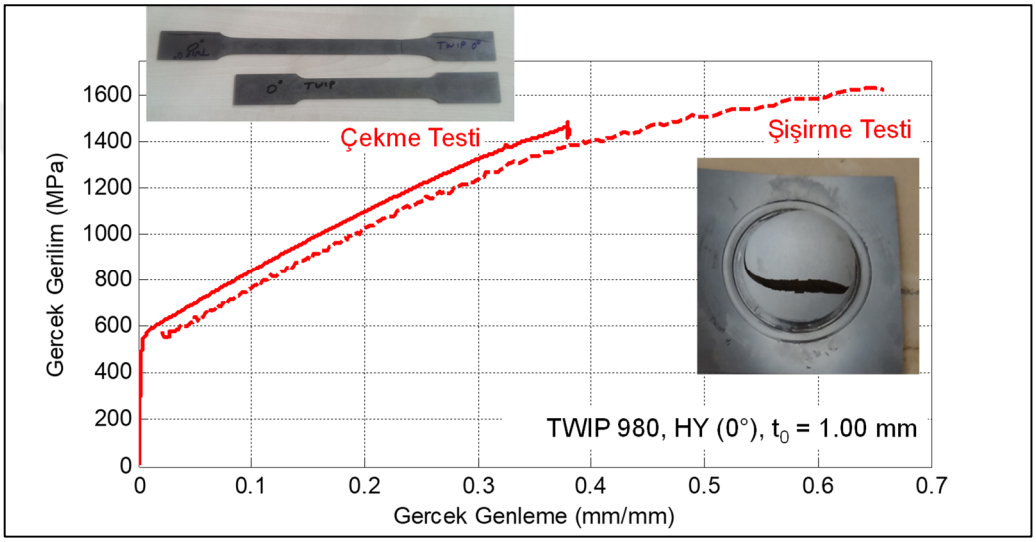
Tablo 2.2. Standart ekstensometre ile çekme testi sonuçları

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)	Lankford Parametreleri		
				R_0	R_{45}	R_{90}
TWIP980	572^{+19}_{-19}	1004^{-27}_{-18}	42^{-4}_{-2}	0,64	0,84	1,02
Q&P1180	981^{+44}_{-62}	1162^{+44}_{-34}	17^{+1}_{-1}	0,96	0,84	0,86
DP980	700^{+150}_{-150}	1055^{+75}_{-75}	$9{,}0^{+1}_{-1}$	-	-	-

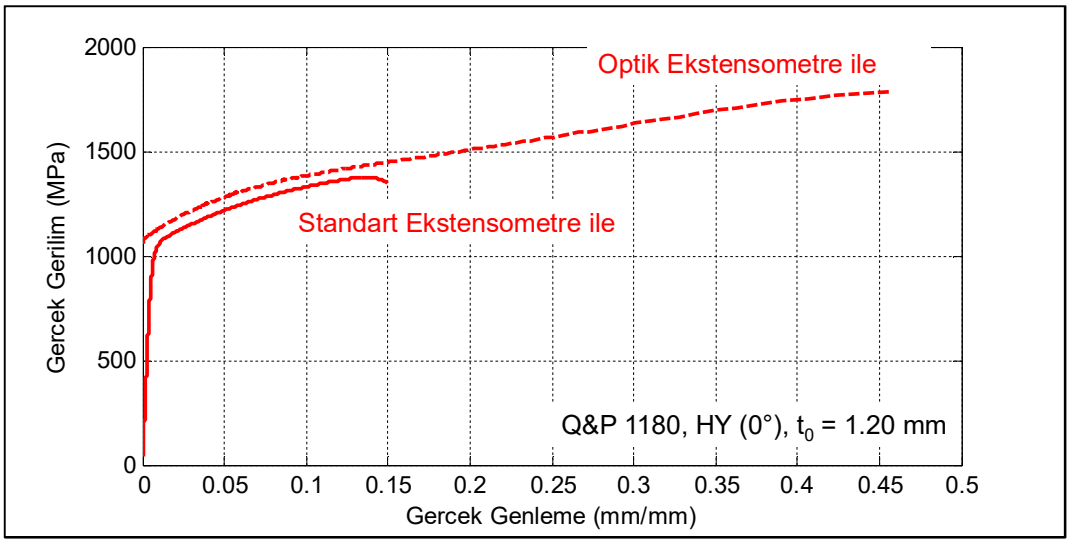
Simülasyonlarda ekstrapolasyona bağlı hataları azaltmak amacı ile, daha yüksek genlemelerdeki gerçek gerilimleri bulabilmek için gomAramis optik ölçüm sistemi (Şekil 2.2) ile çekme testi yapılmıştır. Ancak bu testlerde, TWIP980 çeliği tüm denemelerde kameranın görüş alanı dışında kırılmıştır. Bu nedenle TWIP980 çeliği için hidrolik şişirme testi ile veri toplanmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen standart ekstensometre ve optik ekstensometre/şişirme testi sonuçları Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2.2. (a) GOM Aramis sistemi ile çekme düzeneği, (b) örnek veri ve (c) örnek analiz



Şekil 2.3. TWIP980 sacı çekme ve şişirme testinin kıyaslanması



Şekil 2.4. Q&P1180 sacının standart ve optik ekstensometre sonuç kıyaslanması

Simülasyon çalışmaları için kullanılacak olan CAE programı Autoform^{plus}R7 olarak belirlenmiştir. Malzeme kartları, TWIP980 için şişirme testinden elde edilen akış eğrisi, Q&P1180'de ise optik ekstensometre ile elde edilen akış eğrileri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu bilgilere göre hazırlanan malzeme kartları Şekil 2.5.a ve Şekil 2.5.b'de gösterilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere DP980 için yeni bir malzeme kartı oluşturulmamıştır. Bu malzeme hali hazırda kullanılmakta olduğundan AutoForm programında bulunan kendi malzeme kartı kullanılmıştır. Bu kart ticari sözleşmeler gereği aşağıdaki şekilde sunulamamıştır.

```
#MaterialDefinition QP1180
    Youngs     210000.
    Poisson       0.3
    SpecificWeight 7.85E-5
    Hardening
        0    0.00000       1057.900
        1    0.01150       1137.200
        2    0.01640       1160.000
        3    0.02930       1211.000
        4    0.03880       1245.600
        5    0.05220          1284.600
        6    0.07110       1330.400
        7    0.08770       1363.000
        8    0.10570       1391.300
        9    0.11640       1406.100
       10    0.14370       1440.100
       11    0.18080       1484.300
       12    0.20820       1516.900
       13    0.24640       1563.600
       14 |  0.30950       1643.500
       15    0.45820       1789.000

# Anisotropie

       R-Values   0.960  0.840  0.860

# Grenzformaenderungskurve QP1180, s = 1.2 mm

    Failure
        0   -0.09     0.29
        1   -0.04     0.22
            2    0.00     0.18
        3    0.03     0.19
        4    0.10     0.27
        5    0.33     0.38
```

(a)

```
#MaterialDefinition TWIP980_V4

Youngs 200000.
Poisson 0.3
SpecificWeight 7.7E-5
Hardening
0        0.00000 553.500
1        0.04130 694.300
2        0.06870 773.700
3        0.10310 817.100
4        0.13570 960.300
5        0.16710 1043.200
6        0.19030 1101.600
7        0.22060 1175.200
8        0.25800 1262.300
9        0.27290 1295.900
10       0.29450 1343.500
11       0.30230 1357.700
12       0.31230 1378.300
13       0.33360 1418.800
14       0.36780 1476.700
15       0.37190 1491.200

R-Values 0.640 0.840 1.020

ReferenceThickness 1.4
Failure
0        -0.29    0.55
1        -0.14    0.45
2        -0.03    0.38
3        0.00     0.37
4        0.07     0.40
5        0.30     0.47
```

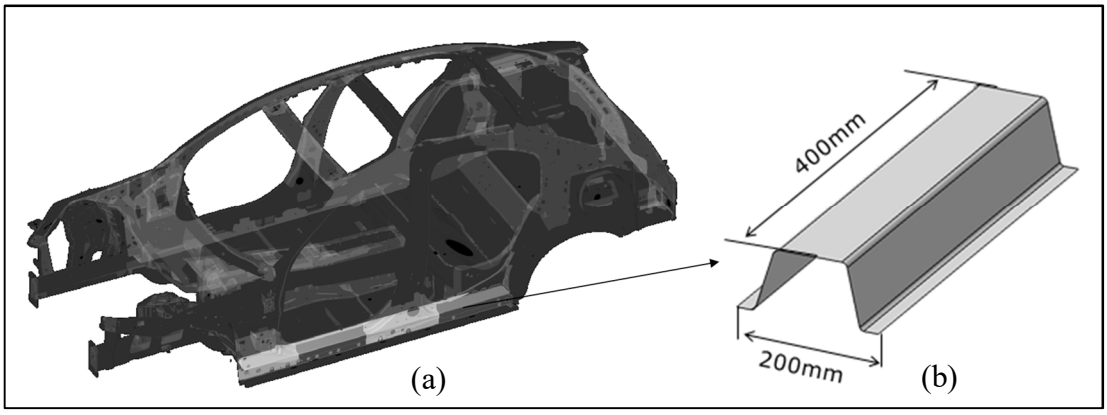
(b)

Şekil 2.5. Oluşturulan malzeme kartları (a) Q&P1180 (b) TWIP980 için

2.3. Prototip Parça Seçimi ve Tasarımı

Marşpiyeller araçların yandan aldıkları darbelerde mukavemetlerini belirleyen en önemli parçalardandır (Şekil 2.6.a) [58]. Yandan gelen darbelerde enerjiyi sönümleyerek yolcu kabinine çarpışma enerjisini ulaştırmaması beklenmektedir [59]. Mevcut durumda bu parçalar DP980 çeliğinden üretilmektedir. Bu çalışma ile daha ince saclar kullanılsa bile daha yüksek enerji emilimi (TWIP980) ya da daha yüksek dayanım sunabilecek (Q&P1180) çeliklerin geri yaylanma özellikleri kıyaslanmıştır.

Bu amaçla, Şekil 2.6.b'de gösterilen "ölçeklendirilmiş" bir parça geometrisi seçilmiştir.



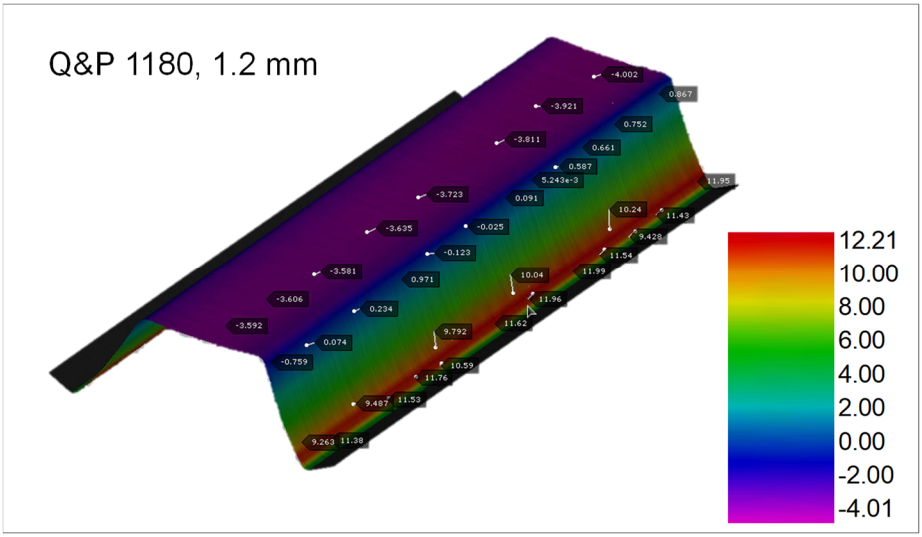
Şekil 2.6. (a) Seçilen parçanın gövdedeki yeri, (b) ölçeklendirilmiş prototipin ilk taslağı.

2.4. Geri Yaylanma Simülasyonları ve Prototip Parça Revizyonları

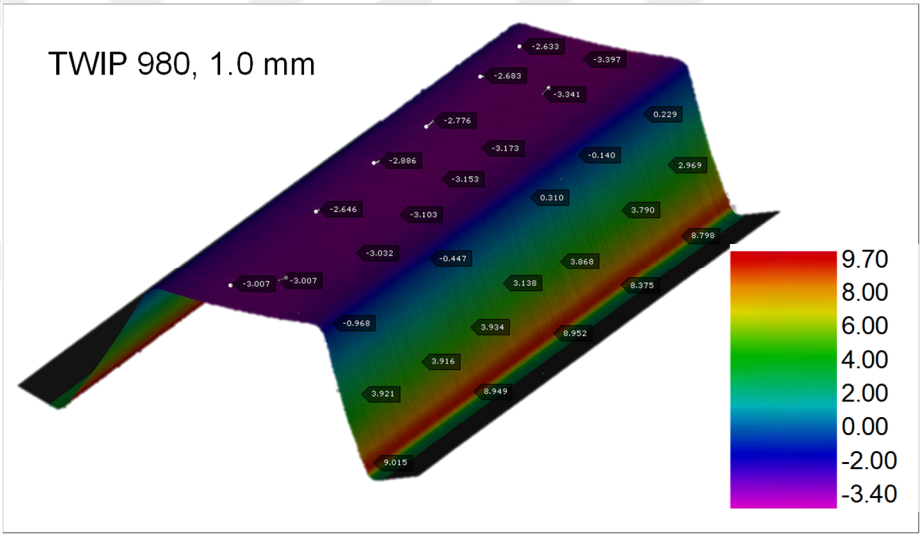
Seçilen ölçekli parça geometrisi, AutoFormR7 programında modellenmiştir. Şekillendirme Sınır Diyagramları (Forming Limit Curves), Arcelor V9 modeliyle program tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır [60]. Bu modelin temel seçim sebebi sac malzemelerde 0,5 mm ve 3,5 mm aralığında ve 260 MPa ile 1500 MPa arasındaki modellemelerde güvenilir modellemeler yapabilmesidir [61].

Simülasyon çalışmasında amaç hesaplanan geri yaylanmaların olabildiğince azaltılabileceği optimum parça tasarımını yakalamak olmuştur. Prototip parçalar kıyaslama amacıyla kullanılacağından geri yaylanmanın tamamen giderilip tolerans aralığına alınma ihtiyacı söz konusu değildir. Amaç DP980 malzemeye göre ne kadar farklılık oluşacağının görülebilmesi ve buna göre yorumda bulunabilmektir.

İlk tasarım simülasyonda TWIP980 ve Q&P1180 malzeme kartlarıyla simüle edilmiştir. Çıkan sonuçlar Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de sunulmuştur.



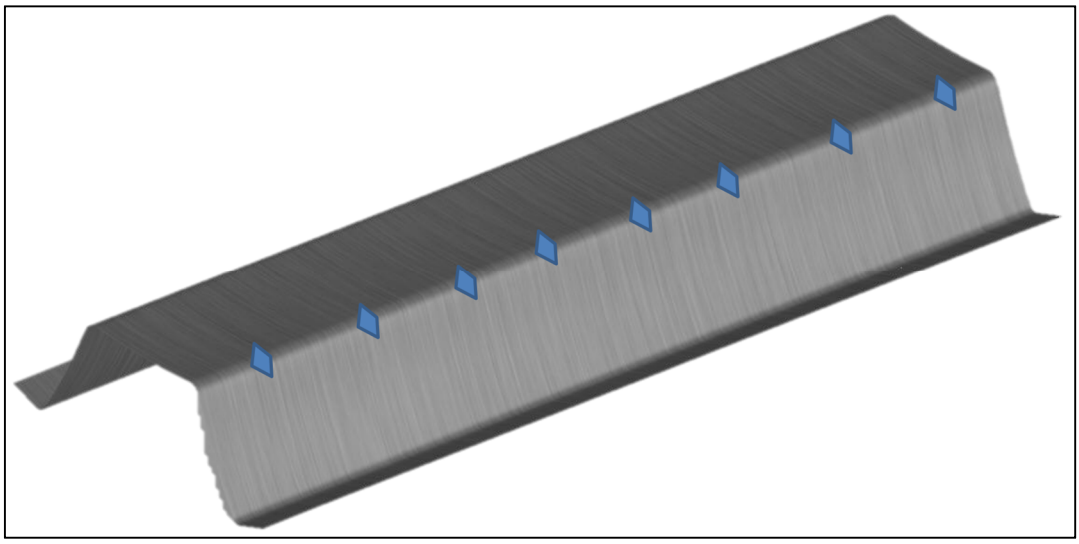
Şekil 2.7. Q&P1180 çeliğinin ilk tasarıma göre geri yaylanma mesafeleri mm cinsinden



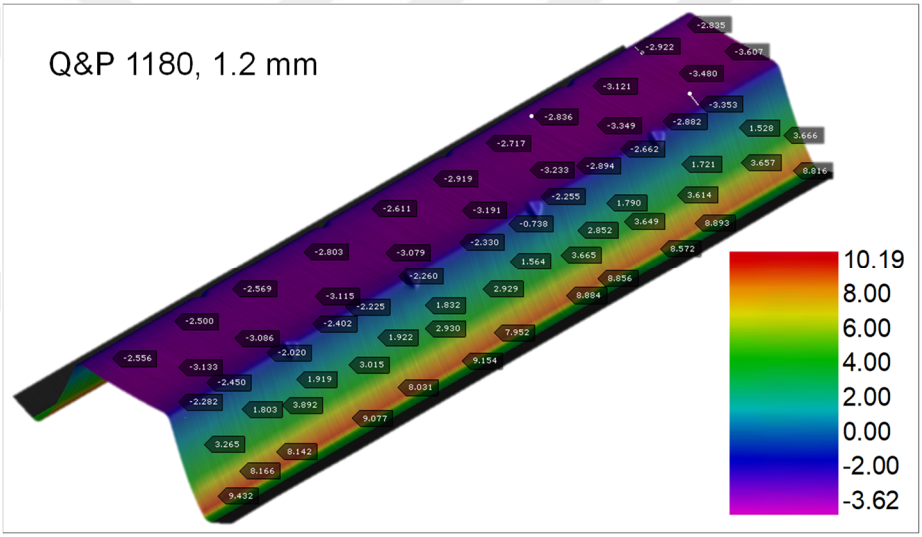
Şekil 2.8. TWIP980 çeliğinin ilk tasarıma göre geri yaylanma mesafeleri mm cinsinden

İlk tasarımın simulasyon sonuçlarında eğik duvar ve açısal değişim geri yaylanmaları tespit edilmiştir. Bu geri yaylanmaları giderebilmek için Şekil 2.9'da gösterilen kuvvetlendirici formlar parça datasına işlenerek simulasyon tekrar edilmiştir. Bu simülasyonun sonuçları Q&P1180 için Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Özellikle Q&P1180 seçilmesinin nedeni en yüksek geri yaylanmanın bu malzemede tespit edilmiş olmasıdır.

Revizyon öncesi ve sonrası kıyaslaması ise Tablo 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.9. Prototip tasarıma kuvvetlendirici formların eklenmesi

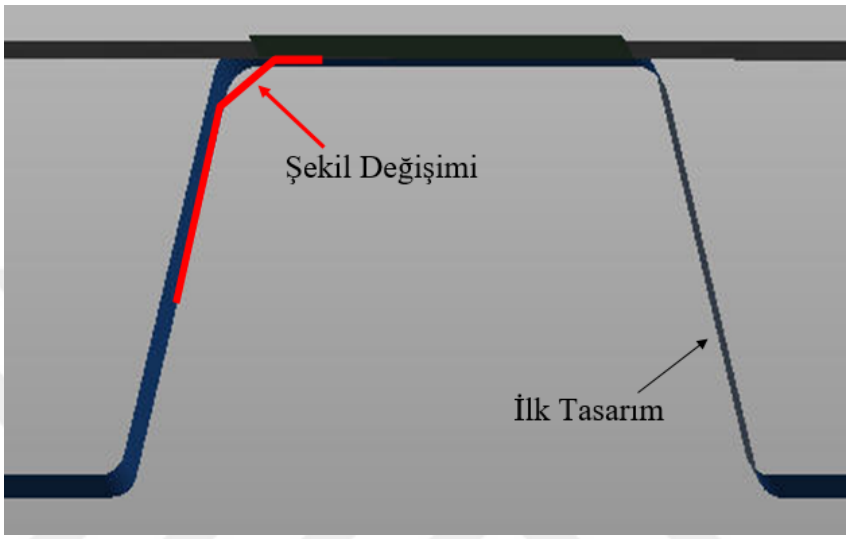


Şekil 2.10. İlk revizyon sonrası Q&P1180 malzemesinin geri yaylanması

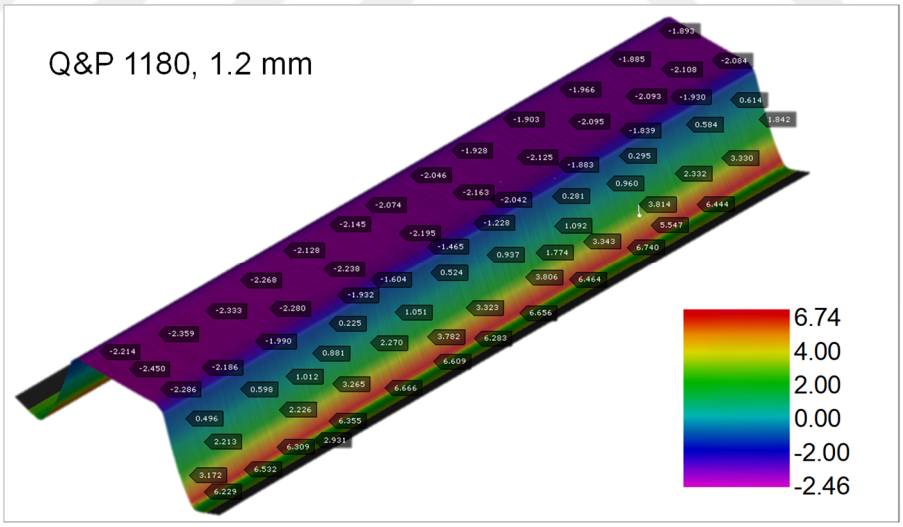
Tablo 2.3. İlk revizyon sonrası olan değişimlerin karşılaştırılması

Malzeme	İlk Tasarım	İlk Revizyon
Q&P1180	+12,21	+10,19
	-4,01	-3,62
TWIP980	+9,70	6,99
	-3,40	-2,45

Güçlendirici formların yeterince fayda sağlamadığı görülünce özellikle açı değişimini biraz daha azaltabilmek adına üst köşelerde şekil değişikliğine gidilerek tek geçiş ile olan keskin açı iki geçişle düşük açılarda yapılmıştır. Bu durum Şekil 2.11'de, Q&P1180 çeliğinde oluşan geri yaylanma Şekil 2.12'de ve bu iyileştirmenin ilk tasarıma olan kıyaslaması Tablo 2.4'te özetlenmiştir.



Şekil 2.11. Tasarım revizyon 2

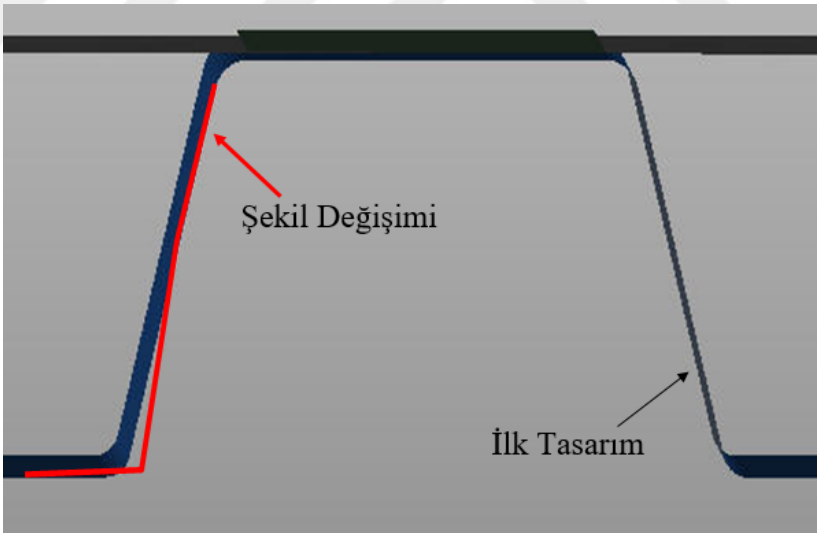


Şekil 2.12. Q&P1180 çeliğinin revizyon 2'de oluşan geri yaylanma sonucu

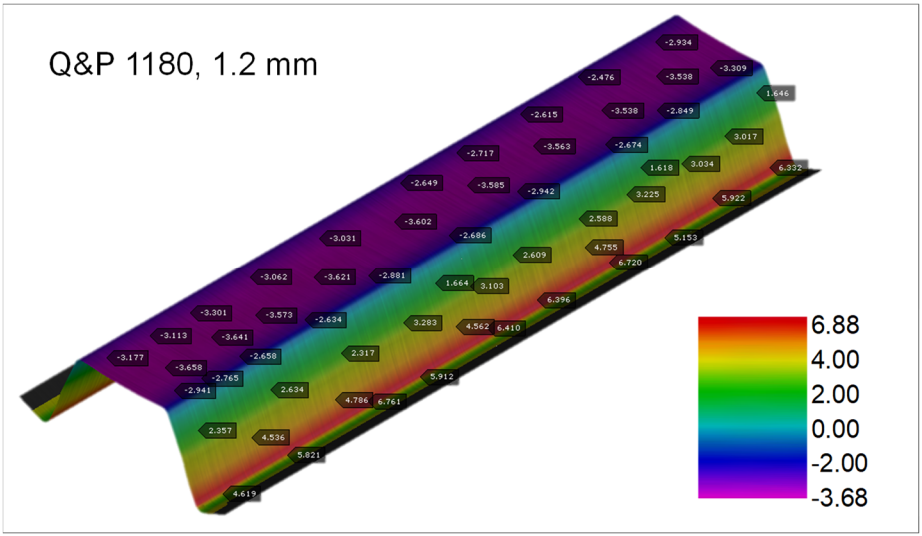
Tablo 2.4. Revizyon 1 ve 2'nin ilk tasarıma göre kıyaslanması

Malzeme	İlk Tasarım	Revizyon 1	Revizyon 2
Q&P1180	+12,21	+10,19	+6,74
	-4,01	-3,62	-2,46
TWIP980	+9,70	6,99	5,30
	-3,40	-2,45	-1,77

Güçlendirici formlar olmaksızın ikinci revizyonun daha iyi etki ettiği görülmüştür. Bu nedenle güçlendirici formların dahil edilmemesi planlanmıştır. Açısal değişimin oldukça azaldığı ancak eğik duvar sorununun devam ettiği parçalarda saptanmıştır. Bu nedenle üçüncü revizyon parçaya uygulanarak yan duvarın orta bölgesine ek bir bükme eklenmiştir. Bu sayede yan duvarın daha stabil hareket edeceği düşünülmüştür. Bu revizyon Şekil 2.13'de, Q&P1180'de oluşan geri yaylanmalar Şekil 2.14'te, bunların ilk hal ve bir önceki revizyonlarla kıyaslanması ise Tablo 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.13. Tasarım revizyon 3

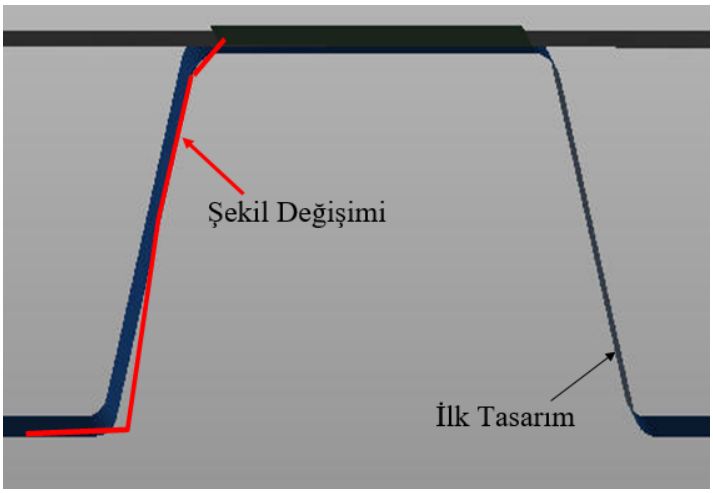


Şekil 2.14. Q&P1180 çeliğinin revizyon 3'de oluşan geri yaylanma sonucu

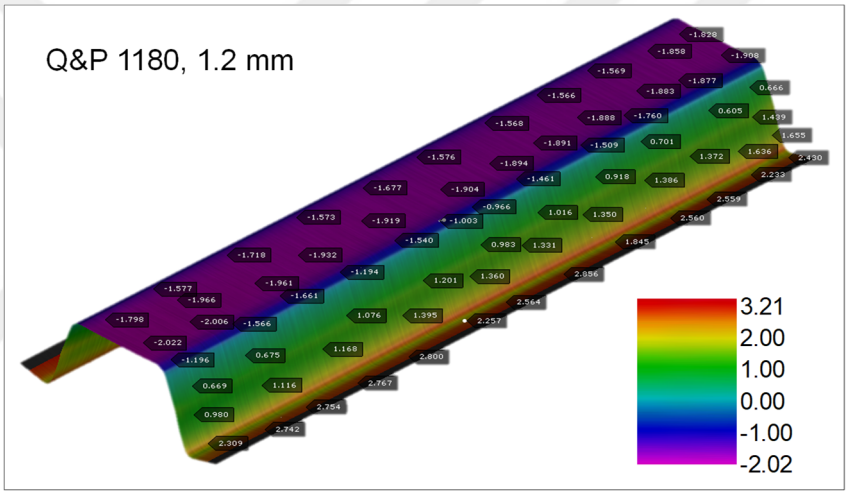
Tablo 2.5. Revizyonların ilk tasarıma göre kıyaslanması

Malzeme	İlk Tasarım	Revizyon 1	Revizyon 2	Revizyon 3
Q&P1180	+12,21	+10,19	+6,74	+6,88
	-4,01	-3,62	-2,46	-3,68
TWIP980	+9,70	6,99	5,30	+3,65
	-3,40	-2,45	-1,77	-2,09

Üçüncü revizyon da ikinci revizyonla benzer sonuçlar vermiştir. Bunun sonucunda tasarımda ikinci ve üçüncü revizyonların birleştirilerek dördüncü ve son revizyonun yapılmasına karar verilmiştir. Son revizyon Şekil 2.15'te, son hale göre Q&P1180 malzemesinde oluşan geri yaylanmalar Şekil 2.16'da, son durumun tüm revizyonlara olan kıyaslaması Tablo 2.6'da ve tasarımın son hali için parçanın teknik detayları Şekil 2.17'de sunulmuştur.



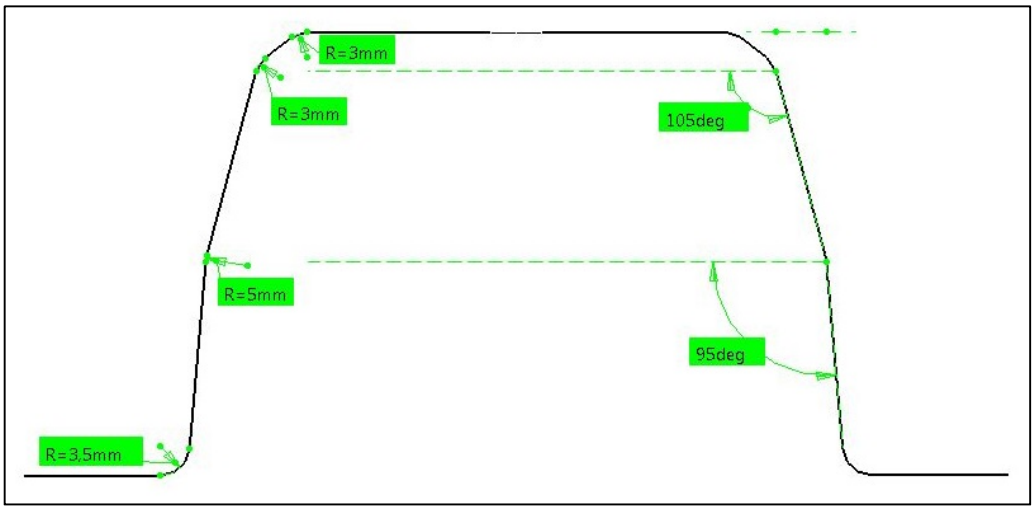
Şekil 2.15. Tasarım revizyon 4



Şekil 2.16. Q&P1180 çeliğinin revizyon 4'te oluşan geri yaylanma sonucu

Tablo 2.6. Revizyonların ilk tasarıma göre kıyaslanması

Malzeme	İlk Tasarım	Revizyon 1	Revizyon 2	Revizyon 3	Revizyon 4 (Son Tasarım)
Q&P1180	+12,21	+10,19	+6,74	+6,88	+3,21
	-4,01	-3,62	-2,46	-3,68	-2,02
TWIP980	+9,70	6,99	5,30	+3,65	+2,63
	-3,40	-2,45	-1,77	-2,09	-1,48
DP980	Nihai tasarım kıyaslama malzemesiyle de simüle edilmiştir.				+3,04
					-0,94



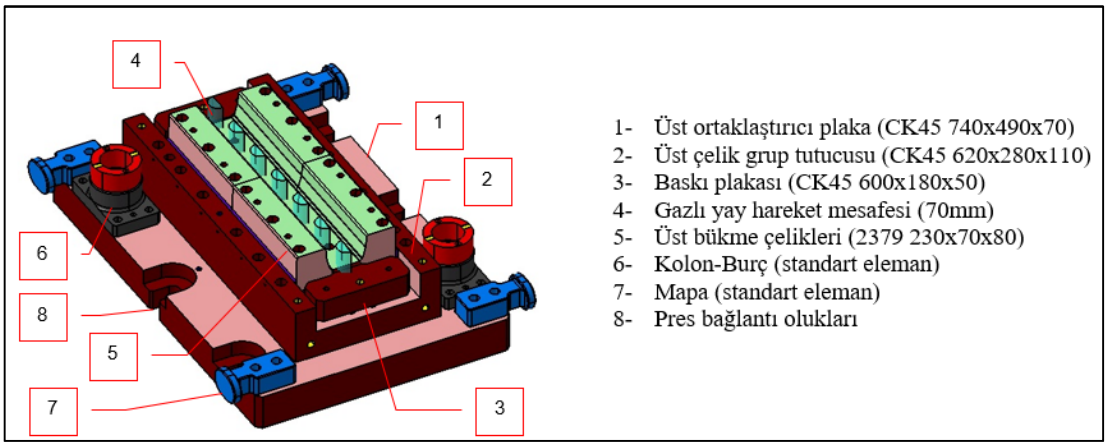
Şekil 2.17. Revizyon 4'e göre parça kesitinin son hali

2.5. Kalıp Tasarımı ve İmalatı

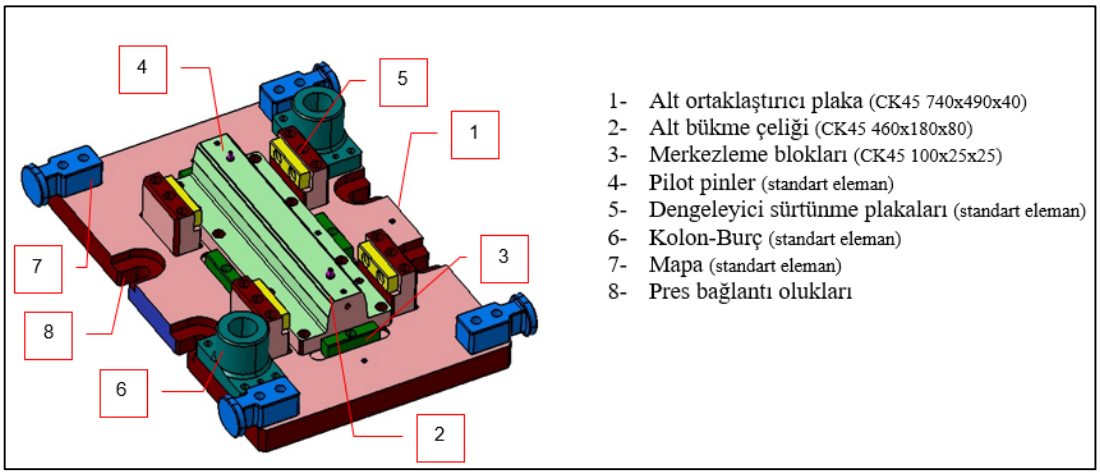
Kalıp komponentlerinin tasarımı, Revizyon 4 tasarımına uygun olarak yapılmıştır.

Parçanın sac kalınlık yönünün aşağı (-z koordinatında) doğrultuda olması planlanmıştır. Denenecek numunelerin sac kalınlıkları 1,0 ve 1,2 mm'dir. Bu doğrultuda kalıp boşluğunun 1,2 mm olması planlanmıştır. Kalıp, üst kalıp çeliklerinin data ölçüsünde olduğu kabul edilerek alt çeliklerde alıştırma yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

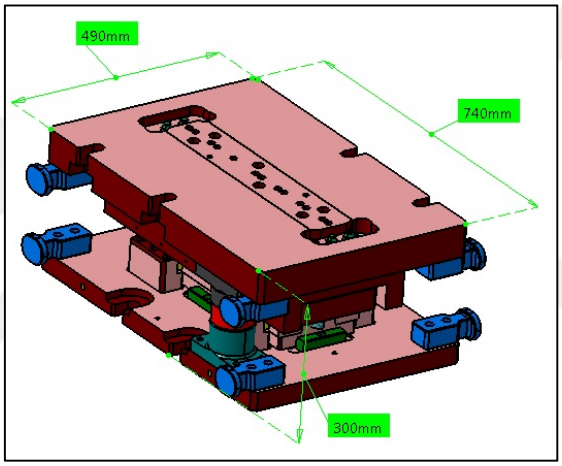
Tasarım sonucunda üst ve alt kalıbın şematik montajlı görünümü Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'daki gibi olmuştur. Bununla birlikte kapalı kalıp görünümü ise Şekil 2.20'deki gibidir.



Şekil 2.18. Üst kalıbın genel görünümü ve standart elemanları

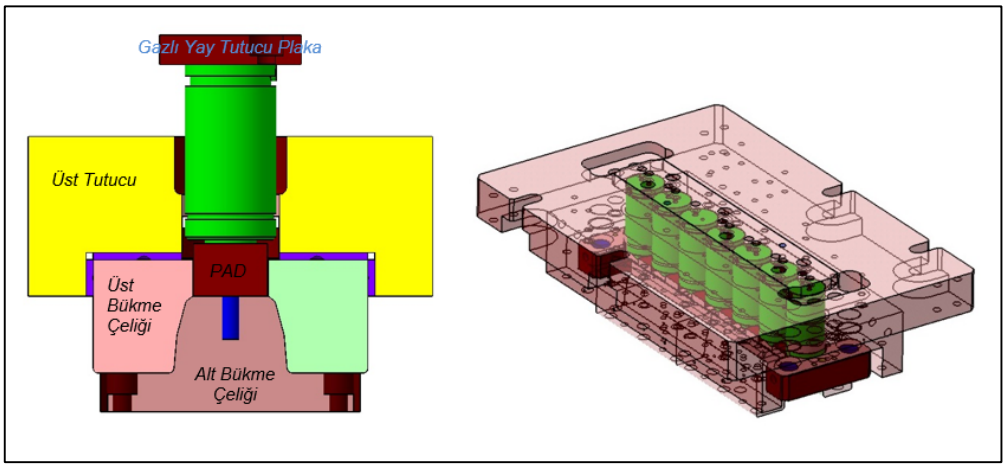


Şekil 2.19. Alt kalıbın genel görünümü ve standart elemanları



Şekil 2.20. Kapalı kalp görünümü ve boyutları

Yukarıda genel görünümleri verilen kalıp tasarımının kalıp yüksekliği 300 mm olarak planlanmıştır. Ayrıca kalıp içerisinde gazlı yaylarında (Şekil 2.21) kullanılarak ilk tutmayı yapması sağlanmıştır. Bu sayede bükme işlemi öncesinde malzemenin orta kısımdan tutulacaktır. Ayrıca ön ve arka kısımlarına eklenen iki pilot pim ile kalıp içi merkezleme gerçekleştirilmiştir. Özel olarak pilot pim çapları farklı tasarlanmıştır. Bu sayede kıyaslamalarda parçaların ön ve arka kısımlarının karışmaması olası kalıp kusurlarının parça üzerine etkisinin aynı ölçüde değerlendirilebilmesi sağlanabilmiştir.

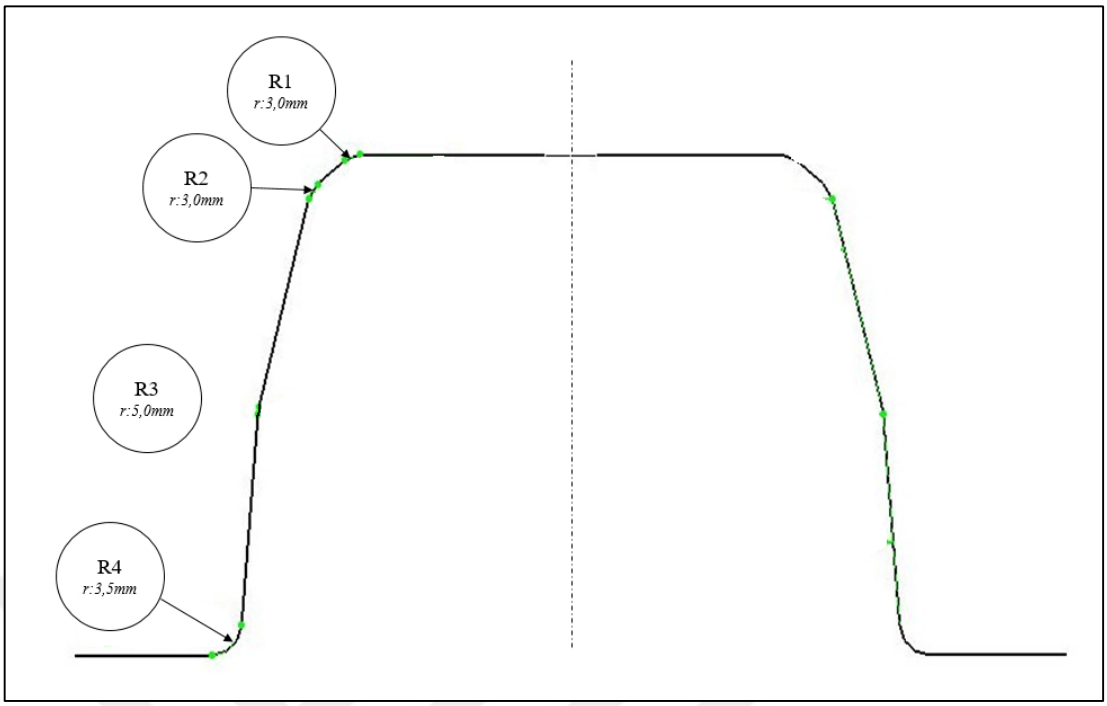


Şekil 2.21. Gazlı yayların kullanılması ve kalıbın iç görünümü

Baskı plakasının (Ped plaka) uygulaması gereken tutma kuvvetinin tespiti için öncelikle teorik olarak bükme kuvvetinin bulunması gerekmektedir. Bunun için dikdörtgen kesitli bir konsol kirişin bükülme işine benzetilmesine bağlı olan [51] aşağıdaki Denklem (2.1)'den yararlanılmıştır.

$$P_U = k\frac{\sigma w e^2}{L} \tag{2.1}$$

Burada L üst ve alt kalıpların radyus geçişleri ve matris ile ıstampa arasında kalan boşluğunun toplamına denk gelmektedir. Prototip tasarımda 4 farklı büküm noktası bulunmaktadır. Bunlar Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Prototip parça büküm noktaları

Şekil 2.22'de görüldüğü üzere ortadan simetrik olan parçada 4 farklı büküm mevcuttur. Buna göre teorik olarak toplam bükme kuvvetinin bu 4 bükümün toplamı olduğu söylenebilmektedir. Uygulama konusu olan malzemeler içerisinde en yüksek mukavemet değeri Q&P1180 malzemelerinde bulunmaktadır. Ayrıca bu malzemenin sac kalınlığı 1,2 mm olduğundan kalıp yapısında ihtiyaç duyulabilecek en yüksek tutma kuvveti yine bu malzemede oluşacaktır. İlgili bilgiler ışığında toplam bükme teorik kuvveti (P_{U_t}) aşağıdaki Denklem (2.2) ile hesaplanmıştır.

$$P_{U_t}=P_{U_1}+P_{U_2}+P_{U_3}+P_{U_4} \tag{2.2}$$

$$P_{U_{1+2}} = 0{,}667\frac{1180x(400+400)x1{,}2^2}{(3+1{,}2+3)}x2 \tag{2.2a}$$

$$P_{U_{1+2}} \cong 252 \text{ kN} \tag{2.2b}$$

$$P_{U_3} = 0{,}667\frac{1180x(400+400)x1{,}2^2}{(5+1{,}2+5)} \tag{2.2c}$$

$$P_{U_3} \cong 81 \text{ kN} \tag{2.2ç}$$

$$P_{U_4} = 0{,}667\frac{1180x(400+400)x1{,}2^2}{(3{,}5+1{,}2+3{,}5)} \tag{2.2d}$$

$P_{U_4} \cong 111$ kN (2.2e)

$P_{U_t} = P_{U_1} + P_{U_2} + P_{U_3} + P_{U_4}$ (2.2f)

$P_{U_t} \cong 444$ kN (2.2g)

Kalıp tasarımı sırasında gerçek bükme kuvvetlerinin bulunması oldukça zordur. Buna rağmen bulunan bükme kuvveti (P_{U_t}) ile ped plaka tutma kuvveti (P_G) arasında sektörde $P_G=(1/3\sim1/5)P_U$ bağıntısı bulunmaktadır. Bükme kuvveti teorik hesaplaması dik yüzeyler için öngörülmektedir. Ancak parça üzerinde dik büküm mevcut değildir. Bu da toplam kuvvetin düşmesi anlamındadır. Bu nedenle tutma kuvvetinde de en düşük katsayının seçilmesinde engel görülmemektedir. Buna göre tutma kuvveti teorik olarak Denklem (2.3) ile hesaplanmıştır;

$$P_G = {}^{1}\!/_{5}\, P_{U_t} \quad (2.3)$$

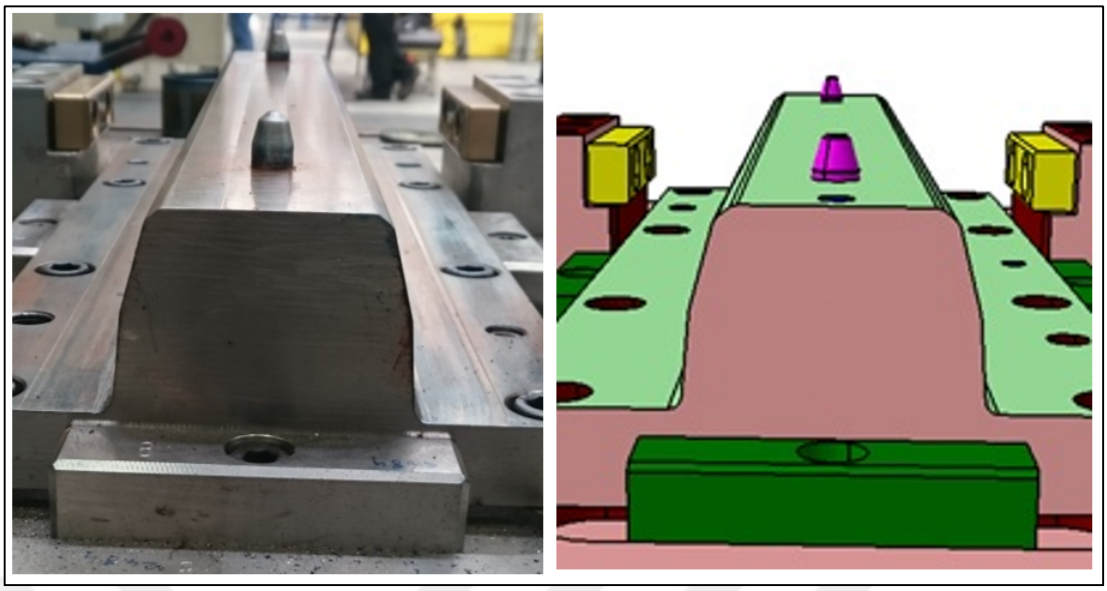
$P_G \cong 88{,}8$ kN olarak hesaplanmıştır.

Baskı plakasının dengeli çalışabilmesi için dar bir bölgeye eşit aralıklarla gaz tanklarının yerleştirilmiştir. Bu bilgiler ışığında 150 bar basınç altında 15 kN yük uygulayabilen gaz tanklarından 7 adet kullanılmıştır. Böylece toplamda 105 kN'luk tutma kuvveti sağlanabilmiştir.

Gazlı yaylarda olduğu gibi kalıp komponentlerinde standart elemanlarda kullanılmıştır. Cıvata, pilot pim, kolon-burç ikilileri, mapalar ve yağsız sürtünme plakaları standart ekipman üreticilerinin kataloglarından kalıp tasarımına uygun olarak seçilmiştir.

Bunların yanında aşırı yüklemelere maruz kalmayacak alanlarda alaşımsız karbon çeliği olan CK45, bükme işleminin aşırı yük bindireceği hassas bölgelerde ise soğuk iş takım çeliği olan 2379 (X155CrVMo12-1) çeliği tercih edilmiştir.

Kalıp, tasarıma uygun olarak imal edilip montajı sağlanmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. İmalat ve tasarım görünümleri

Montaj işlemi tamamlanan kalıp, alıştırma presi altında imalat hatalarını gidermek için denemeye alınarak gereksiz vuruntular ve parça alıştırmaları yapılmıştır. Kalıplar taranarak tasarım ile kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda tasarım toleranslarının içerisinde olduğu görülerek bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

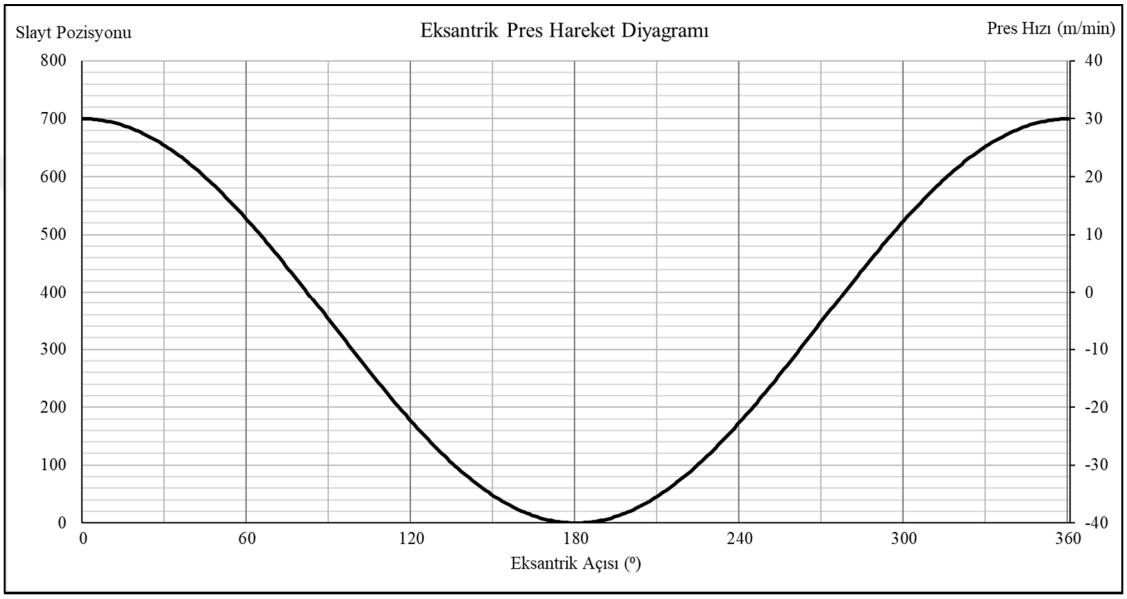
2.6.Prototip Parçaların Üretimi

Tasarımı gerçekleştirilen parçanın acınım ölçüleri 400*200 mm'dir ve yukarıda da belirtildiği gibi kalıp içi merkezlenmenin sağlanabilmesi için iki adet pilot pim deliği bulunmaktadır. Bunun için temin edilen TWIP980 ve Q&P1180 malzemeleri istenen ölçülerde abkant preste kesilip lazer kesimde pilot pim delikleri açılmıştır. Aynı şekilde DP980 malzemelerde temin edilmiştir. Hadde yönünün geri yaylanmaya ciddi oranda etkisi olduğundan ve bu etkinin yadsınamaz oluşundan dolayı numuneler hem hadde yönünde (0^o) hem de hadde yönüne dik (90^o) olarak hazırlanmıştır.

Malzemeler, Fagor marka ve 12.000 kN uygulayabilen H tipi eksantrik preste, Şekil 2.24'teki hareket diyagramına göre ve ortalama 4.000 kN yük altında üretilerek ölçümler için tanımlanmıştır.

Geri yaylanma simülasyonları sırasında Autoform programında da teorik pres kuvveti tespit edilmiştir. Bu değer Q&P1180 için 1.177 kN'dur. Yukarıda hesaplanan kuvvetin yaklaşık iki katı, pres üzerinden okunan kuvvetinse yaklaşık dörtte biri civarındadır.

Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Denklem (3.2) ve (3.3)'ün teorik değerleri işaret ettiği ve yaklaşım olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle emniyet katsayıları dikkatli seçilmeli mümkünse sayısal analiz programları tercih edilmelidir. Pres üzerinde okunan değer ile yaşanan farklılık ise kalıp üzerine yerleştirilen ve çeliklerin anormal durumlarda hasar görmesini engelleyen mesafe ayar bloklarından kaynaklanmaktadır. Bu bloklar seri üretimde daha hassas ayarlandığından üretim kuvvetlerine buradaki kadar etki etmemekle birlikte her daim kontrol edilmeleri faydalı olacaktır.

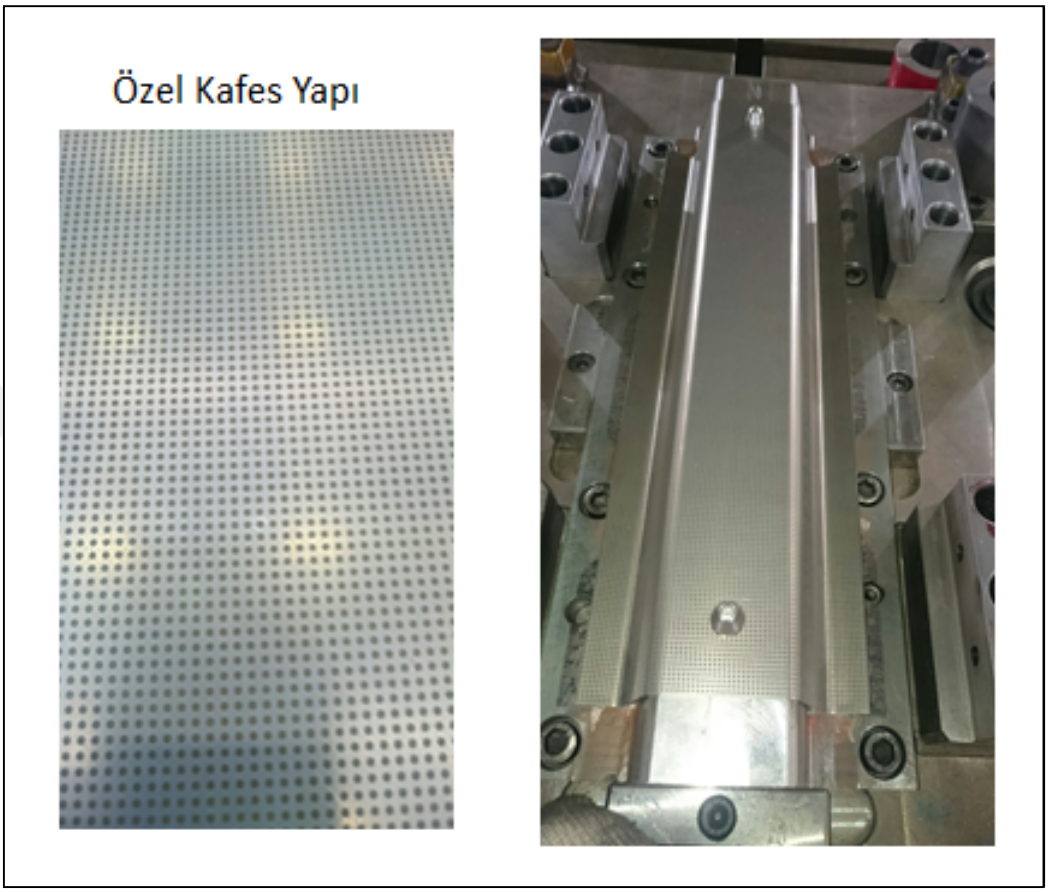


Şekil 2.24. Pres hareket diyagramı

2.7.Kafes Yapı Analiz Hazırlığı

Üretilen parçaların analizlerinde bir sonraki bölümde açıklanacak olan şekillendirilebilirlik analizi için özel olarak hazırlanmış numune malzemelerin kalıpta üretilip ölçümlerinin alınması gerekmektedir. Şekillendirilebilirlik analiziyle malzemelerin sadece bükme işlemlerinde verebilecekleri tepkiler değil çekme işlemi için de ne gibi tepkiler verebilecekleri irdelenebilmiştir. Bu işlemde yüksek çözünürlüklü kameralar daha önce form almamış malzeme üzerine dağlanmış olan kafes yapıları form aldıktan sonra analiz ederek hücre uzamaları ölçüp bunları FLD ile kıyaslamamızı sağlamakta ve bu sayede farklı şekil verme işlemlerinde ne gibi tepkiler oluşacağının tahmininde bulunabilmemize olanak sağlamaktadır. Bunun için kullanılacak yöntem ve buna göre hazırlanmış kafes yapı oldukça önemlidir. Bu çalışmada Argus yüksek çözünürlüklü kameraları kullanılmıştır ve malzemeler

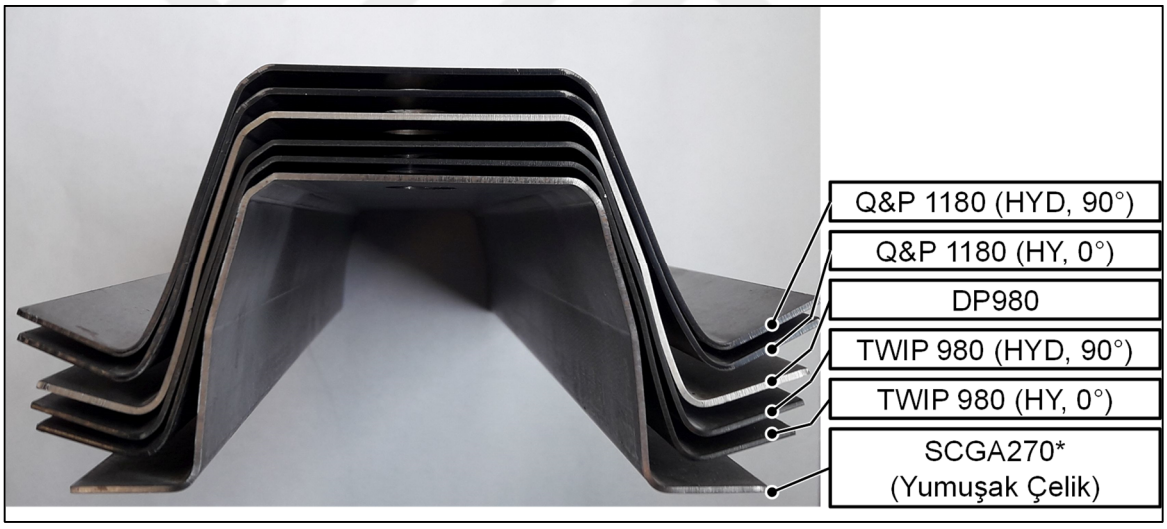
1,5 mm çapta ve de merkezleri arası 3 mm olan özel noktalarla elektro kimyasal yöntem ile dağlanmıştır. Şekil 2.25'de bu özel kafes yapı ve kalıp içerisinde form almış, özel olarak hazırlanmış numune görülmektedir.



Şekil 2.25. Özel kafes yapı ve kalıp içi görüntü

3. ANALİZLER

Analiz kısmında üretilen prototip parçalar önce geri yaylanma davranışları devamında sırasıyla strain uzamaları ve de şekil değiştirme pekleşmesi (work hardening) özellikleri açısından analiz edilmiştir. Bu analizlerden önce parçalar üst üste konularak görsel kıyaslamaya tabi tutulmuştur. Bu ilk kıyaslamada farkı daha iyi görebilmek için yumuşak çelik sınıfında 270 MPa mukavemetine sahip genelde araç dış panellerinde kullanılan bir malzemede kalıpta üretilerek görsel kıyaslama için kullanılmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere ilk kıyaslamada düşük mukavemetli yumuşak çeliklerde ciddi geri yaylanmalar görülmezken yüksek mukavemetli malzemelerde aynı kalıpta aynı şartlarda üretilmiş olmalarına rağmen ciddi geri yaylanmalar görülmektedir.

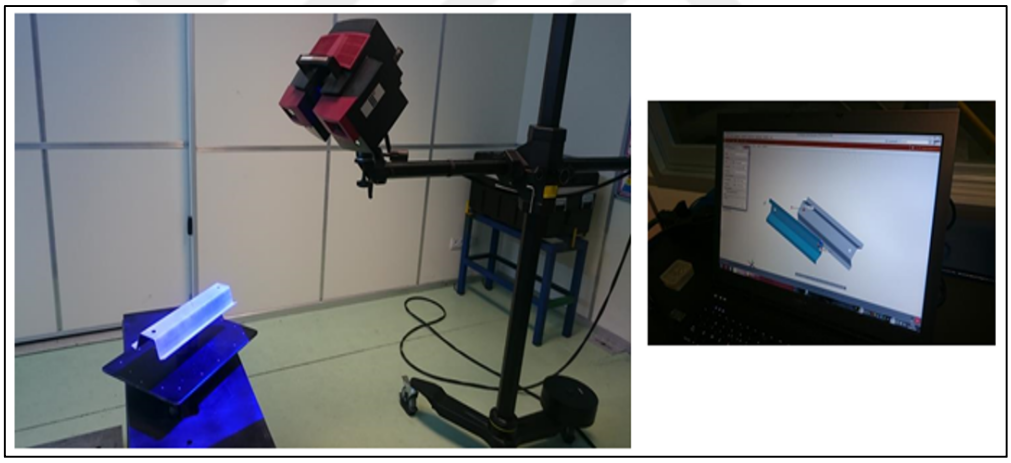


Şekil 3.1. Üretilen parçalar ve görsel kıyaslaması

Malzemelerin kalınlıkları şekillendirme sonrasında parça radyus bölgelerinden kalınlık ölçer aletler ile ölçülmüştür. Malzeme kalınlık değişimleri %3 civarında okunmuştur ki bu değer seri üretim koşullarına uygundur. Normalde kullanılan tolerans %15~18 aralığındadır.

3.1. Parça Geometri Ölçümü

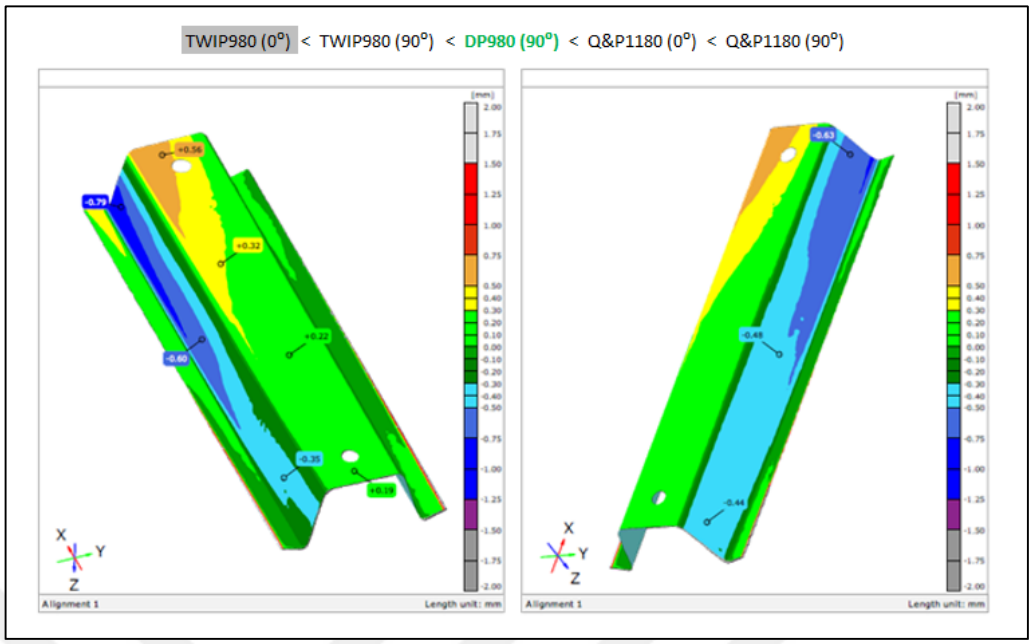
ATOS marka 3boyutlu tarama cihazı (Şekil 3.2) ile üretilen parçalar taratılıp "gom Inspect" programı sayesinde uzayda referans datayla çakıştırılıp parça üzerinde renk haritaları oluşturulmuştur. Referans datası için DP980 malzemeyle üretilen hadde yönüne dik olan parça seçilmiştir. Bunun sebebi mevcutta seri üretim koşullarında bu malzemenin oluşturduğu geri yaylanmalar şirketlerin teknik bilgi birikimiyle giderilebilmekte ve müşterinin istediği kalite seviyelerindeki parça, seri üretim koşullarında çıkartılabilmektedir. Ayrıca DP980 HDY(90^o) olan parça bilinen soğuk şekillendirme sac malzemelerinde en yüksek geri yaylanma değerlerine ulaşan en riskli parçadır. Bu nedenle diğer malzeme tiplerinin bu malzemeyle kıyaslanması üreticiler için referans bilgisini oluşturacaktır. Bu sayede tasarım aşamasında ne gibi önlemler alacaklarını öngörebileceklerdir ki bu önlemler için öneriler sonuç kısmında tartışılmıştır.



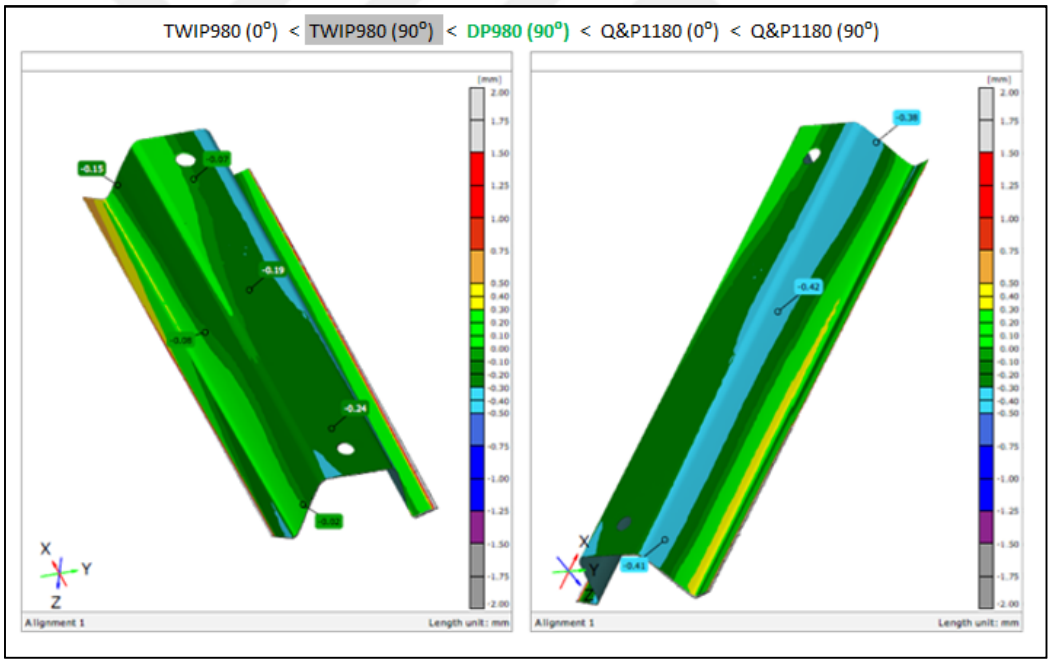
Şekil 3.2. ATOS tarama cihazı ve gom Inspect program ara yüzü

Bununla birlikte ATOS taraması sayesinde radyus'ların ölçümüde sağlanmıştır. Yüksek miktarlarda geri yaylanma görüldüğünden radyus değerleri tasarıma göre farklılıklar oluşturmaktadır. Tolerans değerlerini aşan bu durum geri yaylanmanın tamamen giderilmemesinden kaynaklanmaktadır.

DP980'e göre kıyaslanmış TWIP980 ölçüm sonuçları Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir;

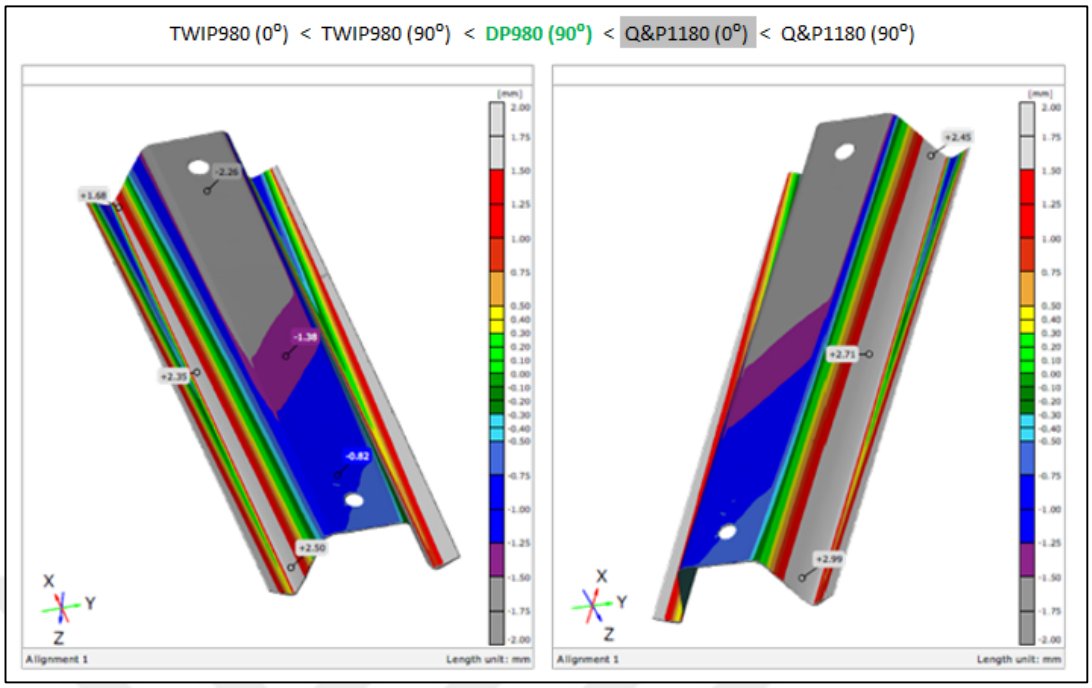


Şekil 3.3. TWIP980(0°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması

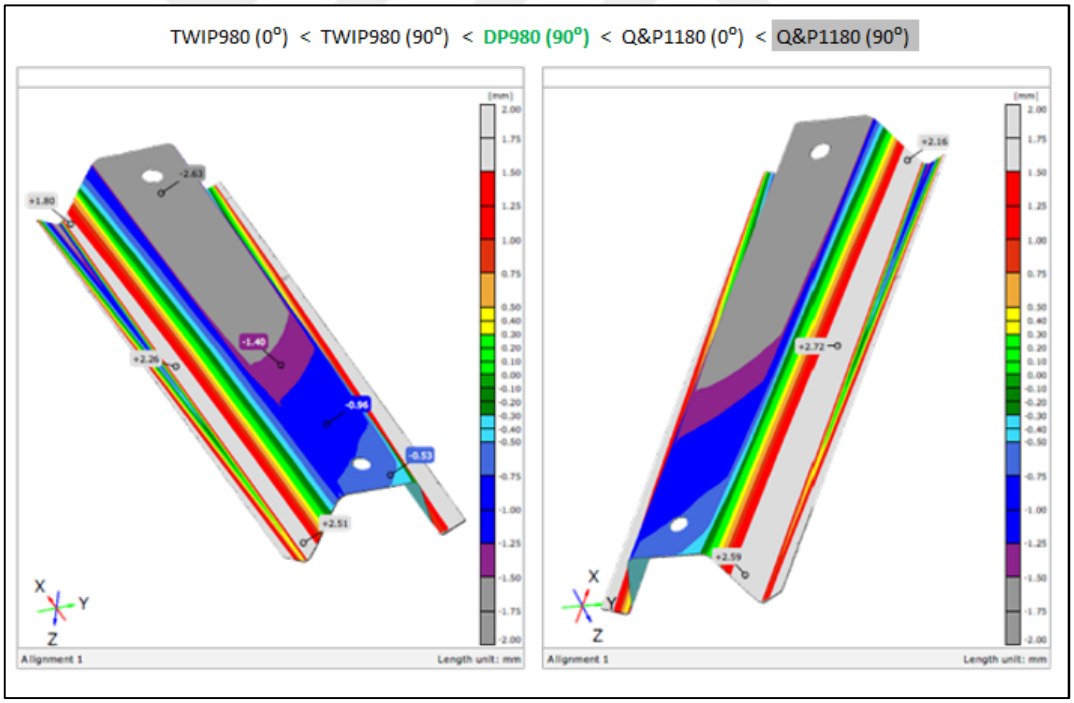


Şekil 3.4. TWIP980(90°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması

DP980'e göre kıyaslanmış Q&P1180 ölçüm sonuçlarıysa Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir;



Şekil 3.5. Q&P1180(0°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması



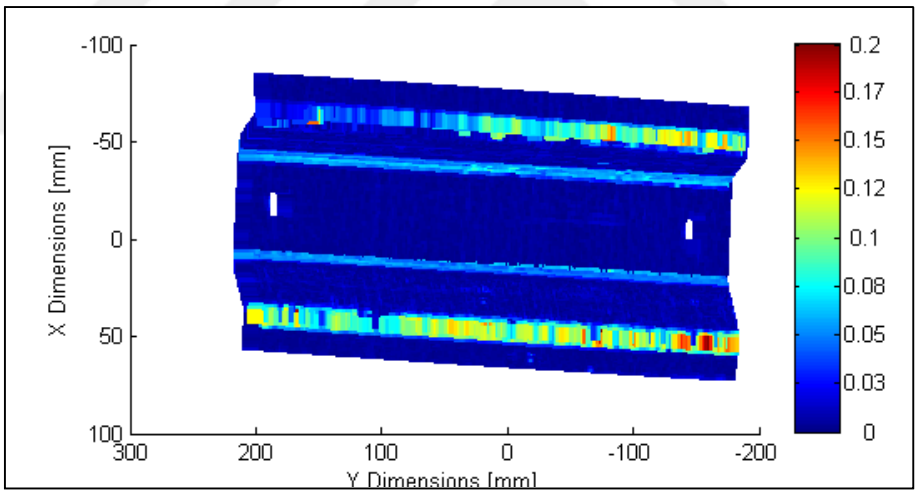
Şekil 3.6. Q&P1180(90°) ölçüm sonuçlarının DP980(90°)'e göre kıyaslanması

Kıyaslama sonuçlarından da görüleceği üzere TWIP çelikleri DP çeliklerine göre daha az geri yaylanma göstermişlerdir. Buna karşın Q&P çelikleri DP çeliklerinden daha fazla geri yaylanma göstermişlerdir.

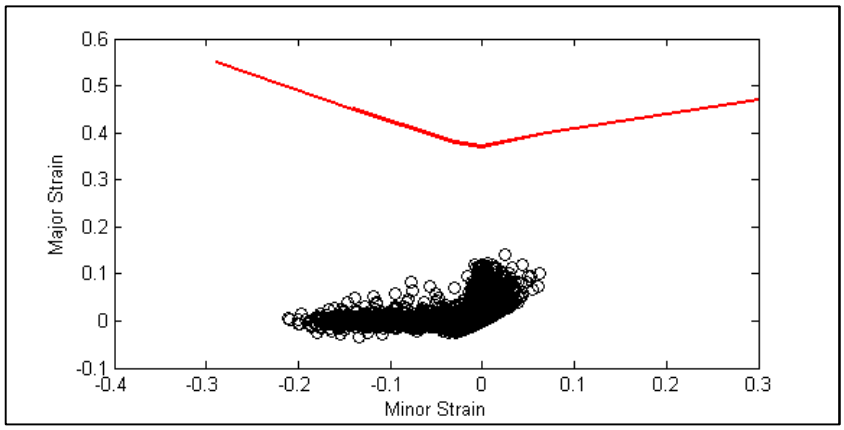
3.2.Şekillendirme Analizi

Yüksek dayanımlı çeliklerin, en büyük sorunlarından biri sünekliklerinin düşük olmasıdır. Parça "prototip koşullarda" üretilebilse dahi, şekillendirme sınır diyagramına yakın genlemelerin olduğu geometriler "seri üretim koşullarında" yüksek ıskarta oranına neden olmaktadır [62]. Özellikle yırtık ve katlanma gibi problemler ciddi sorunlara neden olmakla birlikte üreticilerin müşteri gözünde prestij kaybetmesine de neden olabilmektedir. AHSS malzemelerinin kapasitelerinin öngörülmesi olumsuz sonuçları ortadan kaldırabilecektir.

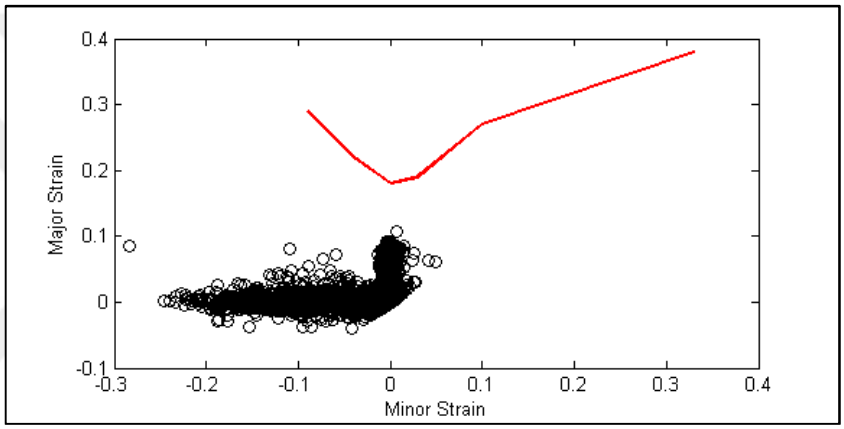
Bu amaçla parçalar öncelikle elektrokimyasal olarak dağlanmıştır. Burada henüz deforme olmamış sac metal üzerine belirli aralıklarla noktalar işaretlenmiştir. Daha sonra dağlanmış parçalar bir önceki bölümde bahsedildiği üzere şekillendirilip, Argus cihazında taratılarak FLC'ye göre kıyaslanmıştır (Şekil 3.7). Bu kıyaslama işleminin sonuçları Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da her referans için ayrı ayrı gösterilmiştir.



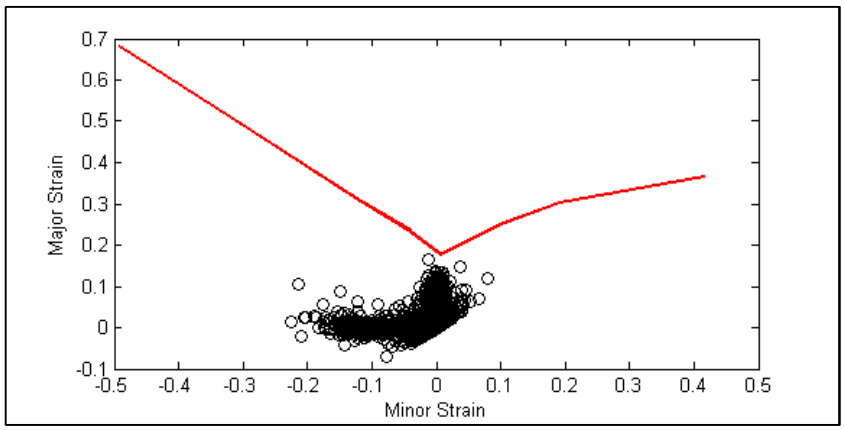
Şekil 3.7. Argus tarama sonuç örneği



Şekil 3.8. TWIP980 Ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması (max.VonMises Strain:0,172)



Şekil 3.9. Q&P1180 ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması (max.VonMises Strain:0,242)



Şekil 3.10. DP980 ölçüm sonucunun FLC ile kıyaslanması (max.VonMises Strain:0,195)

FLC'ye yakınlaşan ölçüm noktalarının deformasyona uğrama olasılığı oldukça fazladır. Buna göre bakıldığında mevcut konumda üretimi yapılan DP980 diyagrama oldukça yakın olmasına rağmen TWIP980 ve Q&P1180 malzemeleri güvenli sayılabilecek bir uzaklıkta kalmışlardır. TWIP980 için beklenen bu durum Q&P1180 için farklı bir sonucu ortaya koymuştur.

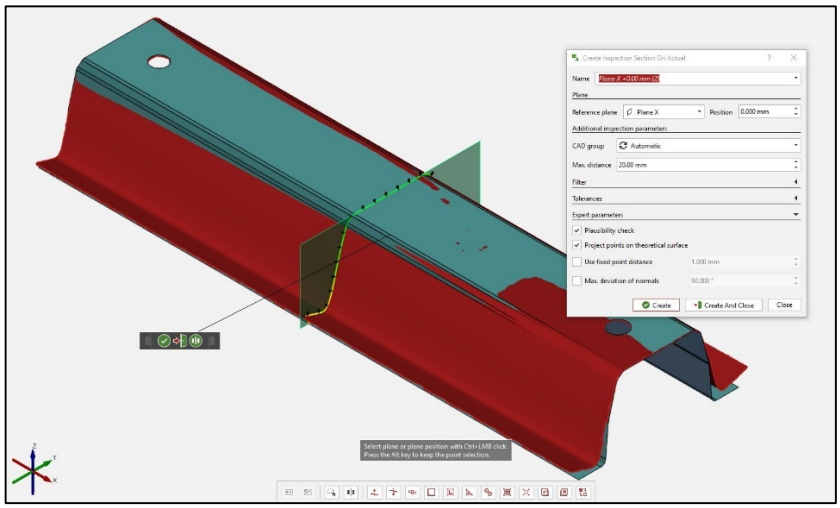
3.3. Sayısal Analiz Sonuçlarının Nihai Ürünle Kıyaslanması

Sac şekillendirme çalışmalarında kullanılan kalıplarda yapılan ilk alıştırma çalışmaları kalıplardan istenen kondisyonda parça üretimini sağlamakta oldukça önemlidir. Bu çalışmamızda kalıp altı alıştırmaları belirli bir tolerans aralığı olmadığından ve üretilen parçaların amacı sadece kıyaslamak olduğundan herhangi bir alıştırmaya tabii tutulmamıştır. Bunun sonucunda CNC hataları, tasarım kusurları, pres rijitlikleri ve diğer hatalar nihai ürününün sayısal analizde tespit edilen değerlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır.

Bölüm 2.4'te ele alınan sayısal analiz sonuçlarının geri yaylanma sonuçları AutoForm programının özelliği sayesinde mesh formatında dışarı aktarılabilmektedir. Bu sayede geri yaylanmanın görülebilir olduğu data'ya erişilebilmektedir.

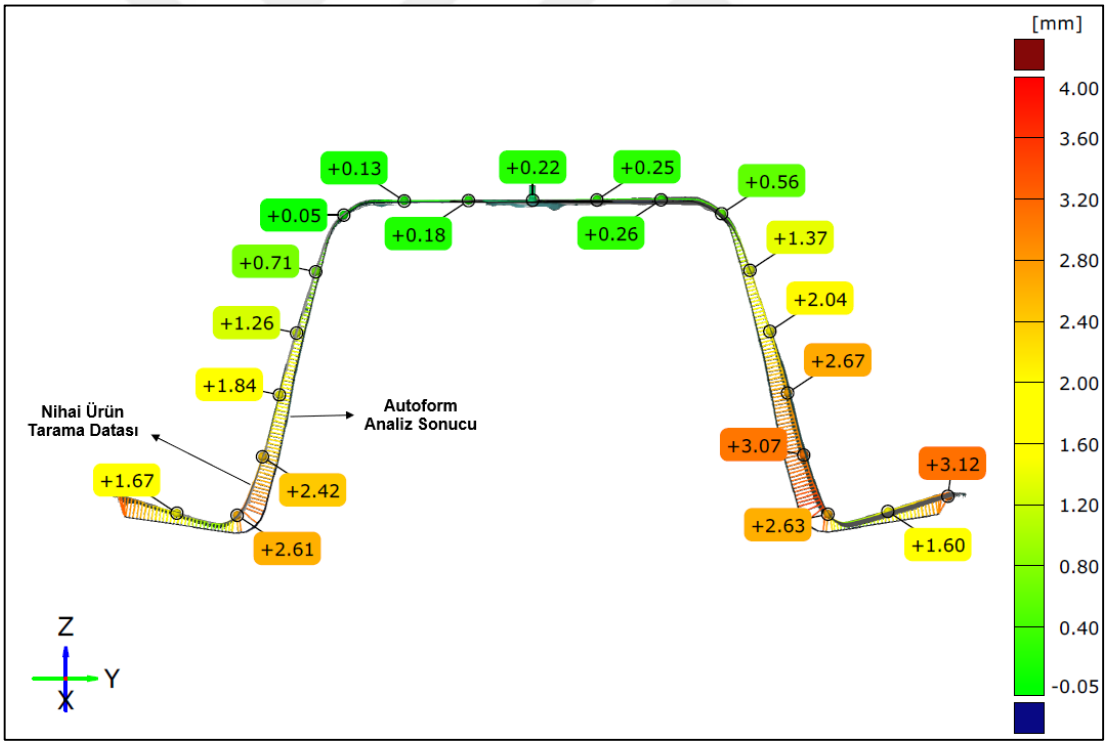
Bölüm 3.1'de elde edilen tarama sonuçları DP980'e malzemesiyle üretilen parçaya göre kıyaslanarak yeni nesil AHSS'ler arasında yorumda bulunabilmek mümkün olmuştur. Yine Bölüm 3.1'de elde edilen tarama datalarını Bölüm 2.4'te elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre kıyaslama yapılması durumundaysa kalıp altı alıştırmaların süresi hakkında yorumda bulunabilmek olası görünmektedir.

Bu amaçla Bölüm 3.1'de elde edilen parça tarama dataları Bölüm 2.4'te elde edilen analiz sonuçlarıyla gom Inspect yazılımı kullanılarak kıyaslanmıştır. Ve parçanın tam ortasından dik olacak şekilde alınan kesit (Şekil 3.11) üzerinde geri yaylanma miktarlarının değişimi irdelenmiştir.



Şekil 3.11. Kıyaslama kesit bölgesinin program üzerinde görünümü

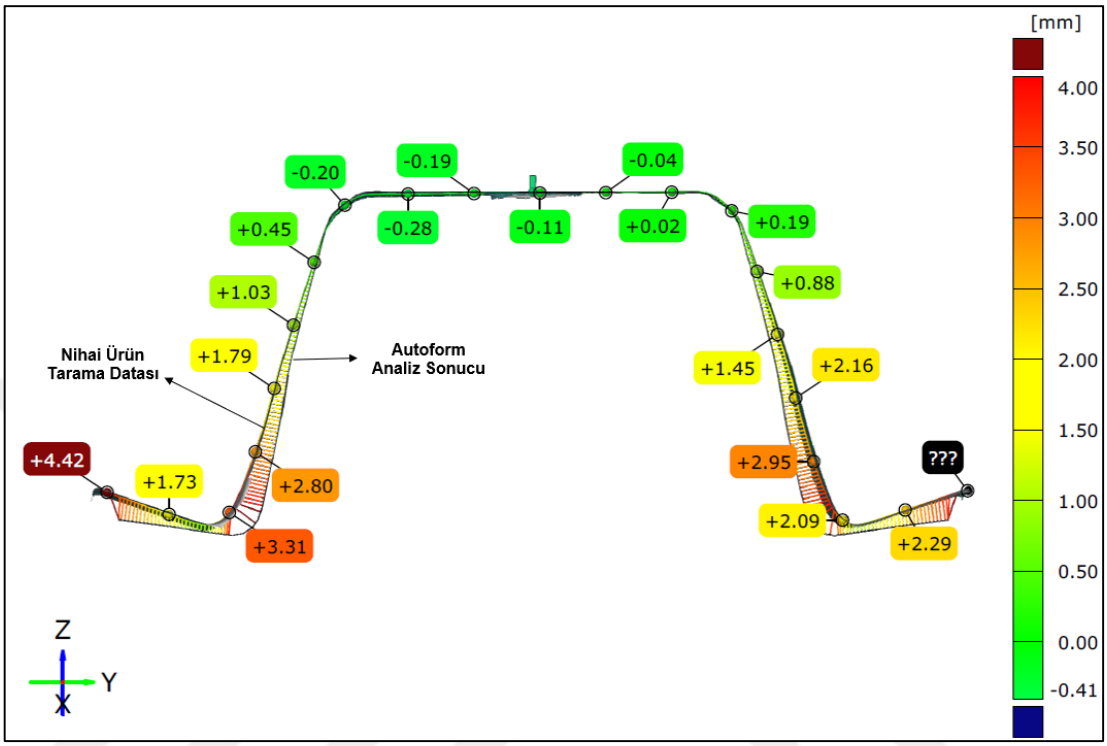
Kıyaslama ilk olarak DP malzemelerin kendi arasında Şekil 3.12'deki gibi yapılmıştır.



Şekil 3.12. DP malzemenin simulasyon ve ürün kıyaslaması

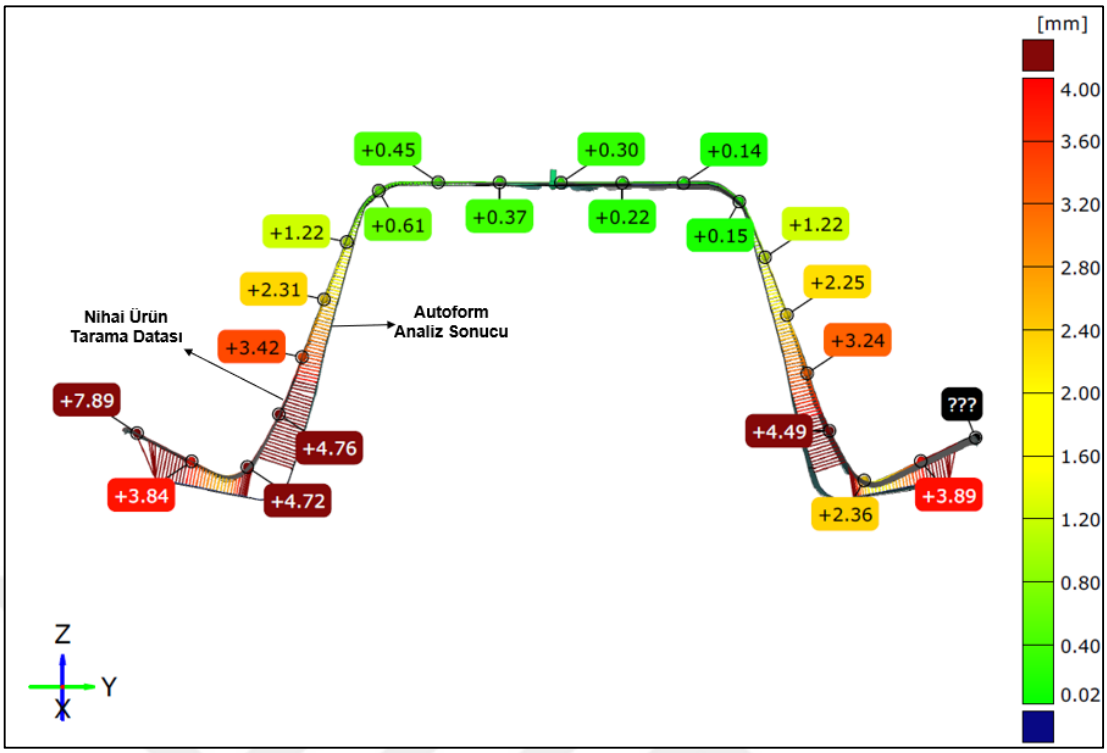
DP malzeme üzerinde yapılan kıyaslama incelendiğinde parçanın özellikle alt flanş bölgelerinde 3 mm'ye varan kaçıklıklar görülmektedir. Bu kısımlarda parça datası ve simülasyon datasının uzunlukları örtüşmediğinden ve gom Inspect programı aradaki mesafeyi algıladığından bundan sonraki tüm kıyaslamalarda bu değer çok yüksek çıkmıştır. Sonuçlar için en tutarlı kıyaslama yan duvarda meydana gelen geri yaylanma

miktarlarının karşılaştırılması olacaktır ki DP980 malzeme için gösterilen değerler nominal kabul edilerek diğer malzemeler yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda Şekil 3.13'te TWIP980 malzemesinin yarattığı durum görülmektedir.



Şekil 3.13. TWIP980 malzemenin simülasyon ve ürün kıyaslaması

TWIP980 malzemesinin simülasyonu ile olan tutarlılığına baktığımızda DP980 ile benzer miktarlarda farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Son olarak aynı işlem Q&P1180 malzemesi içinde yapılarak sonuçları Şekil 3.14'te sunulmuştur.



Şekil 3.14. Q&P1180 malzemenin simülasyon ve ürün kıyaslaması

Q&P1180 malzemesinin kıyaslama sonucunda DP980 ve TWIP980'e göre neredeyse 2 kat'a yakın derecede simülasyon sonucundan farklılık tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmalara ve sektörün trendine göre OEM'ler karbon salınımı düşürecek daha hafif ama daha mukavemetli araçlar üretebilmek için sürekli iyileştirmeler yapmakta ve inovatif faaliyetlerde bulunmaktadırlar. Bu kapsamda ticari olarak bilinen yüksek mukavemetli malzemeler belirli seviyelerde ihtiyacı karşılamaktadır. Ancak özellikle karmaşık şekilli parçaların üretiminde ya da daha yüksek mukavemet ihtiyaçlarında henüz istenen seviye yakalanamamıştır. Bu kapsamda şirketler önemli parçalarda sıcak şekillendirme yöntemine geçmiştirler. Ancak bu yöntemin proses ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması durumu bir ikileme sokmaktadır. Bu noktada yeni nesil soğuk şekillendirilebilir çelikler söz konusu olmaya başlamaktadır.

Yeni nesil TWIP ve Q&P çeliklerinin malzeme karakterizasyonu yüksek genlemede veri toplama ile tamamlanmış ve AutoForm programına dahil edilecek malzeme kartları oluşturulmuştur. Simülasyonlar ve prototip parça ve de kalıp tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarıma göre üretilen prototip kalıplardan üretilen numune parçalar yukarıda bahsi geçen testlere tabi tutulmuştur. Buna göre elde edilen sonuçların değerlendirilmesi şu şekildedir:

Yüksek mukavemetli malzemelerin geri yaylanma davranışları ATOS cihazıyla kıyaslandığında;

- TWIP980 malzemeler mevcut üretim metot ve proses yapılarında DP980 malzemeden daha iyi koşullarda üretilebilirler, bu durum Busch ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmayla benzer sonuç vermiştir. Bununla birlikte TWIP980 diğer malzemeler 1,2 mm kalınlıktayken temin edilme durumundan dolayı 1,0 mm ile çalışılmıştır. Düşük malzeme kalınlıklarının düşük plastik bölgeler yaratmasından dolayı daha fazla geri yaylanma göstermesine [63] dayanarak TWIP980 çeliği de 1,2 mm kalınlığında seçilmiş olsaydı, sonuçlarının DP980'e göre çok daha iyi olabileceği söylenebilir,

- Q&P1180 için proses yapılarında 3.bükme ya da kam ünitelerinin kullanıldığı ütüleme (kalibre) prosesleri ve ayrıca prototip tasarımda olduğu gibi parça şeklinde iyileştirmeler yapılmalıdır ki istenen toleranslarda üretimler yapılabilir olsun, daha önce bahsedilen Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada aynı mukavemet değerlerindeki malzemeler kıyaslanmış olduğundan bu sonuçla ters bir öneri sunmaktadır. İleride 1180 MPa çift fazlı malzemelerle çalışmanın tekrarlanması iki çalışma arasında daha doğru kıyaslama olanağı verecektir.

Argus strain ölçümleri sonucu oluşturulan FLC diyagramları incelendiğinde;

- TWIP980 şekillendirilebilirlik açısından güvenli (robust) bir malzeme olduğu söylenebilir,
- Q&P1180 malzemesiyse yüksek mukavemetine karşın FLC'ye göre DP980'den daha güvenli gözükmektedir. Bu nedenle AHSS kullanımında bükmenin oluşturacağı geri yaylanmalar çekme prosesiyle teorik olarak düzeltilebilir, ayrıca ana bobin farklılıklarından kaynaklı oluşabilecek hurda oranlarıda daha az olacaktır.

GomInspect programında yapılan simülasyon ve nihai ürün kıyaslamaları incelendiğinde;

- DP980 malzemesiyle elde edilen farklılığın giderilmesi ticari açıdan sıklıkla uygulanmaktadır, bununla birlikte TWIP980 simülasyon sonuçlarında da benzer miktarda atıklıkların görülmesi bu malzemenin kullanımı söz konusu olduğunda DP980 malzemesiyle benzer oranlarda pres altı alıştırmasının gerekeceğini ortaya koyar,
- Q&P1180 sac malzemesindeyse TWIP980 ve DP980'e göre neredeyse 2 kat fazla atıklıklar tespit edilmiştir. Bunu sonucunda pres altı alıştırmalarda Q&P1180 malzemesinin iki katı fazla zamana teorik olarak gerek olabileceği bunu kısaltmak içinse ekstra proseslerin gerekebileceği söylenebilir.

Her iki yeni malzemenin de marşpiyel sacı kullanımında daha yüksek enerji emilimi göstermesi teorik olarak beklenmektedir. Bu konuda nümerik ve deneysel çalışmalar devam etmektedir. Kaynaklanabilirlik açısından da incelemeler yapıldıktan sonra kullanımı mümkün olması dahilinde firmalar TWIP980 çeliklerine rahatça geçiş

yapabilir görünmektedirler. Ancak Q&P1180 malzemeleri için özel önlemler alarak geri yaylanma sorununu parça tasarımından başlayarak ele almaları gerekmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Gifford G., *Her Yönüyle Otomobiller*, Tübitak Popüler Bilim Kitapları, 1998.

[2] MMIM Hall of Fame:Nicolas-Joseph Cugnot, The Motor Museum in Miniature, http://www.themotormuseuminminiature.co.uk/inv-nicolas-cugnot.php (Ziyaret tarihi: 12 Mayıs 2018)

[3] Benz K., Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb, 1886, Germany Patent 37435, *The German Patent and Trade Mark Office.*

[4] Hall J. N., 50 year Perspective of Automotive Engineering Body Materials and an Analysis of the Future, *Great Designs in Steel*, Michagon USA, 9 Nisan 2008.

[5] Gkouskos D., Normark C. J., Lundgren S., What Drivers Really Want: Investigating Dimensions in Automobile User Needs, *International Journal of Design*, 2014, **8**(1), 59-71.

[6] Taub A., Luo A., Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications, *MRS Bulletin*, DOI: 10.1557/mrs.2015.268

[7] Lei F., Chen X., Xie X., Zhu J., Research on Three Main Lightweight Approaches for Automotive Body Engineering Considering Materials, Structural Performances and Costs, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/2015-01-0580.

[8] Roll K., D. Lorenz, Modelling and Analysis of Integrated Hotforming and Quenching Processes, *Sheet Metal*, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.787

[9] Chen G., Zhou J., Cai W., Lai X., Lin Z., Menassa R., A framework for an automotive body assembly process design system, *Computer-Aided Design*, DOI: 10.1016/j.cad.2006.01.012

[10] Franke R., Dragulin D., Zovi A., Casarotto F., Progress in ductile aluminium high pressure die casting alloys for the automotive industry, *La metallurgia italiana*, 2007, **5**, 19-23.

[11] Morey B., Mix and Match for Lightweight Autos, *Manufacturing Engineering*, 2014, **153**, 93-102.

[12] Adams D., DiCello J., Hoppe C., Kasper A., Keisoglou A., McVinnie W., High Strength Materials and Vehicle Weight Reduction Analysis, *SAE Transactions*, 1975, **84**, 797-806.

[13] Billur E., Altan T., Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I, *Stamping Journal*, 2013, **6**, 16-17.

[14] Taylor J., Classy Compacts - the W201's, *The Mercedes Benz Club Ltd*, 1997, **8**, 23-27.

[15] Jambor A., Beyer M., New cars — new materials, *Materials & Design*, DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00049-6

[16] Fredin K., Future materials for body structure applications, https://wenku.baidu.com/view/2f0f9d6d58fafab069dc0211.html (Ziyaret tarihi: 13 Ağustos 2018)

[17] Rashid M. S., GM 980X-A Unique High Strength Sheet Steel with Superior Formability, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/760206.

[18] Araki K., Takada Y., Nakaoka K., Work hardening of continuously annealed dual phase steels, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 1977, **17**, 710-717.

[19] ThyssenKrupp Stahl AG, High-strength steel for lightweight auto body manufacture, *ThyssenKrupp Stahl*, Ad.No: 2045, 1999.

[20] Larsson J.K., Hanicke L., Multi-material Approach with Integrated Joining Technologies in the New Volvo S80*, SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/1999-01-3147.

[21] Takagi K., High Strength Steel Application in New Micra, *EuroCarBody*, Bad Nauheim, Almanya, 19-20 Eylül 2002.

[22] *The Organization of WorldAutosteel, Advanced High-Strength Steels Application Guidelines*, V6, 2017.

[23] Zackay V. F., Parker E. R., Fahr D., Busch R., The enhancement of ductility in high-strength steels, *ASM Trans Quart*, 1967, **60**, 252-259.

[24] Guimarães J.R.C., The deformation-induced martensitic reaction in polycrystalline Fe - 30.7 Ni - 0.06C, *Scripta Metallurgica*, DOI: 10.1016/0036-9748(72)90049-X

[25] Sugimoto K.I., Kobayashi M., Hashimoto S.I., Ductility and strain-induced transformation in a high-strength transformation-induced plasticity-aided dual-phase steel, *Metallurgical Transactions A*, 1992, **23**, 3085-3091.

[26] Pfestorf M., The Application of Multiphase Steel in the Body-in-White, *Great Designs in Steel*, Livonia ABD, 9 Mart 2005.

[27] Proceedings of EuroCarBody 2004, *Automotive Circle International*, Bad Nauheim Almanya, 26-27-28 Ekim 2004.

[28] Engl B., Keßler L., Lenze F.J., Schaumann T.W., Recent Experience with the Application of TRIP and Other Advanced Multiphase Steels, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/982408.

[29] Staufner W., Advanced High-Strength Steels in Mercedes-Benz Passenger Cars, *Great Designs in Steel*, Livonia ABD, 19 Şubat 2003.

[30] Fonstein N., Advanced High Strength Steels, *Springer International*, DOI: 10.1007/978-3-319-19165-2.

[31] McFarland W.H., Taylor H.L., Properties and Applications of Low Carbon Martensitic Steel Sheets, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/690263.

[32] Bernquist J., Safety cage design in the VOLVO XC90, *Great Design in Steel*, Livonia ABD, 18 Şubat 2004.

[33] Norrbottens Jaernverk A.B., Manufacturing a hardened steel article, 1977, GB1490535, *Great Britain Patent*.

[34] Billur E., Hot Formed Steels, *Automotive Steels,* Woodhead Publishing, 2017, 387-411.

[35] Gamboa M., Gorostiza K., Compact Line Conception for Hot Forming Lines, *3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, Kassel, Almanya, 13-17 Haziran 2011.

[36] Karbasian H., Tekkaya A.E., A review on hot stamping, *Journal of Materials Processing Technology*, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019.

[37] Kim T.W., Han J.K., Chang R.W., Kim Y.G., Manufacturing process for austenitic high manganese steel having superior formability, strengths and weldability, 1995, WO1993013233A1, *World Intellectual Property Organization*.

[38] Grässel O., Frommeyer G., Effect of martensitic phase transformation and deformation twinning on mechanical properties of Fe-Mn-Si-Al steels, *Materials Science and Technology*, DOI: 10.1179/mst.1998.14.12.1213

[39] Kwang G. C., Characteristics of newly developed TWIP steels, *Materials in Car Body Engineering*, Bad Nauheim, Almanya, 20-21 Nisan 2010.

[40] Maggi S., Federici C., D'Aiuto F., TWIP Steel application on the Fiat Nuova Panda body, *Materials in Car Body Engineering,* Bad Nauheim, Almanya, 26-27 Eylül 2012.

[41] Kang Y., Synthetic properties and potentialities of future automobile steel, *Green Manufacturing – the Future of Steel and Automobile*, Guangzhou, Çin, 2013.

[42] Thomas G., Matlock D., Rana R., Hector L., Abu-Farha F., ICME 3G AHSS Lab Heat Results Supporting DOE Targets, *Great Designs in Steel*, Detroit USA, 13 Mayıs 2015.

[43] Billur E., Advanced high strength steels: recent developments and future outlook, *Metal Forming Technology Day, MEFTECH*, Bursa Türkiye, 12 Mayıs 2017.

[44] Machrowicz T., Performance and Use Characteristics of an Extremely Formable 3rd Generation AHSS, *International Automotive Body Congress*, Frankfurt Germany, 7-8 Haziran 2016.

[45] Speer J., Matlock D.K., Cooman B.C.D., Schroth J. G., Carbon partitioning into austenite after martensite transformation," *Acta Materialia,* DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00059-4 .

[46] N. R. Council, *Novel Processes for Advanced Manufacturing: Summary of a Workshop*, National Academies Press, 2013.

[47] Huijin D., Shuli L., Jie Y., Hongxin Y., Kebin B., The automobile steel of the third generation in B-pillar reinforced panel, *Engineering Sciences*, 2012, **10**(6), 20-22.

[48] Hsiung G., Advanced High-Strength Steel Stamping, *Auto Steel Partnership 050*, 2012.

[49] Moor E.D., Quenching and Partitioning Process Development to Replace Hot Stamping of High-Strength Automotive Steel, *U.S. Department of Energy Advanced Manufacturing Office Peer Review Meeting*, Washington USA, 28-29 Mayıs 2015.

[50] Billur E., Otomotivde Kullanılan Yeni Malzemeler, *GrundigAkademie*, Kocaeli Türkiye, 16 Haziran 2017.

[51] Çapan L., Bükme Kuvveti, *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Basımevi, İstanbul, 372-373, 1999.

[52] Yoshida T., Sato K., Isogai E., Hashimoto K., Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures, *Nippon Steel Technical Report,* No.103, 2013.

[53] Kılıç S., Öztürk F., Ticari TWIP900 ve DP600 yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv endüstrisindeki performanslarının karşılaştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2016, **3**(31), 567-578.

[54] Buscha C., Hatschera A., Ottob M., Huinink S., Vucetic M., Bonk C., Bouguecha A., Behrens B.A., Properties and application of high-manganese TWIP-steels in sheet metal forming, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*, Nagoya, Japonya, 19-24 Ekim 2014.

[55] Wang L., Speer J. G., Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment, *Metallography, Microstructure, and Analysis,* DOI: 10.1007/s13632-013-0082-8.

[56] Dykeman J., Advanced High Strength Steel - Recent Progress, Ongoing Challenges, and Future Opportunities, *Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels*,Colorado USA, 23-27 Haziran 2013.

[57] Billur E., Altan T., Determining material properties and batch-to-batch variations with bulge testing, *Stamping Journal*, 2013, Sep/Oct, 16-17.

[58] VoestAlpine Steel Division, Dual-phase steels - Data Sheet, VoestAlpine, https://www.voestalpine.com/stahl/en/content/download/4523/file/voestalpine_datasheet_dual-phase_steels_EN_20170531.pdf (Ziyaret tarihi: 13 Ağustos 2018).

[59] Dong G., Wang D., Zhang J., Huang S., Side Structure Sensitivity to Passenger Car Crashworthiness During Pole Side Impact, *Tsinghua Science & Technology* , DOI: 10.1016/S1007-0214(07)70043-3.

[60] Peng Z.J., Automotive underbody with lateral energy absorption augmentation, 2004, US6676200B1, *U.S. Patent and Trademark Office*.

[61] Cayssials F., Lemoine X., Predictive model of FLC (Arcelor model) upgraded to UHSS Steels, *24th IDDRG Conference*, Besacon Fransa, 20-22 Haziran 2005.

[62] Jadhav S., Schoiswohl M., Buchmayr B., Applications of Finite Element Simulation in the Development of Advanced Sheet Metal Forming Processes, *BHM*, DOI: 10.1007/s00501-018-0713-0.

[63] Chikalthankar S.B., Naikwade S.G., Nandedkar V.M., Factors Affecting on Residual Stresses & Springback in Sheet Metal Bending: A Review, *International Journal for Scientific Research & Development*, 2015, **3**(8), 258-262.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Özden E**., Taşkın E., Yöntem O., Arıkan R.G., Kalıp değişimlerinde hidrolik sabitleyici kullanılmasının avantajları, *UMTİK*, İzmir Türkiye, 30 Haziran 2014.

[2] Billur E., **Özden E**., Arıkan R.G., Material characterization and springback analysis under u-bending operation of Q&P1180 and TWIP980 materials, *OTEKON*, Bursa Türkiye, 7-8 Mayıs 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Kocaeli'nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünden 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında başladığı Toyotetsu-Türkiye fabrikasında Ar-Ge Geliştirme Mühendisliği Pres departmanında müdür yardımcısı sıfatıyla görevini sürdürmektedir.