



**TAŞIT ELEMANLARINI FORM PUNTA İLE
BİRLEŞTİRME VE OPTİMİZASYONU**

Kazım SULAK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT ELEMANLARINI FORM PUNTA İLE BİRLEŞTİRME VE
OPTİMİZASYONU**

Kazım SULAK
0000-0003-2594-8124

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAŞIT ELEMANLARINI FORM PUNTA İLE BİRLEŞTİRME VE OPTİMİZASYONU

Kazım SULAK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Teknolojinin gelişmesiyle ve karbon salınım değerlerinin düşürülmesi amacıyla özellikle binek araçlarda hafifletme çalışmaları artmaktadır. Bu sebeple araç üzerinde farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerde malzeme kullanımı da artmaktadır. Farklı tür malzeme kullanımı arttıkça, yeni üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kenetleme, patenti 19'uncu yüzyıla dayanmasına rağmen uzun süre sanayide geniş kullanım alanı bulamamıştır. Fakat, günümüzde başta otomotiv sektörü olmak üzere kullanımı her geçen gün artmaktadır. Kenetleme, aynı veya farklı tür malzemelerin birleştirilebilmesine imkân sunmaktadır. Punta kaynağına alternatif bir yöntemdir. Punta kaynağına göre en önemli avantajı, farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılabilmesidir. Malzeme üzerinde plastik deformasyon oluşturarak malzemeler arasında fiziksel bir kenet oluşmasını sağlar. Bu fiziksel kenet sayesinde malzemeler birleştirilmiş olur.

Bu çalışmada kenetleme bağlantılarının kalitesine etki eden, kenetleme takımları üzerinde belirlenmiş olan bazı geometrik parametreler incelenmiştir. 0,8 mm kalınlığa sahip 6xxx serisi alüminyum iki sacın deneysel verileri ile sonlu elemanlar modelinin korelasyonu incelenmiştir. Fiziksel kenet miktarı, boyun kalınlığı, çekme kuvveti, ayırma kuvveti ele alınmıştır. Yapılan çalışmada form punta takım ölçülerinden hangi parametrenin dayanıma nasıl etki ettiği Taguchi yöntemi ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Form punta, otomotiv, kenetleme, dayanım eniyilemesi, Taguchi, mekanik birleştirme, sac elemanlar

2021, ix + 77 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

JOINING PROCESS AND OPTIMIZATION OF VEHICLE COMPONENTS BY MECHANICAL CLINCHING

Kazım SULAK

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

With the development of technology and with the aim of reducing carbon emissions, lightening efforts in passenger cars have been increasing. For these reasons, the use of different types physical and chemical properties of materials on the vehicle also have been increasing. As the use of different types of materials increases, new production methods are needed. Although the patent of clinch dates back to the 19th century, it could not find wide use in industry for a long time. However, its use has been increasing day by day, especially in the automotive sector. Clinch offers the opportunity to join the same or different types of materials. It is an alternative method to spot welding. The most important advantage over spot welding is that it can be used for joining different types of materials. It creates a physical clamp between the materials by creating plastic deformation on the material. With the help of this physical clamp, the materials are joined.

In this study, some geometric parameters of clinch tools that affect the quality of clinch connections were examined. The correlation of the finite element model with the experimental data of two 6xxx series aluminum sheets with 0.8 mm thickness was investigated. Amount of physical clamp, neck thickness, pulling force, separation force are discussed. In this study, How which parameters of clinching tools affects the strength was investigated by Taguchi method.

Keywords: Clinch, automotive, clamping, strength optimization, Taguchi, mechanical joining, sheet metal parts

2021, ix + 77 pages

TEŞEKKÜR

Öncelikle, hayatımın her safhasında yanımda olan ve beni bugünlere getiren çok değerli aileme teşekkürlerimi sunarım. Hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Ferruh Öztürk'e, ayrıca Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümündeki kıymetli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda büyük emeği geçen kıymetli dostum Ahmet Onaylı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Kazım SULAK

02/02/2021



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Sektörde Kullanılan Malzeme Çeşitleri	3
2.2. Literatür Araştırması	3
2.3. Form Punta ve Diğer Birleştirme Yöntemleri	5
2.4. Form Punta Prosesi ve Çeşitleri	9
2.4.1. Sabit Matrisli Form Punta	10
2.4.2. Genişleyebilen Matrisli Form Punta	11
2.4.3. Matrissiz Form Punta	11
2.4.4. Delikli Form Punta	12
2.5. Form Punta İşleminin Pratikteki Uygulamaları	12
2.6. Form Punta Bağlantılarının Özellikleri	13
2.7. Yeniden Şekillendirme İşlemi	15
2.8. Bağlantının Kalitesini Etkileyen Faktörler	16
2.9. Hasar Modelleri	16
2.10. Malzeme Modelleri	16
2.11. Johnson-Cook Malzeme Modeli	17
2.12. Cowper-Symond Malzeme Modeli	18
2.13. Piecewise Malzeme Modeli	18
2.14. Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) Modeli	19
2.14.1. f_0 Etkisi	22
2.14.2. f_c Etkisi	25
2.14.3. f_f 'in Etkisi	27
2.14.4. f_n Etkisi	29
2.14.5. ϵ_n Etkisi	30
2.15. Taguchi Metodu	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM	37
3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Kurulması	37
3.2. Test ve Analiz Sonuçlarının Korelasyonu	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	46
4.1. Taguchi Deneyi	46
4.2. Taban Sac Kalınlığının Etkisi	63
4.3. Sürtünme Katsayısının Etkisi	65
4.4. Yanıt Yüzey Yöntemi	70
5. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
t_n	Üst sac boyun kalınlığı
t_s	Kenet miktarı
F_a	Ayırma kuvveti
F_c	Çekme kuvveti
F_z	Zımba kuvveti
D_z	Zımba çapı
D_m	Matris çapı
t_{md}	Matris derinliği
t_{sk}	Taban sac kalınlığı
A	Zımba yarı çapı
B	Zımba köşe yarıçapı
C	Zımba duvar açısı
D	Matris yarı çapı
E	Matris oturma yüzey mesafesi
F	Matris oturma yarıçapı
G	Matris derinliği
H	Matris duvar açısı
J	Matris iç köşe yarıçapı
K	Matris dış köşe yarıçapı
L	Matris oturma yüzey açısı
M	Pot çemberi mesafesi
S/N	Performans istatistiği, Sinyal/Gürültü oranı
n	Bir deney kombinasyonunda tekrarlama sayısı
Y_i	i. deneyin performans istatistiği
A_N	Boyun bölgesi iz düşüm alanı
R_p	Zımba yarıçapı
$\bar{\sigma}_f$	Üst sac çatlak gerilmesi
σ	Akma mukavemeti
ϵ_p	Plastik gerinim

a	Akma gerilmesi
b	Pekleşme modülü
n	Pekleşme üssü
c	Deformasyon hızı katsayısı
$\dot{\epsilon}$	Deformasyon hızı
$\dot{\epsilon}_0$	Referans deformasyon hızı
m	Sıcaklık üssü
$1/p$	Deformasyon hızı üssü
T	Erime sıcaklığı (K)
σ_{max}	Maksimum akma gerilmesi
ϵ_{max}	Maksimum plastik gerinim (kopma gerinimi)
σ_{eq}	Von Mises eşdeğer gerilmesi
f	Boşluk/hacim oranı
f_0	Başlangıç boşluk hacmi
f_c	Kritik boşluk hacmi
f_f	Nihai boşluk hacmi
ϵ_n	Ortalama gerinim
J	Birim alandaki çatlak büyümesi için gereken iş değeri
C_{hard}	Pekleşme faktörü
σ_m	Hidrostatik gerilme bileşeni

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Volvo V60 gövde malzemeleri	3
Şekil 2.2. Form punta kesit görünümü	4
Şekil 2.3. Form punta montaj süresi kıyaslama	6
Şekil 2.4. Form punta prosesi birim maliyet kıyaslaması	6
Şekil 2.5. Malzeme birleştirme yöntemleri	8
Şekil 2.6. Form punta prosesi.....	9
Şekil 2.7. Form punta bağlantıları test düzeneği.....	9
Şekil 2.8. 6+4 mm ve 1+1 mm sacların form punta kesiti	10
Şekil 2.9. Genişleyen matrisli form punta prosesi	11
Şekil 2.10. Matrissiz form punta	11
Şekil 2.11. Matrissiz form punta	12
Şekil 2.12. Delikli form punta işlemi	12
Şekil 2.13. Manuel form punta düzeneği	13
Şekil 2.14. Bollhoff marka manuel form punta araçları.....	13
Şekil 2.15. Form punta işlemi için tavsiye edilen yerleşim planı	14
Şekil 2.16. Yeniden şekillendirme perçininin kesiti	15
Şekil 2.17. Çıkıntı yüksekliği.....	15
Şekil 2.18. Yeniden şekillendirme işlemi	15
Şekil 2.19. Gerinim hızı etkisi	17
Şekil 2.20. İotropik ve kinematik pekleşme	18
Şekil 2.21. Piecewise lineer gerilme-gerinim eğrileri.....	19
Şekil 2.22. Kürenin eşdeğer oransal deformasyonu sonucu oluşan boşluk modeli	22
Şekil 2.23. f_0 'ın S355 malzeme üzerinde çentikli çekme deneyine olan etkisi	23
Şekil 2.24. f_0 'ın S355 malzeme üzerinde kompakt çekme deneyine olan etkisi	23
Şekil 2.25. f_0 değerinin kompakt çekme deneyinde J-İntegral eğrisine olan etkisi	24
Şekil 2.26. Çentikli dairesel çekme testi numune örneği	24
Şekil 2.27. Kompakt çekme deneyi	25
Şekil 2.28. Kompakt çekme testine f_c 'nin etkisi.....	26
Şekil 2.29. Çentikli dairesel çekme testinde f_c 'nin etkisi.....	26
Şekil 2.30. Kompakt çekme testinde f_c 'nin J-İntegral eğrine etkisi	27
Şekil 2.31. Çentikli dairesel çekme testinde f_f 'in etkisi.....	28
Şekil 2.32. Kompakt çekme testinde f_f 'in etkisi	28
Şekil 2.33. Kompakt çekme testinde f_f 'in JR eğrilerine etkisi	29
Şekil 2.34. Çentikli dairesel çekme testinde f_n 'in etkisi	29
Şekil 2.35. Kompakt çekme testinde f_n 'in etkisi.....	30
Şekil 2.36. Kompakt çekme testinde f_n 'in JR eğrilerine etkisi	30
Şekil 2.37. Çentikli dairesel çekme testinde ϵ_n 'nin etkisi.....	31
Şekil 2.38. Kompakt çekme testinde ϵ_n 'in etkisi	31
Şekil 2.39. Kompakt çekme testinde ϵ_n 'in J_R eğrisine etkisi	32
Şekil 2.40. GTN parametrelerinin etkisi	32
Şekil 3.1. Uygulanacak işlem adımları	37
Şekil 3.2. Sonlu elemanlar mesh modeli proses ilerleyişi.....	38
Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modeli proses ilerleyişi	39
Şekil 3.4. Ayırma deneyi proses ilerleyişi	40

Şekil 3.5. Çekme deneyi proses ilerleyişi	41
Şekil 3.6. AA6XXX-T4 malzemesi gerilme-gerinim eğrisi	42
Şekil 3.7. Karşılaştırma yapılacak form punta takım ölçüleri.....	43
Şekil 3.8. Test numune ölçüleri.....	43
Şekil 3.9. Form punta sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları	43
Şekil 3.10. Ayırma deneyi sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları	44
Şekil 3.11. Çekme deneyi sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları.....	44
Şekil 3.12. Ayırma kuvveti-Deplasman sonuçları	45
Şekil 3.13. Çekme kuvveti-deplasman sonuçları	45
Şekil 4.1. Uygulanacak işlem adımları	46
Şekil 4.2. Taguchi değişkenleri takım geometrik ölçüleri	46
Şekil 4.3. Boyun kalınlığı pareto grafiği.....	56
Şekil 4.4. Kenet miktarı pareto grafiği.....	58
Şekil 4.5. Ayırma kuvveti pareto grafiği.....	59
Şekil 4.6. Boyun kalınlığı için S/N oranları.....	61
Şekil 4.7. Kenet miktarı için S/N oranları.....	61
Şekil 4.8. Ayırma kuvveti için S/N oranları.....	62
Şekil 4.9. Form punta taban kalınlığı ölçüm cihazı	63
Şekil 4.10. Taban sac kalınlığının zımba kuvvetine etkisi.....	63
Şekil 4.11. Taban sac kalınlığının kenet miktarına etkisi	64
Şekil 4.12. Taban sac kalınlığının ayırma kuvvetine etkisi	65
Şekil 4.13. Sürtünme katsayısının kenet miktarı üzerindeki etkisi ve S/N oranı	68
Şekil 4.14. Sürtünme katsayısının ayırma kuvveti üzerindeki etkisi ve S/N oranı	68
Şekil 4.15. Sürtünme katsayısının zımba kuvveti üzerindeki etkisi ve S/N oranı	69
Şekil 5.1. Uygulamada oluşması muhtemel hatalar	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Malzeme birleştirmede kullanılan bazı yöntemler.....	7
Çizelge 2.2. Taguchi Tek Seviyeli Dizi Seçim Tablosu	34
Çizelge 2.3. Taguchi L27 Ortogonal Dizisi	35
Çizelge 3.1. AA6XXX-T4 malzemesinin alaşım bileşenleri	42
Çizelge 3.2. Form punta bağlantısı geometrik ölçü ve test sonuçları	44
Çizelge 3.3. Form punta sonlu elemanlar model sonuçları	44
Çizelge 4.1. Geometrik parametreler ve seviyeleri	47
Çizelge 4.2. Taguchi deney analiz gerinim sonuçları	47
Çizelge 4.3. Taguchi deney değerleri.....	49
Çizelge 4.4. Taguchi deney sonuçları	49
Çizelge 4.5. Ayırma deneyi gerinim değerleri	51
Çizelge 4.6. Çekme deneyi gerinim değerleri	52
Çizelge 4.7. Boyun kalınlığı regresyon analizi katsayıları	54
Çizelge 4.8. Boyun kalınlığı regresyon model özeti	55
Çizelge 4.9. Boyun kalınlığı varyans analizi	55
Çizelge 4.10. Kenet miktarı regresyon analizi katsayıları	56
Çizelge 4.11. Kenet miktarı regresyon model özeti	57
Çizelge 4.12. Kenet miktarı varyans analizi	57
Çizelge 4.13. Ayırma kuvveti regresyon analizi katsayıları	58
Çizelge 4.14. Ayırma kuvveti regresyon model özeti	58
Çizelge 4.15. Ayırma kuvveti varyans analizi	58
Çizelge 4.16. Boyun kalınlığı için ortalamalar delta ve rank değerleri	60
Çizelge 4.17. Kenet miktarı için ortalamalar delta ve rank değerleri	60
Çizelge 4.18. Ayırma kuvveti için ortalamalar delta ve rank değerleri	60
Çizelge 4.19. Literatürdeki çalışmalarda kullanılmış Coulomb sürtünme değerleri	66
Çizelge 4.20. Coulomb sürtünme katsayıları	66
Çizelge 4.21. Taguchi L9 ortogonal dizisi ve deney sonuçları	67
Çizelge 4.22. Kenet miktarı ortalamalar için delta ve rank değerleri	67
Çizelge 4.23. Ayırma kuvveti ortalamalar için delta ve rank değerleri	68
Çizelge 4.24. Zımba kuvveti ortalamalar için delta ve rank değerleri	69
Çizelge 4.25. Ayırma kuvveti varyans analizi sonuçları.....	70
Çizelge 4.26. Model özeti	71
Çizelge 4.27. Ayırma kuvveti yanıt yüzey yöntemi sonuçları	71

1. GİRİŞ

Form punta, kenetlemeli bağlantılar (clinch) olarak da bilinmektedir. Teknolojik gelişmeler ve araç ağırlığının hafifletilmesi üzerine yapılan çalışmalar ve karbon emisyonlarındaki zorlu sınırlar, otomotiv sektörünü mekanik kenetlemeli birleştirme yöntemi olan form punta yöntemine itmektedir. Kullanılacak olan malzemelerin kolay bir şekilde birleştirilebilmesi ve proses maliyetlerinin düşürülmeye çalışılması ile form punta (clinch) yöntemi gündeme gelmektedir. Dayanımı, korozyona karşı gösterdiği direnç ve en önemli özelliklerinden birisi olan hafiflik ile önemi artmaktadır. Farklı cins malzemeler ya kısıtlı yöntemlerle birleştirilebilmektedir ya da birleştirilememektedir. Form punta yönteminin en önemli özelliklerinden birisi, farklı cins malzemelerin birleştirilebilmesine imkân sağlamasıdır (Kaya 2012). İstenilen dayanım, korozyon direnci, hafiflik gibi özelliklere ulaşılabilmesi, ancak farklı malzemelerin kullanımı ile mümkün olmaktadır. Fiziksel ve kimyasal yapıları farklı olan malzemelerin tek başlarına kullanılmaları mümkün değildir. Farklı komponentlerle veya farklı işlevlerle bir arada kullanılmaları gerekmektedir. Araç üzerinde farklı cins malzemelerin kullanımının artması ve mekanik bağlantılarının yapılması bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Günümüzde otomotiv sektörünün ayrılmaz bir parçası olan kaynakla birleştirme yöntemleri bu bağlantılarda yeterli çözüm sunamamaktadır. Kaynak ve diğer birleştirme yöntemlerine alternatif bir yöntem olan form punta teknolojisi aslında yeni bir yöntem değildir. İlk patenti 19'uncu yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. İlk çalışmaları Almanya'da yapılan oldukça eski bir yöntemdir (Kaya 2012). 20'nci yüzyılın sonlarına doğru beyaz eşya, elektronik, inşaat ve otomotiv sektöründe kullanımı artmıştır.

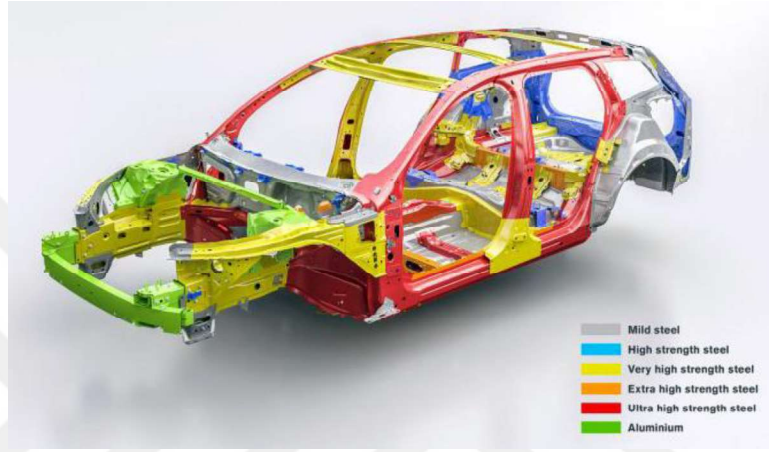
Teknolojik gelişmeler ve yenilikçi çözüm arayışları çeşitli üretim teknolojilerinin çıkmasına ortam hazırlamış ve malzeme seçimindeki çeşitlilik ile mekanik bağlantıların yapılmasında çeşitli sorunlara neden olmuştur. Bu sorunların önüne geçmek amacıyla çalışmalara başlanmıştır. Bu sorunlar, çeşitli teknikler ve teknolojileri meydana getirmeye başlamıştır. Bu teknolojiler imalata esneklik sağlamaktadır. Form punta yöntemi ise bu tekniklerden bir tanesidir. Vida, perçin, somun vb. ara bağlantı elemanları olmadan birleştirme sağlar. Form punta ile birleştirme yöntemi, kaynak ile birleştirme yönteminin en önemli alternatifi olarak görülür. Form punta ve kaynak ile birleştirme yönteminin avantaj ve dezavantajları üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Form punta

yöntemi, herhangi bir ara malzeme olmadan birleştirilmek istenen iki veya daha fazla levhayı lokal deformasyon oluşturarak birleştirilmesi işlemidir. Form punta bağlantılarının dayanımına etki eden birçok parametre vardır. Bu çalışmada, form punta bağlantılarının dayanım davranışını incelemek ve dayanıma etki eden parametrelerin belirlenmesidir. Bağlantının dayanımını belirleyen mekanik kenet miktarı ve boyun kalınlığına etki eden parametreler incelenecektir. Çalışmada, 0.8 mm kalınlığa sahip olan 6XXX serisi alüminyum sacların deneysel verileri ve sonlu elemanlar metoduyla korelasyonu sağlanacaktır. Form punta takımları üzerinde 12 adet geometrik parametre belirlenmiş ve bu parametrelerden hangilerinin bağlantının dayanımına nasıl etki ettiği incelenecektir. Böylece, takım geometrisinde hangi parametrenin ne seviyede önemli olduğu belirlenmiş olacak ve dayanım kalitesi kontrol altına alınmış olacaktır. Ayrıca, sanayide uygulama esnasında meydana gelebilecek hata türlerinin neler olabileceğinden de bahsedilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Sektörde Kullanılan Malzeme Çeşitleri

Gelişen teknoloji, zorlayıcı sınır koşulları ve hafifletme çabaları sebebiyle birçok sektörde farklı malzeme kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu sektörlerden birisi de otomotiv sektörüdür.



Şekil 2.1. Volvo V60 gövde malzemeleri (<https://www.carbodydesign.com/2018/02/the-new-volvo-v60/>, Erişim tarihi: 20.09.2020)

Güvenlik ve işlevsellik göz önünde bulundurulduğunda, mukavemet/yoğunluk oranı yüksek olan malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Malzeme çeşitliliğinin artmasından dolayı farklı üretim teknikleri ve farklı birleştirme yöntemleri gündeme gelmektedir. İleri yüksek mukavemetli çelikler, bor çelikleri, alüminyum, titanyum, magnezyum, orta ve düşük mukavemetli çelikler, kompozit malzemeler gibi birçok malzeme kullanılmaktadır. Bu farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde ise form punta yönteminin kullanımı artırmaktadır.

2.2. Literatür Araştırması

Form punta, iki veya daha fazla sac malzemenin lokal deformasyona uğramasıyla mekanik kenet meydana gelir ve birleşme sağlanır. Ek ve ara malzeme kullanmada soğuk şekillendirme ile birleşme sağlar. Özel uygulamalarda sıcak şekillendirme de uygulanabilir. Form punta işlemi ile genellikle kalınlığı 0,1 mm ile 10 mm arasındaki sac metal levhalar birleştirilebilir. G. Di Lorenzo ve R. Landolfo'nun yaptığı çalışmada tek

etkili perçinleme, çift etkili perçinleme, perçinli form punta (self-piercing rivet) ve dairesel formlu form punta tekniklerini kullanmışlar ve en yüksek kayma dayanımını verdiği için dairesel zımbalı form punta tekniğini önermişlerdir (Di Lorenzo ve Landolfo 2004). Varis ise değişik zımba formları ile yüksek mukavemetli saclarda deneyler yapmış ve dairesel formlu zımbanın daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir (Varis 2003). Paula ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada zımba ve kalıp geometrilerini modellemiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile bu geometrilerin birleşmeye olan etkileri üzerine çalışmışlardır. Zımba ucunun eğimi, kalıp derinliği, kalıp boşluk geometrisinin birleşme formunu nasıl etkilediğini göstermişlerdir. Zımba geometrisinin özellikle boyun kalınlığını etkilediği, daha büyük kenet miktarı (penetrasyon) değerinin ayrılma kuvvetini artırdığını göstermişlerdir (de Paula ve ark. 2007).



Şekil 2.2. Form punta kesit görünümü

M. Carboni ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada çekme kuvvetine, statik ve dinamik yüklere maruz kalan form punta bağlantısının yorulma davranışını incelemişlerdir. Kırılma yapısını incelediklerinde ortalama gerilme değerine bağlı olarak üç farklı hasar biçimi görmüşlerdir. Yorulma sınırının, akma geriliminin yaklaşık olarak %50'si olduğunu bulmuşlardır ve bu değer, kaynak bağlantılarının üzerinde bir değer olduğunu ortaya koymuştur (Carboni ve ark. 2006). Nonberg ise, farklı kalınlık ve özelliklerdeki malzemelerin, lazer kaynağı, nokta kaynağı, yapışkan, form punta gibi farklı birleştirme teknikleri ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma dayanımı üzerine çalışmıştır. Özellikle 1 mm kalınlıktaki dairesel formlu zımba geometrisi olan form punta ile birleştirilmiş bağlantılarının, dikdörtgen geometriye sahip zımba ile birleştirilmiş form punta bağlantılarından yaklaşık olarak iki kat daha fazla yorulma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir (Nordberg 2005).

Mucha ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise form puntanın nokta kaynağına göre üstünlüklerinden bahsetmişlerdir. Soğuk şekillendirmeye DD13 levha, yaşlanma dayanımı iyi ve derin çekmeye uygun DD14 levha, soğuk şekillendirmeye uygun çinko ile kaplanmış DX53+Z levhaları kullanarak çeşitli deneyler yapmışlardır. Form punta

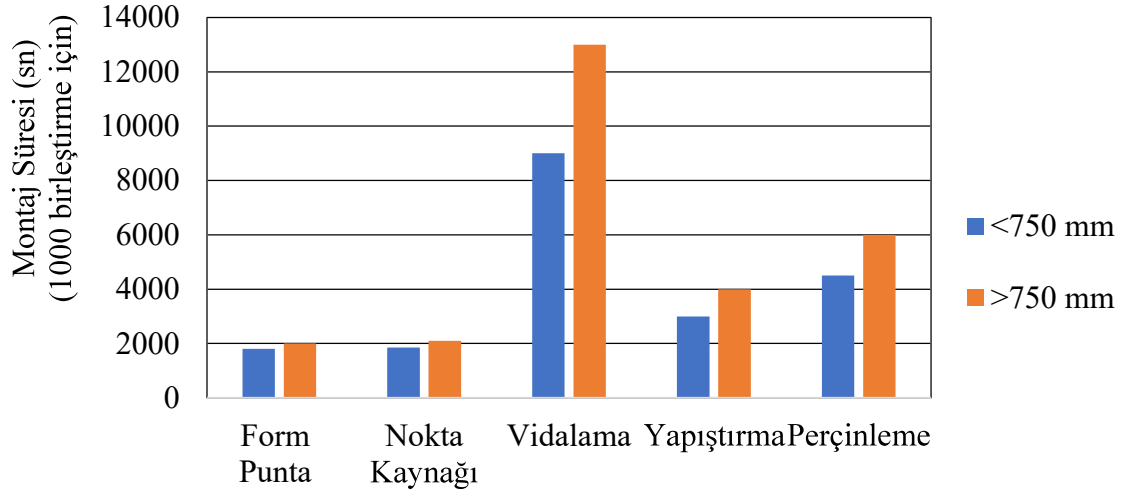
işlemi uygulanacak sac levhaların alt/üst yer değiştirmeler sonucu yapılan testlerde F_{max} değerinde yaklaşık olarak %63'lük fark oluştuğunu göstermişlerdir (Mucha ve ark. 2011).

Mucha'nın yapmış olduğu başka bir çalışmada ise farklı kalıp formlarının maksimum şekillendirme kuvveti üzerine olan etkisini incelemiştir. Kalıp yarıçapı, formu ve derinliğinin bağlantıya olan etkisini incelemiştir. Daha düşük şekillendirme kuvvetinin enerji tüketimini azaltacağı ve proses süresinin kısaltılması ile form punta takım ömrünün artabileceği yönünde incelemelerde bulunmuştur. Kalıp oyuk genişliğinin malzemenin kalıp içerisinde akışını etkileyen, mekanik kenetleme işleminin enerji tüketimini etkileyen en önemli parametreler olduğunu bulmuştur (Mucha 2011).

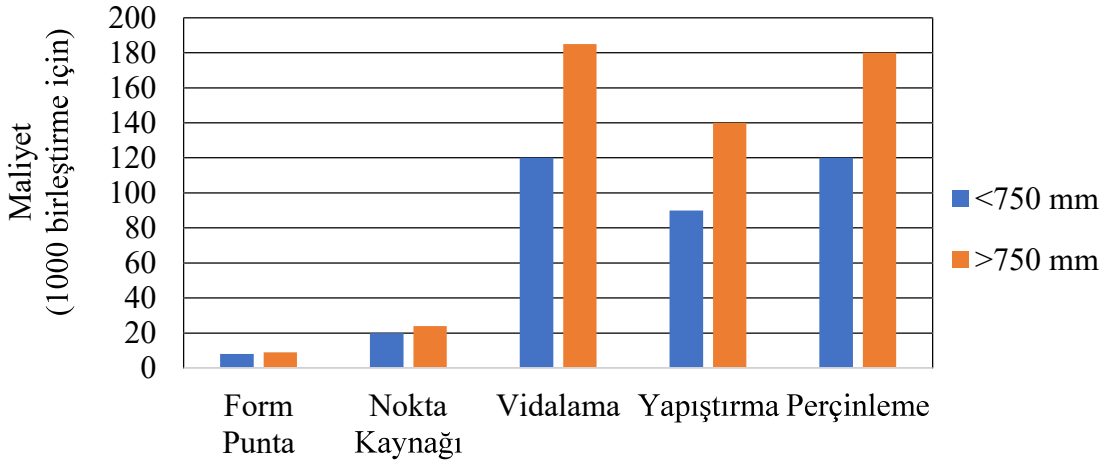
Yukarıda da bahsedildiği gibi form punta üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Zimba formunun dikdörtgenel ve dairesel formdan hangisinin daha uygun olduğunu tespit etmeye yönelik yapılmış çalışmalar vardır. Form punta bağlantılarının yorulma dayanımı üzerine yapılmış çalışmadalar mevcuttur. Form punta takımlarının geometrileri üzerine yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmada ise, form punta takımları üzerinde belirlenmiş olan 12 geometrik parametrenin bağlantının dayanımına nasıl etki ettiği, malzemeler arasındaki sürtünme katsayısının bağlantıya etkisi, zimba kuvvetinin uygun olması ve dolayısıyla enerji verimliliği, sektörde uygulama esnasında karşılaşılabilecek hata türleri gibi sabit matrisli form punta yöntemini baştan sona kapsayacak bir çalışma yapılması planlanmıştır.

2.3. Form Punta ve Diğer Birleştirme Yöntemleri

Form punta ile birleştirme yönteminin, nokta kaynağı, perçinli birleştirme, yapıştırma, vidalı birleştirme yöntemlerine göre maliyet ve montaj süresi bakımından karşılaştırmıştır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 maliyet ve montaj süreleri bakımından form punta ve nokta kaynağı yönteminin diğer metotlara göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir (Rimašauskas ve Bargelis 2005).



Şekil 2.3. Form punta montaj süresi kıyaslama (Rimašauskas ve Bargelis 2005'ten değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.4. Form punta prosesi birim maliyet kıyaslaması (Rimašauskas ve Bargelis 2005'ten değiştirilerek alınmıştır)

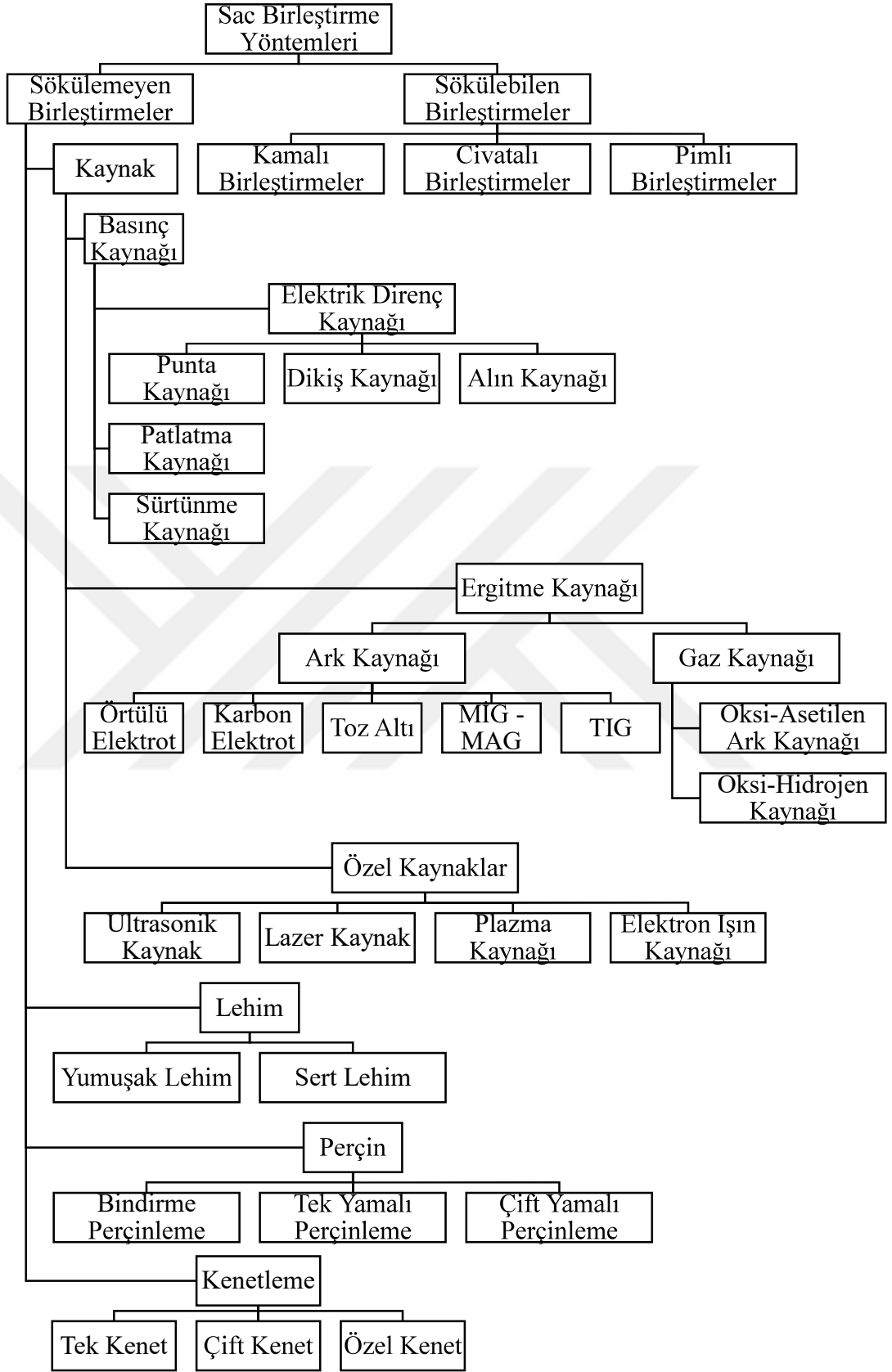
Form punta yöntemi daha çok sac malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Nokta kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan malzemelerin kullanımının artması ile form punta yöntemin kullanılabilirliğini artmaktadır. Perçin, bağlantı elemanı, yapışkan vb. malzeme ihtiyaç olmadığından dolayı maliyet bakımından diğer yöntemlerle kıyaslandığında diğer birleştirme yöntemlerine göre daha düşüktür.

Çizelge 2.1. Malzeme birleştirmede kullanılan bazı yöntemler (Kaya 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Malzeme	Form Punta	Nokta Kaynağı	Vidalama	Yapıştırma	Perçin
Alüminyum	√	X	√	√	√
Bakır	√	X	√	√	√
Düşük Karbonlu Çelik	√	√	√	√	√
Paslanmaz Çelik	√	X	√	√	√

Form punta metodunun diğer metotlara göre bazı avantajları şunlardır:

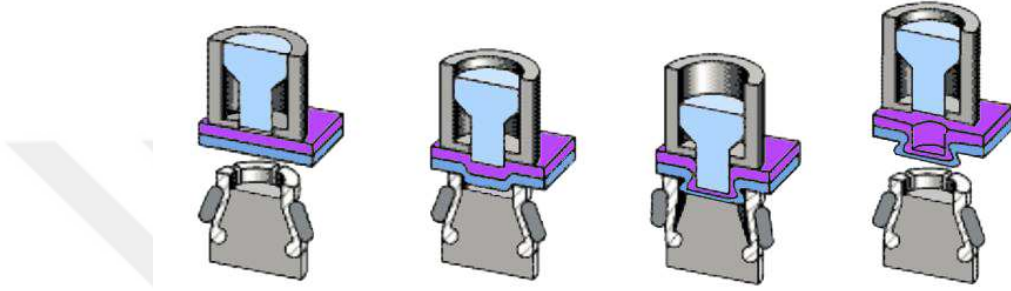
- Ek malzeme veya ara bağlantı elemanına gerek yoktur
- Zehirli gaz, atık madde veya çapak çıkarmaz
- Farklı özellikteki malzemeler birleştirilebilir
- Perçinleme ve vidalama yöntemlerine göre oldukça hızlıdır
- Termal yük oluşmaz
- Proses sonrası yüzey işleme gerek yoktur



Şekil 2.5. Malzeme birleştirme yöntemleri (Kaya 2012'den alınmıştır)

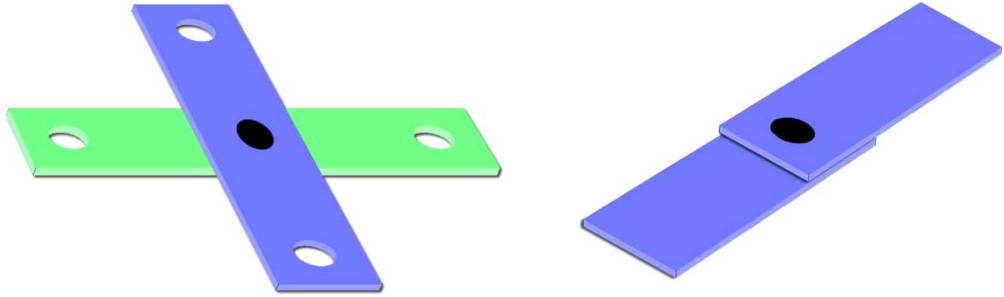
2.4. Form Punta Prosesi ve Çeşitleri

Form punta işlemi genel olarak dört adımdan meydana gelir. Birinci adım: Zimba ve baskı çemberi aşağı doğru hareket eder. İkinci adım: Zimbanın hareketi ile malzeme kalıp boşluğuna doğru hareket etmeye başlar. Üçüncü adım: Tabakaların tabanları ezilerek, malzemenin kalıp boşluğunun formunu alır, tabakalar plastik deformasyona uğramış ve kenetleme sağlanmış olur. Dördüncü adım: Zimba, belirlenmiş kuvvet değerine veya istenilen deplasman değerine ulaştıktan sonra geri çekilir ve form punta işlemi sona erer.



Şekil 2.6. Form punta prosesi

Form punta bağlantılarının dayanım performansını belirlemek için farklı test teknikleri ve prosedürler vardır (Eshtayeh ve Hrairi 2016).



Şekil 2.7. Form punta bağlantıları test düzeneği

Form punta işlemi, kalıp tiplerine göre aşağıdaki gibi gruplanabilir (Bilal ve ark. 2018):

- Sabit matrisli form punta
- Genişleyebilen matrisli form punta
- Matrisiz form punta
- Delikli form punta
- Hibrit form punta

2.4.1. Sabit Matrisli Form Punta

Hamel ve arkadaşları form punta işleminin sürecinin hızlı ve etkili bir şekilde incelenebilmesi için çalışma yapmışlardır. Güncellenen Lagrangian formülasyonunu statik kapalı yaklaşıma dayanmaktadır. Abaqus ticari yazılımını kullanarak sonlu elemanlar kodu geliştirmişlerdir. Proses parametrelerinden takım geometrisi, sürtünme, malzeme davranışını dikkate almışlardır. Statik kapalı metodunu kullanarak bu kodun doğruluğunu, Abaqus ile gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak ispatlamışlardır. Farklı sürtünme katsayılarının, bağlantının taban kalınlığı üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Hamel ve ark. 2000).

Lee ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise çekme kuvvetini ve hata modunu tespit edebilmek için matematiksel bir çözüm geliştirmişlerdir. Form punta bağlantılarında oluşacak çatlama yükü aşağıdaki (2.1) numaralı eşitlikle ifade edilmiştir. Deform-2D ticari yazılımını kullanarak benzetimler yapmışlar, zımba ve kalıbı rijit olarak tanımlamışlardır (Lee ve ark. 2010).

$$F_N = \bar{\sigma}_f \cdot A_N = \pi \cdot (2R_p t_N + t_N^2) \cdot \bar{\sigma}_f \quad (2.1)$$

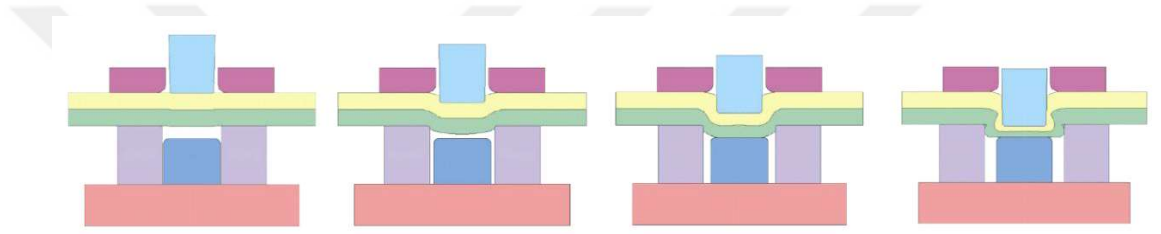
Şekil 2.8’de görüldüğü gibi kalın ve ince sacların zımba ve kalıp boyutları birbirinden çok farklıdır. Israel ve arkadaşları, form punta bağlantılarında kenetlemeyi oluşturabilmek için malzemenin çekme dayanımı ve kalınlığı arttıkça, uygulanacak şekillendirme kuvvetinin 1000 kN gibi çok yüksek değerlere ulaşabileceğini göstermişlerdir (Israel ve ark. 2013).



Şekil 2.8. 6+4 mm ve 1+1 mm sacların form punta kesiti (Israel ve ark. 2013’ten alınmıştır)

2.4.2. Genişleyebilen Matrisli Form Punta

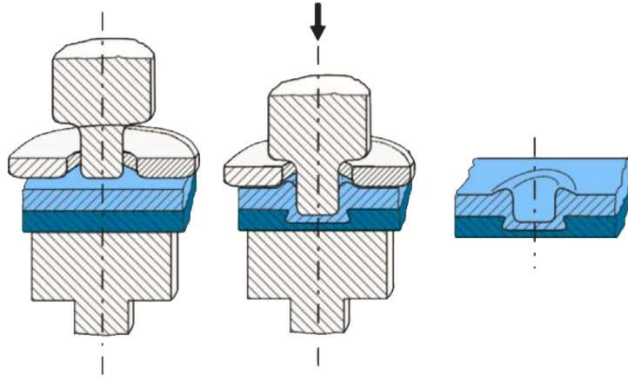
Genişleyebilen matrisli form puntada, malzemenin kalıptan daha kolay çıkması ve malzemenin kalıp duvarlarına doğru akışına izin verdiği için daha yüksek dayanıma sahip bağlantıların oluşmasını sağlaması gibi bazı avantajları vardır (Eshtayeh ve Hrairi 2016). Genişleyebilen form puntada ve sabit matrisli form puntada malzemelerin akış şekilleri arasındaki farkı göstermiş ve genişleyebilen matrisli form punta için sonlu elemanlar yöntemini kullanan yeni bir kod geliştirmişlerdir. Zheng ve arkadaşları ise yöntemi detaylı bir şekilde incelemiş ve genişleyebilen matrisli form punta işlemi için sonlu elemanlar yöntemini kullanan yeni bir kod geliştirmişlerdir (Zheng, ve ark. 2012).



Şekil 2.9. Genişleyen matrisli form punta prosesi

2.4.3. Matrissiz Form Punta

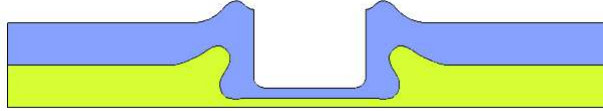
Matrissiz form punta işleminde kalıp oyuğu yoktur ve kalıbın yüzeyi düzdür. Zımba, üstteki sacı alt sacın içine doğru deforme ederek kenet oluşturur ve birleşme sağlanır.



Şekil 2.10. Matrissiz form punta (Gerstmann ve Awiszus 2014'ten alınmıştır)

Neugebauer ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada Deform-2D ticari yazılımını kullanarak, deformasyondan kaynaklanan eleman bozuklukları için otomatik yeniden çözüm ağı oluşturma yöntemini kullanıp magnezyum sacları matrissiz form punta ile

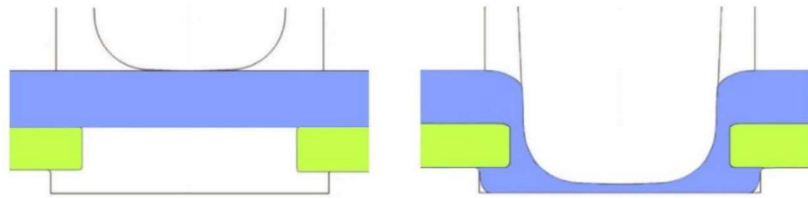
birleştirmişlerdir. Zımba geometrisinin önemli bir etken olduğunu tespit etmişlerdir (Neugebauer ve ark. 2008). Lokal bölgede ısıtma ile yapılacak birleştirme işleminde gerekli olan ısıtma süresi, geleneksel birleştirme ile karşılaştırıldığında bazı avantajları olduğunu tespit etmişlerdir. Matrissiz form punta, kalıp oyuğu olan form puntaya kıyasla eşdeğer ekonomik değere sahiptir (Neugebauer ve ark. 2008).



Şekil 2.11. Matrissiz form punta

2.4.4. Delikli Form Punta

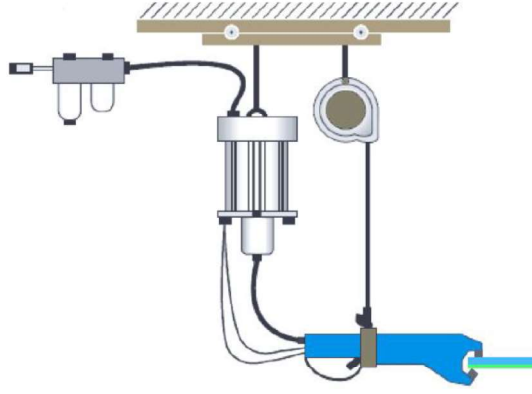
Delikli form punta, yüksek mukavemetli malzemelerin alüminyum gibi daha düşük mukavemetli malzemelerle birleştirebilmek için geliştirilmiştir. Deliği olan kırılğan ve yüksek mukavemetli malzeme alt tarafa (kalıp tarafa), alüminyum gibi sünek malzeme ise üst tarafa (zımba) yerleştirilir. Zımbanın hareketi ile sünek malzeme deliğin içinden geçerek matrisin içerisinde yayılır. Bu yayılma ile genişleyen malzeme kenetlenmiş olur (Bilal ve ark. 2018).



Şekil 2.12. Delikli form punta işlemi

2.5. Form Punta İşleminin Pratikteki Uygulamaları

Form punta işlemi otomatik ve manuel olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Manuel form punta işleminde operatör bir tetik mekanizmasıyla birleştirilecek sacları birleştirir. Farklı boyutlarda ve farklı birleştirme kuvvetlerine sahip manuel form punta araçları vardır. Farklı kuvvet değerlerine sahip elektromekanik ve hidropnömatik form punta araçları mevcuttur.



Şekil 2.13. Manuel form punta düzeneği



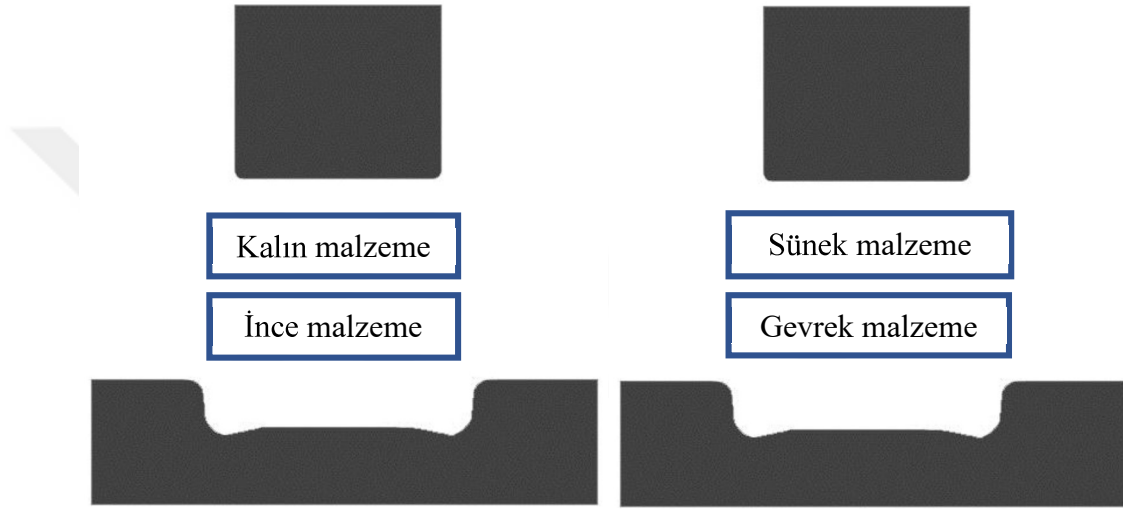
Şekil 2.14. Bollhoff marka manuel form punta araçları (<https://www.boellhoff.com/tr-en/products-and-services/assembly-technology/clinching-systems-rivclinch.php>, Erişim tarihi: 11.08.2020)

Otomatik form punta işlemi ise seri üretim hatlarında robot kollarına adapte edilmiş üniteler ile gerçekleştirilmektedir. Sistem otomasyonel olarak kontrol edilebilir. Genellikle 50 - 80 kN form punta araçları vardır. Robotlar vasıtasıyla form punta işleminin yapılacağı koordinat bellidir ve her seferinde işlem aynı noktaya yapılabilmektedir. Ayrıca, işlem süresini ve oluşabilecek hata olasılığını da düşürmektedir.

2.6. Form Punta Bağlantılarının Özellikleri

Form punta bağlantılarının dayanımını ve birleşmeyi etkileyen birçok parametre vardır. Sacların alt-üst, üst-alt şeklindeki konumları, kalınlıkları, toplam kalınlığa göre alt-üst sacın oranı, matris geometrisi, zımba geometrisi gibi birçok parametre birleşmenin kalitesine etki etmektedir. Doğru yerleşim yapılmadığı zaman fiziksel kenet oluşmayabilir veya kenet oluşsa bile istenilen mekanik özelliklere sahip olmayabilir. Toplam kalınlığa oranla üst sacın ince seçilmesi kırılmaya, alt sacın ince olması

incelmeye ve birleşmenin zayıf olmasına neden olmaktadır. Genel olarak, toplam kalınlığa oranla kalın olan sacın üstte (zımba tarafında), toplam kalınlığa oranla ince olan sacın ise altta (matris tarafında) olacak şekilde konumlandırılması bağlantının dayanımını iyileştirmektedir. Alt sacın, üst saca göre dayanımı daha yüksek olduğu durumlarda birleşme sırasında üst sacın (zımba tarafında) kırılma gözlemlenmiştir. Birleştirilebilirlik açısından değerlendirildiğinde çelik sacın altta olduğu durumlarda üstte kullanıldığı duruma göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Çetkin 2010).



Şekil 2.15. Form punta işlemi için tavsiye edilen yerleşim planı

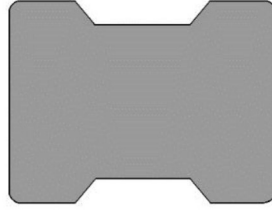
Malzeme özelliklerinin, matris ve zımba geometrisinin form punta bağlantılarının dayanımı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Ayrıca malzemenin yüzey koşulları, kaplama özellikleri vb. durumlar da bağlantının kalitesini etkilemektedir. Sacların birleştirilmesi esnasında mekanik kenet oluşmaması ve saclarda oluşan yırtılma ve çatlamlar en sık görülen hatalardır.

Form punta bağlantılarında dayanımı belirleyen “S” şeklindeki mekanik kenetleme formunun oluşmasıdır. “S” formu arttıkça sacların kenetleme miktarı artar ve böylece dayanımı daha yüksek bir birleşme sağlanmış olur. Kayma kuvveti ve çekerek çıkarma kuvvetine bakıldığında, kayma kuvvetinin çekerek çıkarma kuvvetinden yaklaşık üç kat daha yüksek değerlerde olduğu söylenebilir. Bazı bağlantılarda bu değer beş kata kadar çıktığı da gözlemlenmiştir (Bilal ve ark. 2018’den değiştirilerek alınmıştır).

Alüminyum, titanyum, magnezyum, yüksek mukavemetli çelikler, kompozit malzemeler gibi çok çeşitli malzemelerin birleştirilmesinde avantaj sağlar. Otomotiv sektöründe araçların gövde panellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat yüzey üzerinde bir çıkıntı meydana getirdiği için fonksiyonel yüzeylerde ve görünür parçalarda uygulanmaz.

2.7. Yeniden Şekillendirme İşlemi

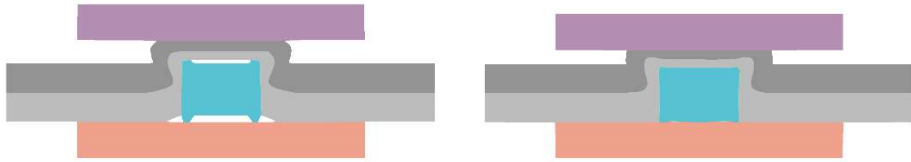
Form punta işlemi yapıldıktan sonra gerek duyulursa bağlantının dayanımını artırmak için yeniden şekillendirme işlemi yapılabilir. Yeniden şekillendirme işlemi, çıkıntı yüksekliğini düşürerek bağlantının çekerek çıkarma ve kayma kuvvetini artırmaktadır. Yeniden şekillendirme işlemi form punta işleminden sonra yapılmaktadır. Proses süresini artırmakta ve farklı araçlar kullanılması gerektiğinden dolayı proses maliyetlerini artırmaktadır.



Şekil 2.16. Yeniden şekillendirme perçininin kesiti



Şekil 2.17. Çıkıntı yüksekliği



Şekil 2.18. Yeniden şekillendirme işlemi

2.8. Bağlantının Kalitesini Etkileyen Faktörler

Form punta bağlantılarının mekanik özellikleriyle ilgili literatürde birçok araştırma ve incelemeler vardır. Form punta bağlantılarının sergilediği non-lineer problemler, malzeme plastisitesi, büyük şekil değişiklikleri gibi etkileşimlerden oluştuğu bilinmektedir. Form puntayı sonlu elemanlar metoduyla modellerken ABAQUS, LS-DYNA, DEFORM, MARC gibi çeşitli yazılımlar kullanılmıştır. Çözümler, statik veya dinamik olarak, kapalı veya açık (implicit, explicit) olarak adlandırılan farklı tekniklerle ele alınmıştır. Bağlantının özelliklerini belirlenebilmesi için yukarıda da bahsedildiği gibi çeşitli yazılımlar ve teknikler geliştirilmiştir. Eshtayeh ve Hrairi'nin 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada, form punta prosesi için kullanılan sonlu elemanlar yöntemlerini araştırmışlar ve literatürde yapılmış olan farklı çalışmalarını derlemişlerdir (Eshtayeh ve Hrairi 2016).

2.9. Hasar Modelleri

Form punta işleminde kırılma ve çatlakları önlemek için bazı hasar modeli ve başarısızlık kriteri kullanılması faydalı olabilir. Lambiase ve Di Ilio form punta işleminde oluşabilecek kırılmaları modelleyebilmek için bir hasar modeli kullanmışlardır. Kurulan model deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır (Lambiase ve Di Ilio 2016). Zhao ve arkadaşları başarısızlık davranışını hem sayısal olarak hem de deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Modified Rousselier modelini kullanmışlar ve bu modelin form punta işleminde oluşabilecek başarısızlık davranışını etkili bir biçimde açıklayabilir (Zhao ve ark. 2014). Song ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, çelik ve alüminyum form punta yöntemi ile birleştirmişler, mekanik özellikleri ve başarısızlık davranışlarını ölçmek için çalışmalar yapmışlardır. Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) hasar modelini kullanmışlar ve modeli deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. GTN hasar modeli, bağlantının davranışını etkili biçimde açıklayabilmektedir (Song ve ark. 2019).

2.10. Malzeme Modelleri

Malzemelerin davranış şekillerini ve kararsızlık durumlarını belirleyen en önemli faktör malzeme modelidir. Plastik deformasyonun fazla olduğu durumlarda pekleşme (strain hardening) tanımlanması gerekmektedir. Orantılı yükleme durumlarda için malzemenin

gerilme-birim uzama eğrisinin tanımlanması yeterlidir. Dinamik ve orantısız yükleme durumlarında ise model karmaşıklığı arttığı için bu tanımlama yetmemektedir. Plastisite malzeme modelleri deformasyon hızına bağlı (rate dependent) ve deformasyon hızına bağımsız (rate independent) olarak değerlendirilebilir. Deformasyon hızına bağlı modellerde uzama pekleşmesi bünye denklemlerini (constitutive law) etkilemektedir (Ceylan 2008).

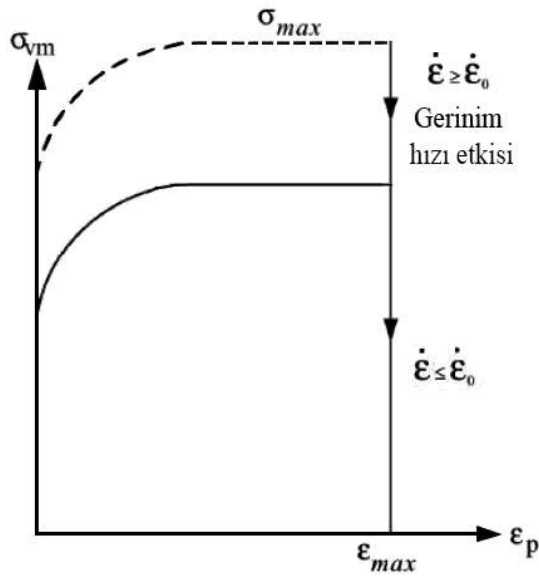
Bu çalışmada elastik-plastik malzeme modelleri olarak Johnson-Cook (JC), Cowper-Symonds (CS), Zerilli-Armstrong (ZA), Piecewise, Gurson malzeme modelleri ele alınacaktır.

2.11. Johnson-Cook Malzeme Modeli

Johnson-Cook malzeme modeli akma sınırının altında lineer elastik davranış, akma sınırının üzerinde ise plastik davranış gösterir. Gerilme ve gerinim arasındaki ilişki (2.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n)(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - \hat{T}^m) \quad (2.2)$$

$$\hat{T} = \frac{T - 298}{T_e - 298} \quad (2.3)$$



Şekil 2.19. Gerinim hızı etkisi (Ceylan 2008'den alınmıştır)

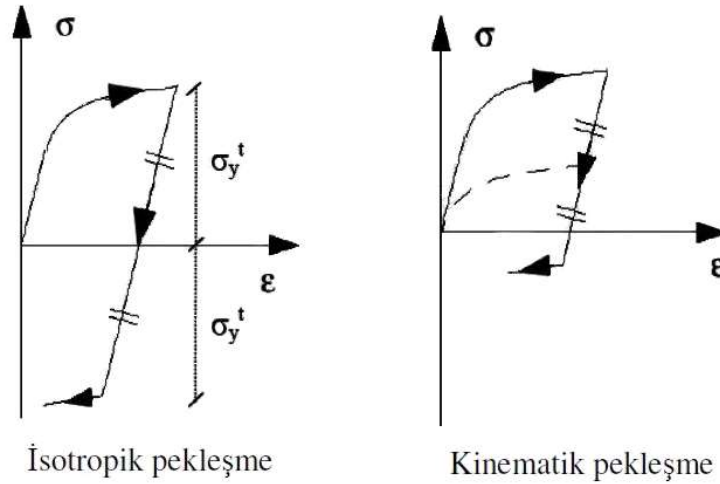
Şekil 2.19’da görüldüğü gibi maksimum gerilme değerine ulaşıldığı zaman gerilme değeri sabit kalıp gerinim artışı devam edecektir. Maksimum plastik gerinim değeri geçildiğinde ise kopma başlayacaktır (Ceylan 2008).

2.12. Cowper-Symond Malzeme Modeli

Cowper-Symond malzeme modeli elastik plastik bir malzeme modelidir. Johnson-Cook malzeme modeline çok benzemektedir. Gerinim değeri Johnson-Cook malzeme modelinden farklı olarak hesaplanmaktadır. Bu malzeme modeli için hasar ve sıcaklık etkisi kullanılmamaktadır.

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + \frac{1}{c} \dot{\varepsilon}^m\right) \quad (2.4)$$

Bu malzeme modelinde, sonlu elemanlar analiz programlarında pekleşme faktörü olarak bilinen C_{hard} değerinin 0 olarak girilmesi durumunda malzeme isotropik davranış, 1 olarak girilmesi durumunda ise kinematik davranış gösterir. Yükleme yönü değiştiği zaman, malzeme yüksüz duruma geçerek gerinim değeri düşmektedir (Ceylan 2008).



Şekil 2.20. İsootropik ve kinematik pekleşme (Ceylan 2008’den alınmıştır)

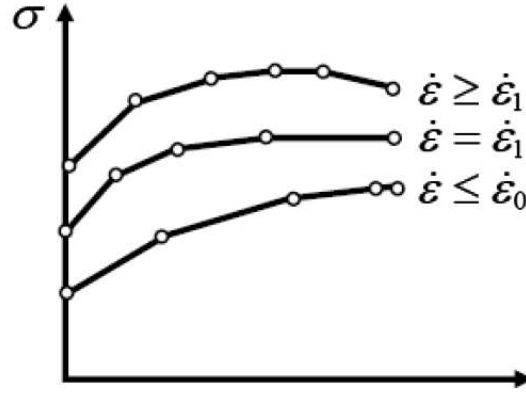
2.13. Piecewise Malzeme Modeli

Piecewise malzeme modelinde elastik davranış diğer malzeme modellerindeki gibidir. Pekleşme davranışı ise, gerinim hızına bağlı olan bir fonksiyonla tanımlanır. Gerinim

hızının diğer malzeme modellerine göre daha esnek ve hassas olmasından dolayı otomotiv sektöründe sık kullanılan bir malzeme modelidir. Çekme testinden elde edilen gerilme gerinim eğrisi modelde direk olarak kullanılabilir. Maksimum gerinim hızı belirlenmelidir. Değişik gerinim hızlarında yapılan testlerden elde edilen eğriler kullanılır. Eğriler arasında kalan bir ara değer için interpolasyon yapılır (Ceylan 2008).

Pekleşme modeli izotropik, kinematik veya hem izotropik hem kinematik şeklinde tanımlanabilir.

$$\sigma_y = \sigma_y^0(\varepsilon_p) \cdot c \cdot f(p) \quad (2.5)$$



Şekil 2.21. Piecewise linear gerilme-gerinim eğrileri (Ceylan 2008'den alınmıştır)

2.14. Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) Modeli

Sünek metallerde plastik şekil değiştirme ve kırılma mekaniği üç evrede ele alınır. Bu evreler; boşluk oluşumu başlangıcı, boşluk büyümesi, büyüyen boşlukların birleşmesidir. Büyüyen boşlukların birleşmesi ile boşlukların dışındaki bölgelerde kalan matris üzerindeki dengesizlikten dolayı kırılma meydana gelmiş olur.

Sünek metallerin farklı bölgelerinde farklı zamanlarda meydana gelen soğumalardan dolayı veya içinde barındırdığı alaşım malzemelerinin özellik ve davranışından dolayı tane sınırları oluşmaktadır. Tane sınırları arasında düzensizliklerden dolayı boşluklar oluşabilmektedir. Ayrıca, malzemenin içerisinde barındırdığı farklı alaşım maddelerinin

farklı mekanik özellik göstereceğinden ve yükleme altında farklı deformasyon göstereceklerinden dolayı da boşluk oluşabilir (Türtük 2018).

Gurson, 1970’li yıllarda yapmış olduğu çalışmalarla bir boşluk modeli oluşturmuştur. Maksimum plastik iş prensibi ve kinematik olarak izin verilen hız vektörlerini baz alarak, küresel ve silindirik boşlukların büyümesi için plastik potansiyel fonksiyonu belirlenmiştir. Mikroskobik açıdan sünek malzemelerin kırılma süreci, boşluk çekirdeklenmesi, boşluk büyümesi ve boşlukların birleşmesidir. Gözenekli malzemeler için Gurson tarafından (2.6) eşitliği verilmiştir (Song ve ark. 2019);

$$\varphi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2f \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_0}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (2.6)$$

$f = 0$ Olduğu durumda malzeme homojen ve hasarsızdır. Gurson, boşlukların büyümesi için sadece hacimsel büyümeyi ele almıştır. Gurson tarafından oluşturulan bu fonksiyon, başlangıç durumunda herhangi bir kusur olmayan ve gerinimlerin düzensiz dağıldığı yükleme durumlarda malzemenin kırıldığı zaman gerçekte olduğundan çok daha fazla gerinim değerleri olduğu görülmüştür. Bunun üzerine Tvergaard, Gurson’un teorisini geliştirerek eklemeler yapmıştır. Literatürde Gurson–Tvergaard (G–T) modeli olarak isimlendirilir (Corigliano ve ark. 2000).

$$\varphi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_0}\right) - 1 - q_3 f^2 = 0 \quad (2.7)$$

q_1, q_2, q_3 parametrelerini belirleyebilmek ve gerçeğe daha yakın durumlar elde edebilmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Literatürde en sık karşılaşılan değerler; $q_1 = 1,5, q_2 = 1, q_3 = q_1^2$ ’dir. Gurson-Tvergaard modeli, bir başarısızlık kriteri olmadığından dolayı, malzeme sertliğindeki hızlı düşüşleri ve boşluk birleşme etkilerini tam olarak açıklayamadığı ortaya çıkmıştır. Bunun üzerine Needleman ve Tvergaard, Gurson’un malzeme modelini geliştirerek, boşluk birleşmesini daha etkin hesaplayacak ve daha hassas sonuçlar veren bir model oluşturmuşlardır. Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) modeli olarak isimlendirilir (Slimane ve ark. 2015).

$$\varphi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2}q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_0}\right) - 1 - (q_3 f^*)^2 = 0 \quad (2.8)$$

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \delta(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (2.9)$$

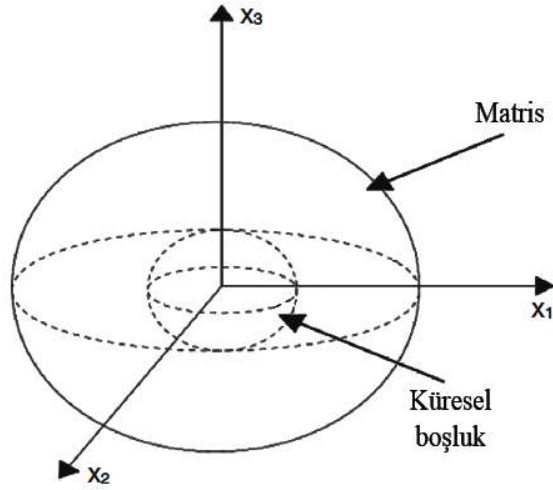
$$\delta = \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} \quad (2.10)$$

$$f_u^* = \frac{1}{q_1} \quad (2.11)$$

Dolayısıyla;

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \left(\frac{\frac{1}{q_1} - f_c}{f_F - f_c}\right)(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (2.12)$$

Boşluk birleşmesini tanımlayan bu ek fonksiyonda, f_c boşluk birleşme başlangıcı eşik değerini gösteren kritik boşluk-hacim oranı, f_f son kırılma anındaki boşluk-hacim oranıdır.

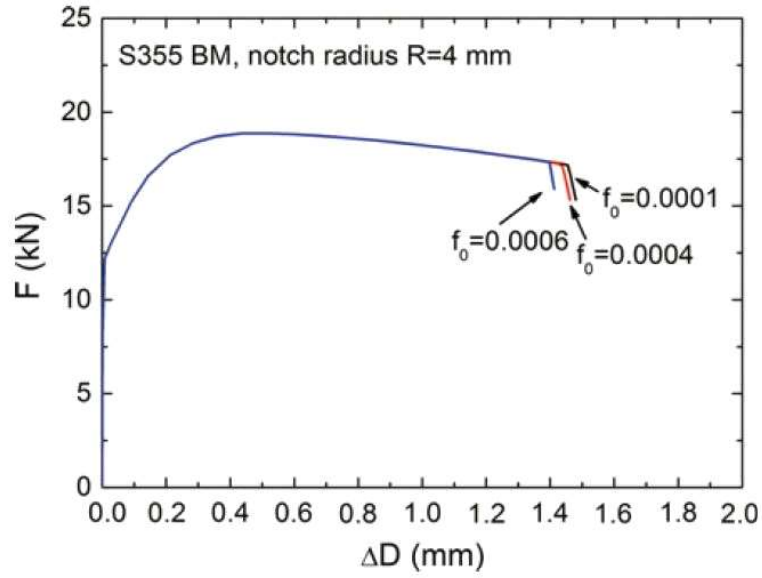


Şekil 2.22. Kürenin eşdeğer oransal deformasyonu sonucu oluşan boşluk modeli (Slimane ve ark. 2015'ten değiştirilerek alınmıştır)

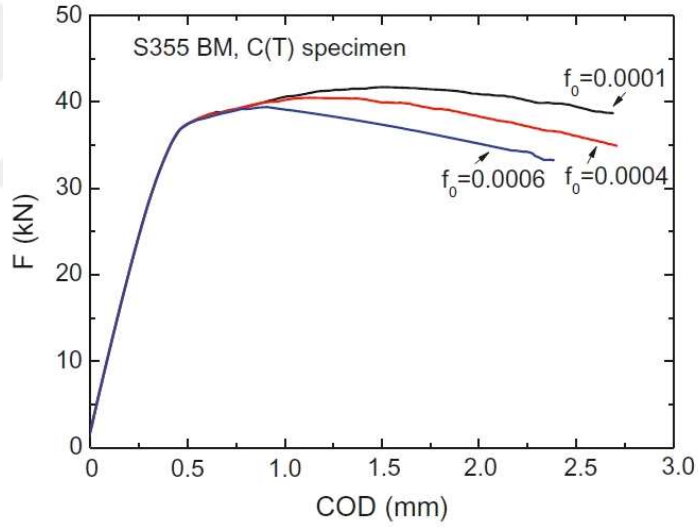
GTN hasar modelinin simülasyonlarda uygulanabilmesi için dokuz parametrenin tanımlanması gerekmektedir. ϵ_n , f_n , s_n parametreleri boşluk çekirdeklenmesini tanımlamak için kullanılır. f_0 , f_c , f_f parametreleri boşluk başlangıcından kusur sonuna kadar olan hasarı tanımlamak için kullanılır. q_1 , q_2 , q_3 Gurson modelinin sonucunun hassasiyetini artırmak için kullanılır. Başlangıçta boşluk hacmi f_0 , boşluk birleşmesi meydana geldiği zaman kritik boşluk hacmi olan f_c ve boşluk çekirdeklenmesinin hacim oranı olan f_n ile etkileşime girer. Simülasyonlarda hangi parametrenin modeli etkilediğini kestirmek güçtür. Bu yüzden literatürde çoğu çelik malzeme için $q_1 = 1,5$; $q_2 = 1$; $q_3 = 2,25$ olarak alınması tavsiye edilmiştir. GTN parametrelerinin simülasyonlara olan etkileri ele alınacaktır (Tu 2018).

2.14.1. f_0 Etkisi

Boşluk çekirdeklenmesi otomotiv sektöründe sık kullanılan S355 çeliği düşünüldüğünde, boşluk başlangıcının etkisini zayıflatır. GTN modelinde boşluk başlangıcı Rousselier modelindeki kadar önemli değildir. Bu yüzden, GTN modelinde kullanılan f_0 değeri, Rousselier modelinde kullanılan f_0 değerinden daha küçüktür.



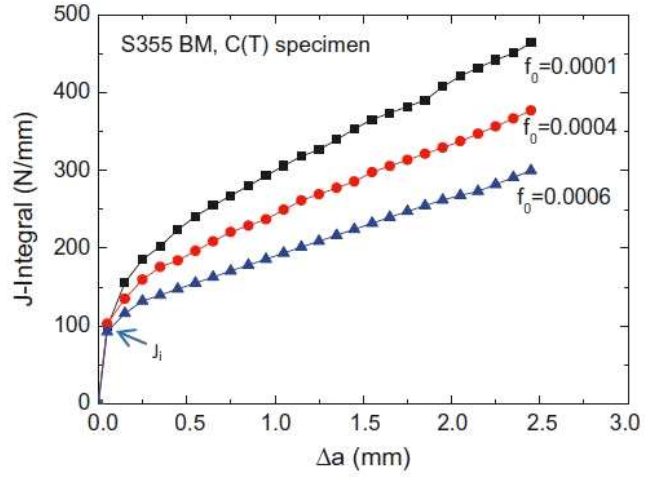
Şekil 2.23. f_0 'ın S355 malzeme üzerinde çentikli çekme deneyine olan etkisi ($f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $\varepsilon_n=0,2$; $lc=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



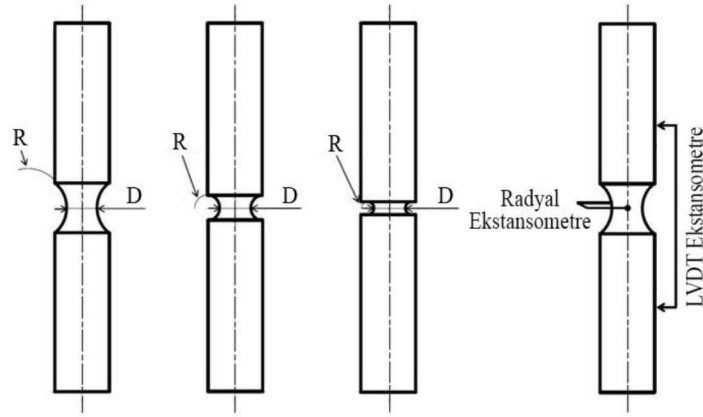
Şekil 2.24. f_0 'ın S355 malzeme üzerinde kompakt çekme deneyine olan etkisi ($f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $\varepsilon_n=0,2$; $lc=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

Çentikli çekme deneyinde kuvvet-birim uzama eğrisinin eğimini etkilemez. Çünkü yüksek f_0 değerinin, daha önceki deformasyon durumlarında f değerinin f_c değerine ulaşmasını sağlar. Kompakt çekme deneyinde, yüksek f_0 değeri çatlak başlatmak için J-İntegral değerini çok fazla etkilemez. Fakat, Şekil 2.24'de görüldüğü gibi kuvvetin azalmasında etkisi olur. Bunun nedeni, ilk çatlakın farklı bir f_0 değerinde benzer bir enerjiye ihtiyaç duymasıdır. Yüksek bir f_0 değeri, J-İntegral eğrisinin eğimini önemli

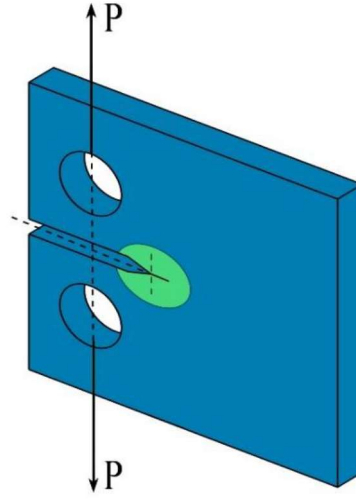
ölçüde düşürür. Çünkü f_0 değerinin yüksek olması, çatlak birleşmesi için gerekli olan enerji değerine daha erken ulaşılır ve çatlak ilerlemesi için daha az enerji gerektiği anlamına gelir (Tu 2018).



Şekil 2.25. f_0 değerinin kompakt çekme deneyinde J-İntegral eğrisine olan etkisi (Malzeme: S355; $f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $f_t=0,2$; $\epsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



Şekil 2.26. Çentikli dairesel çekme testi numune örneği

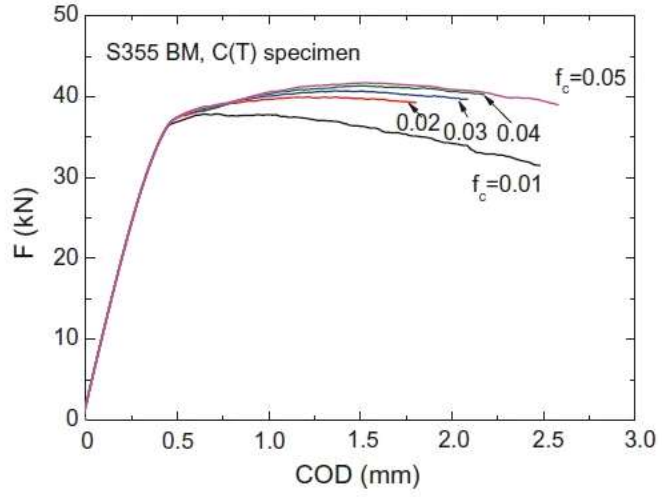


Şekil 2.27. Kompakt çekme deneyi

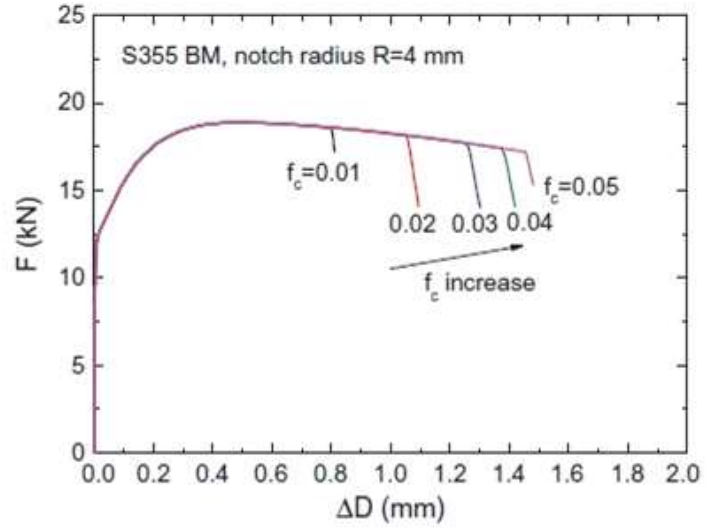
J-İntegral Metodu: J-integral metodu, elastik-plastik davranış gösteren malzemelerdeki çatlak büyümesini tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir. Rice tarafından 1960'lı yıllarda ortaya konmuştur. Rice'a göre integrasyon çizgisi tarafından çevrelenmiş bir alandaki dış kuvvetin yapmış olduğu iş ile iç potansiyel enerji arasında bir ilişki bulunur. İntegrasyon çizgisi tarafından çevrelenmiş alan içerisinde malzeme herhangi bir enerji harcamıyorsa $J=0$ olur. Büyümekte olan bir çatlak integrasyon çizgisi tarafından çevreleniyorsa, J değeri birim alandaki çatlağın büyümesi için gereken iş değerini verir (Yılmaz 2015).

2.14.2. f_c Etkisi

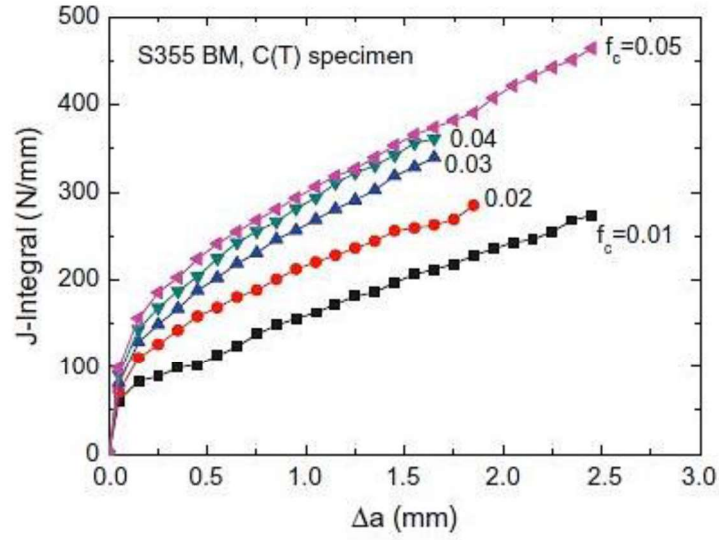
GTN modelinde f_c değeri, boşluk birleşmesi meydana geldiğinde hacim oranıdır. GTN modelindeki f_c değeri, Rousselier modelindeki f_c değerinden farklıdır. Literatürde f_c değerinin 0,01-0,05 arasında olması gerektiği bulunmuştur. Çentikli dairesel numune çekme deneyinde f_c değerinin kuvvet-birim uzama eğrisine olan etkisi Şekil 2.28'de görülmektedir. Yüksek f_c değerleri kırılmanın daha geç olmasını sağlarken, kırılma noktasından sonraki eğrilerin eğimini etkilemez. Çentikli dairesel numuneler için, f_c değerinin artması stres taşıma yeteneğini azaltır (Tu 2018).



Şekil 2.28. Kompakt çekme testine f_c 'nin etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_n=0,01$; $f_f=0,2$; $\varepsilon_n=0,2$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



Şekil 2.29. Çentikli dairesel çekme testinde f_c 'nin etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_n=0,01$; $f_f=0,2$; $\varepsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

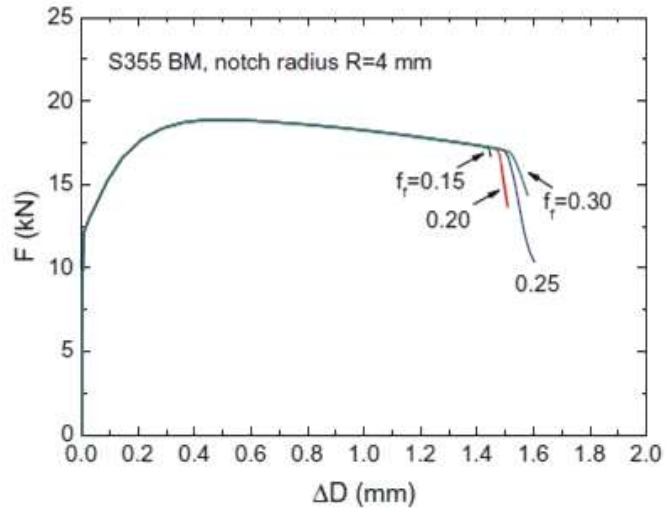


Şekil 2.30. Kompakt çekme testinde f_c 'nin J-İntegral eğrine etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_n=0,01$; $f_f=0,2$; $\epsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

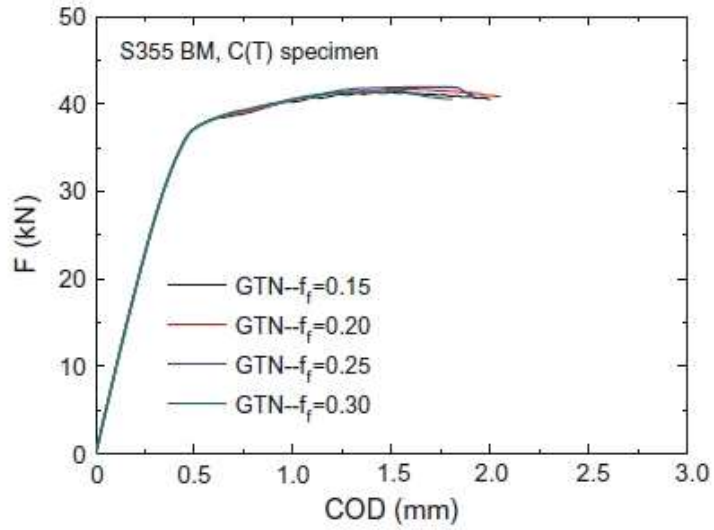
Yüksek f_c değeri boşluk birleşme eşiğinin yüksek olduğu anlamına gelir. Böylece, boşluk birleşmesiyle oluşacak çatlak ilerlemesi için daha fazla kuvvet ve daha fazla enerji gerektiği anlamına gelir.

2.14.3. f_f 'in Etkisi

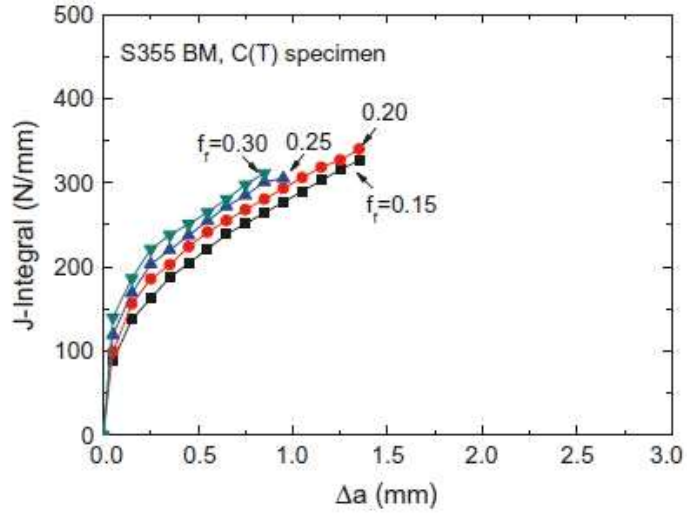
GTN modelinde f_f , nihai boşluk hacmidir ve malzemenin stres taşıma kabiliyetini yitirdiği hacim oranıdır. Rousselier modelinde tanımlanan f_c ile aynı işleve sahiptir. Çentikli dairesel çekme numunesinde kuvvetin hızlı düşüşünün kırılma noktası üzerindeki etkisi çok azdır. İlk çatlak yayılmasından sonraki J_R eğrileri çok benzerdir. Daha yüksek f_f değeri, daha yüksek J_i değeri demek olsa da ilk çatlak J_R eğrileri birbirine çok benzerdir.



Şekil 2.31. Çentikli dairesel çekme testinde f_r 'in etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $\epsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



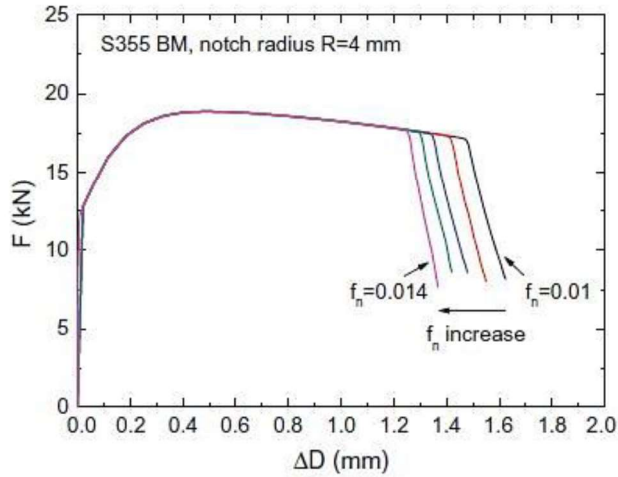
Şekil 2.32. Kompakt çekme testinde f_r 'in etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $\epsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



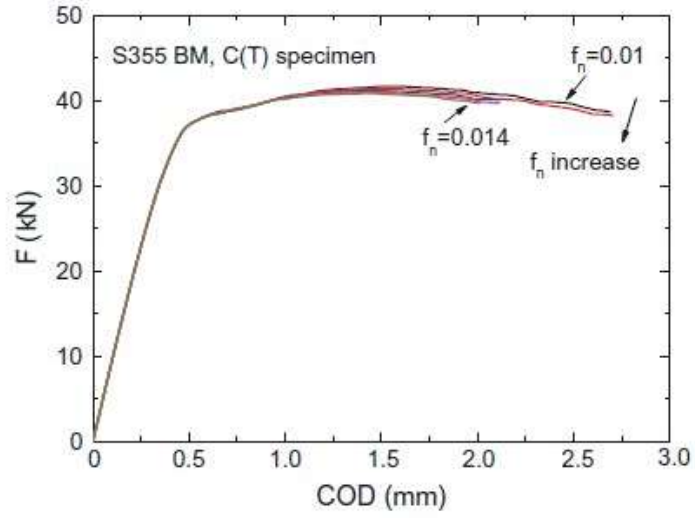
Şekil 2.33. Kompakt çekme testinde f_r 'in JR eğrilerine etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_n=0,01$; $\varepsilon_n=0,2$ $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

2.14.4. f_n Etkisi

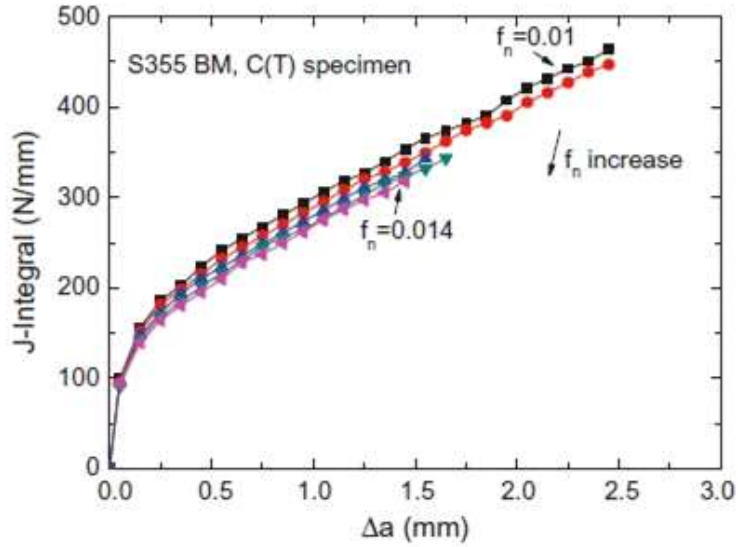
GTN modelinde f_n nihai kırılma noktasından sonra eğrinin eğimi sabitken numunelerin daha erken hasara uğramasına sebep olur. Yeni boşlukların ortaya çıkmasıyla f_c değerine daha hızlı ulaşılır. J_R eğrisinde, J_i değeri için neredeyse hiçbir etkisi yoktur.



Şekil 2.34. Çentikli dairesel çekme testinde f_n 'in etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_r=0,2$; $\varepsilon_n=0,2$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



Şekil 2.35. Kompakt çekme testinde f_n 'in etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_f=0,2$; $\varepsilon_n=0,2$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

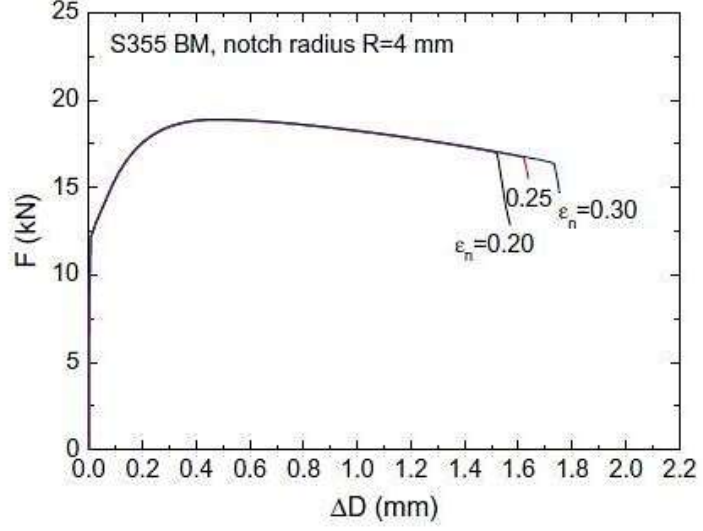


Şekil 2.36. Kompakt çekme testinde f_n 'in JR eğrilerine etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_f=0,2$; $\varepsilon_n=0,2$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

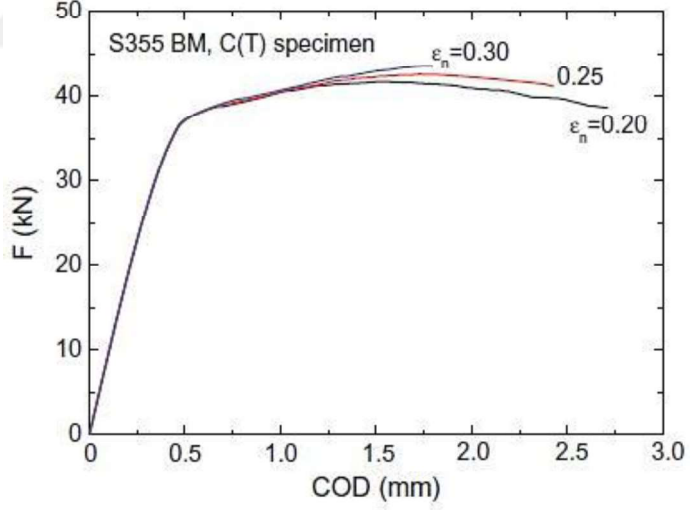
2.14.5. ε_n Etkisi

En değeri, boşluk çekirdeklenmesi meydana geldiğinde ortalama gerinim değeridir. ε_n değerinin etkisi, f_n değeri ile ilişkilidir. Çentikli dairesel çekme testinde, daha yüksek ε_n değeri kuvvet-birim uzama eğrisinin eğimini etkilemezken daha geç kırılma sağlar. Yüksek ε_n değeri, ilk çatlama oluşuncaya kadar J_i değeri üzerinde büyük bir etki

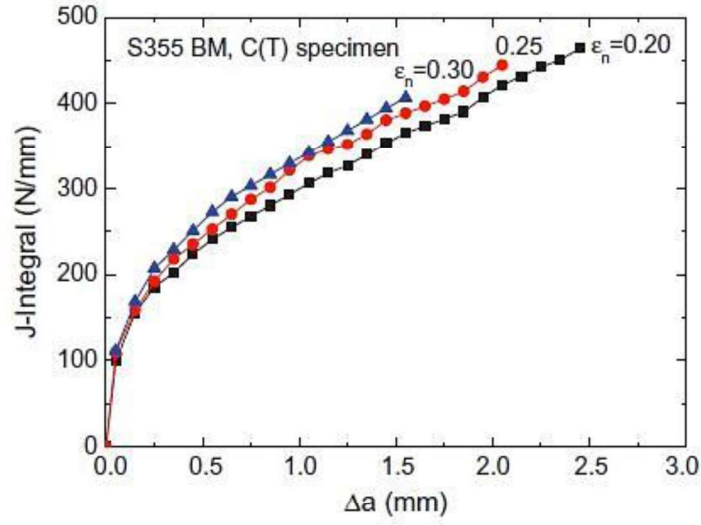
oluşturmasa da yüksek bir kırılma direncine dolayısıyla daha yüksek bir J_R eğrisine sebep olur.



Şekil 2.37. Çentikli dairesel çekme testinde ϵ_n 'nin etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_f=0,2$; $f_n=0,01$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

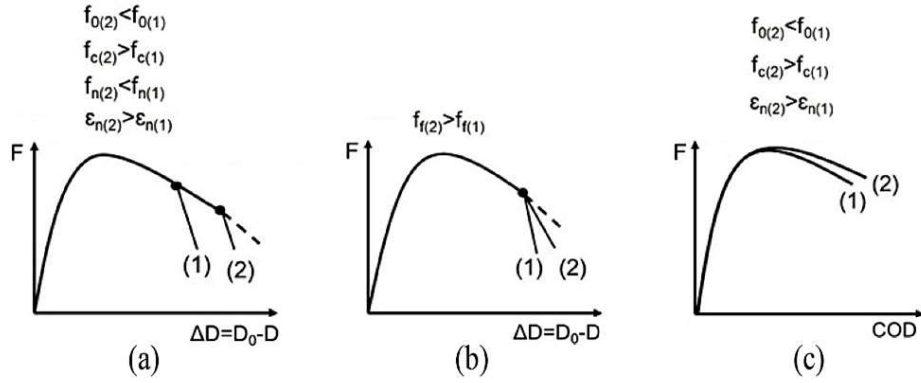


Şekil 2.38. Kompakt çekme testinde ϵ_n 'in etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_f=0,2$; $f_n=0,01$; $l_c=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)



Şekil 2.39. Kompakt çekme testinde ϵ_n 'in J_R eğrisine etkisi (Malzeme: S355; $f_0=0,0001$; $f_c=0,05$; $f_f=0,2$; $f_n=0,01$; $lc=0,05$) (Tu 2018'den alınmıştır)

Özet olarak; f_0 , f_c , f_n , ϵ_n parametrelerinin çentikli dairesel çekme testinde ani düşmelere sebebiyet verdiği, f_f değerinin ise kırılma başlangıcından sonra eğrinin eğimini etkilediği belirtilmiştir.



Şekil 2.40. GTN parametrelerinin etkisi: a) f_0 , f_c, f_n, ϵ_n etkisi, b) f_f etkisi, c) f_0 , f_c, ϵ_n etkisi

2.15. Taguchi Metodu

Deneysel tasarımı, modern istatistiğin temellerinin kurucularından birisi olarak da anılan Ronald Aymler Fisher'ın tarım sektöründe yapmış olduğu araştırmalar neticesinde bulunmuş ve geliştirilmiştir. 1970'li yıllara kadar deney tasarımının ana unsurları Avrupa'da çok yaygın değilken, Japon mühendisler bu alana ilgi göstermişler ve

kullanmaya başlamışlardır. Japon bir mühendis ve istatistikçi olan Genichi Taguchi düşük değişkenliğe sahip, çevre şartlarından etkilenmeyecek bir yöntem geliştirmiştir.

Geleneksel deneylerde tüm değişkenler sabit tutulurken sadece bir faktör değiştirilerek sonuca olan etkisi incelenir. Kullanılacak olan değişken sayısı ve seviyesi arttıkça, yapılacak olan deney sayısı da artacaktır. Maliyet ve süre kayıpları artması, tüm deneylerin yapılmasının mümkün olmaması, deney sayısının artmasından dolayı yapılabilecek hata olasılığının artması gibi sebeplerden dolayı uygulamada yapılması bazen mümkün olmayabilmektedir. Deney tasarım yöntemlerinden birisi olan Taguchi Metodu, ortogonal dizileri kullanarak, kontrol altında tutulamayan faktörlerin etkilerini minimize etmeye çalışan bir deney tasarım metodudur. Taguchi Metodu, kendine özgü sistematik bir yaklaşımla performans ve kalite tasarımlarını optimize etme olanağı sunar.

Taguchi tasarımında optimizasyon kriteri olarak performans istatistiği (S/N) kullanılmaktadır. En büyük-en iyi, en küçük-en iyi ve nominal-en iyi olmak üzere üç farklı performans istatistiği vardır. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak S/N değerleri hesaplanır.

En büyük en iyi;

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_1^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (2.13)$$

En küçük en iyi;

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_1^n Y_i^2 \right] \quad (2.14)$$

Nominal en iyi;

$$S/N_L = -10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (2.15)$$

S/N_L 'yi en büyük yapan parametre seviyeleri optimumdur. Fakat Taguchi Metodu'nda optimum değişken seviyesini veren deney yapılmamış olabilir.

Seviye: Deneylerde, faktörlerin olması gerektiği düşünülen değerlerdir. 2, 3, 4 veya 5 seviyeli deneyler olabilir. Deneyler genelde aynı seviyeli faktörlerden oluşabildiği gibi, farklı seviyeli deneyler de tasarlanabilir.

Faktör: Deneyde bulunan, kalite değişkenliğini etkileyeceği düşünülen, kontrol altında tutulabilen değişkenlerdir.

Gürültü: Kontrol altında tutulamayan veya kontrol altında tutulması zor olan, kalite değişkenine ve sonuca etkisi olduğu düşünülen değişkenlerdir.

Kalite Değişkeni: Deneylerde, ölçülmesine karar verilmiş çıktı ve deney sonuçlarıdır.

Ortogonal dizimler kullanılarak hangi denemede hangi faktörün, ne düzeyde kullanılacağına saptanması Taguchi metodunun temelini meydana getirir. Taguchi yapmış olduğu çalışmalardan sonra deneme planları oluşturmuş ve bunların Hadamard'ın ortogonal dizimleri ile aynı olduğu görülmüştür. Bu dizimler esas alınarak yapılacak denemeler ile tam faktöriyel bir denemenin sonuçlarının aynı olacağını düşünmüş ve yapmış olduğu çalışmalarla bunu kanıtlamıştır (Çakmak 2019).

Ortogonal dizimler L harfinden sonra deney sayısı eklenerek ifade edilir. Taguchi metodunda genel olarak kullanılan ortogonal dizimler seviyelerine göre şu şekildedir;

- 2 seviyeli: L8, L12, L16, L32
- 3 seviyeli: L9, L18, L27
- 4 seviyeli: L16, L32

Tek seviyeli dizilerin yanı sıra karışık seviyeli Taguchi dizileri de mevcuttur.

Çizelge 2.2. Taguchi Tek Seviyeli Dizi Seçim Tablosu

Tasarım	2 Seviyeli	3 Seviyeli	4 Seviyeli	5 Seviyeli
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			

Çizelge 2.2. Taguchi Tek Seviyeli Dizi Seçim Tablosu (devamı)

L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

Çizelge 2.3. Taguchi L27 Ortogonal Dizisi

Deney No	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1

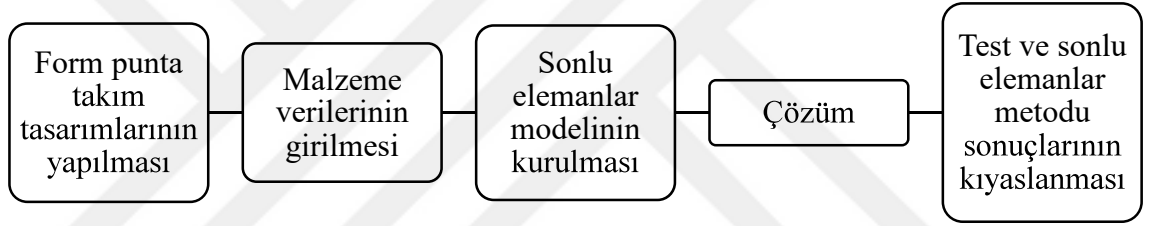
Çizelge 2.3. Taguchi L27 Ortogonal Dizisi (devamı)

23	3	2	1	3	2	1	3	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1



3. MATERYAL ve YÖNTEM

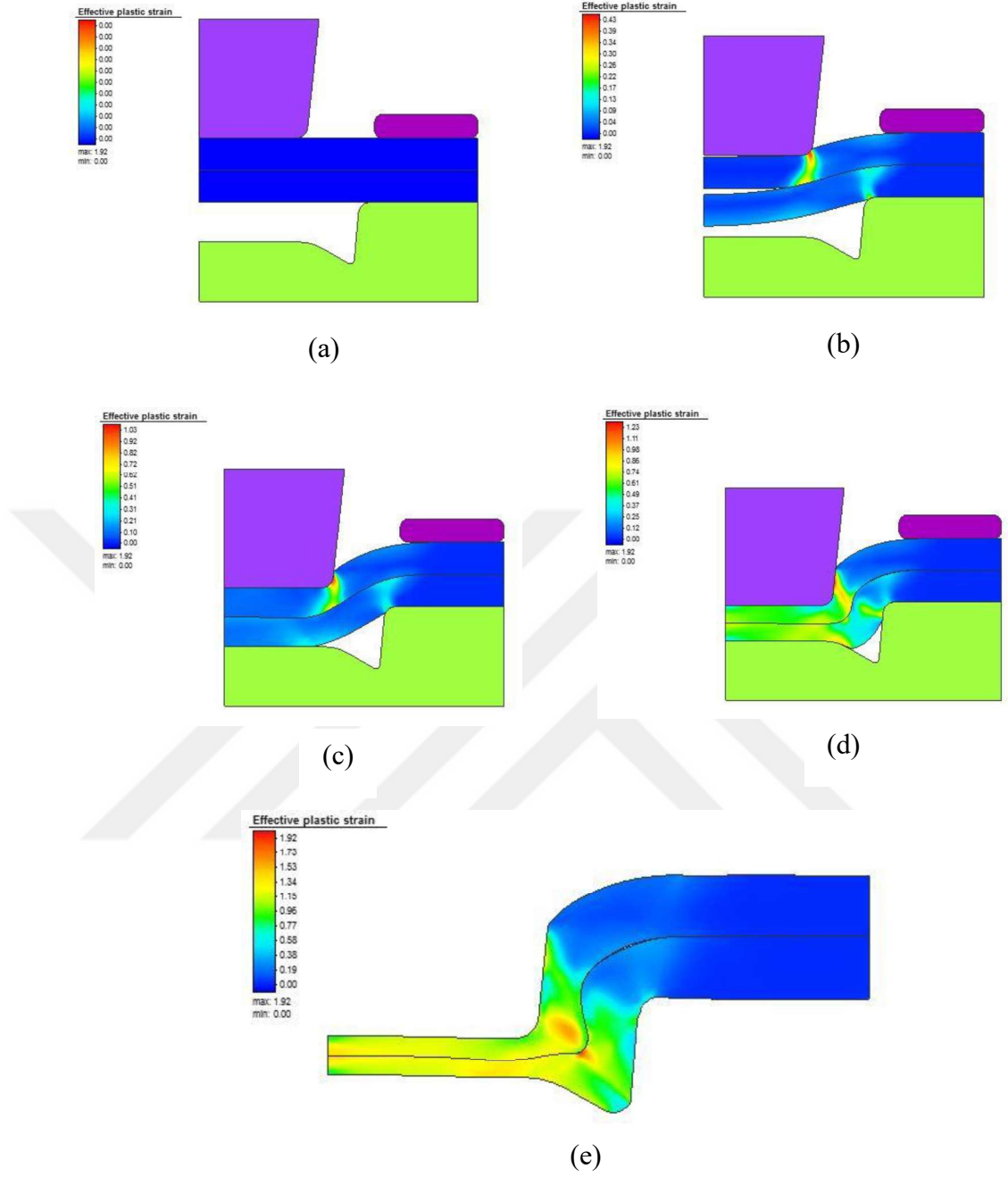
Bu çalışmada, form punta bağlantılarının dayanımı, sonlu elemanlar model sonuçları ve deneysel verileri kıyaslanmıştır. Form punta bağlantılarının dayanımına etki eden parametreler belirlenmiş ve bağlantının dayanımını artırmak için neler yapılabileceği araştırılmıştır. Çekme ve ayırma test sonuçları ile sonlu elemanlar metodundan elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Form punta takım tasarımları yapılmış ve sonlu elemanlar metodu için aktarım yapılmıştır. Daha sonra malzeme verileri tanımlanmış ve sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Reeldeki test koşullarını sağlayacak şekilde form punta bağlantılarının çekme ve ayırma testleri için sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Daha sonra çözüm yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodundan elde edilen sonuçlar ve test verileri kıyaslanmıştır.



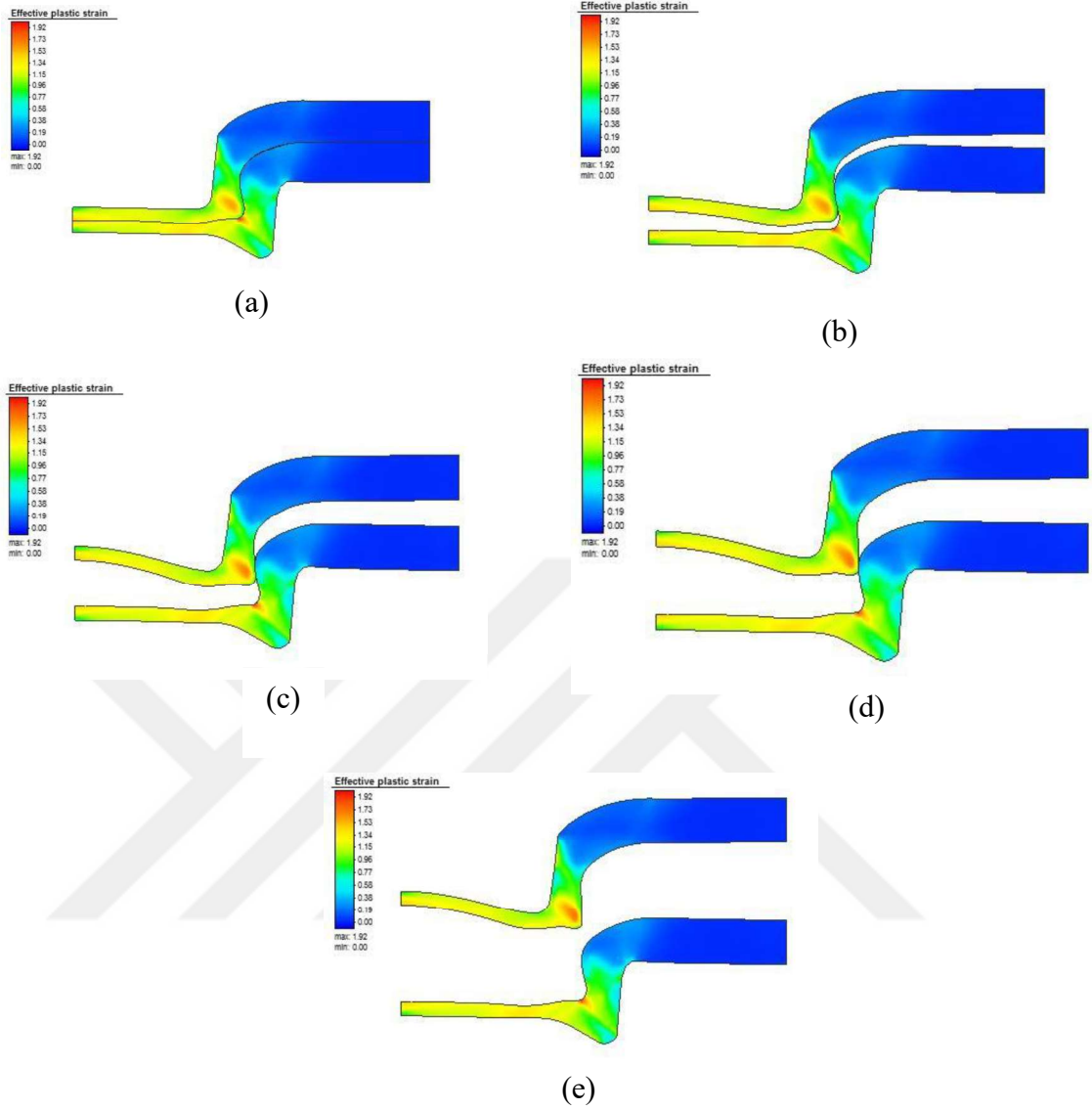
Şekil 3.1. Uygulanacak işlem adımları

3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Kurulması

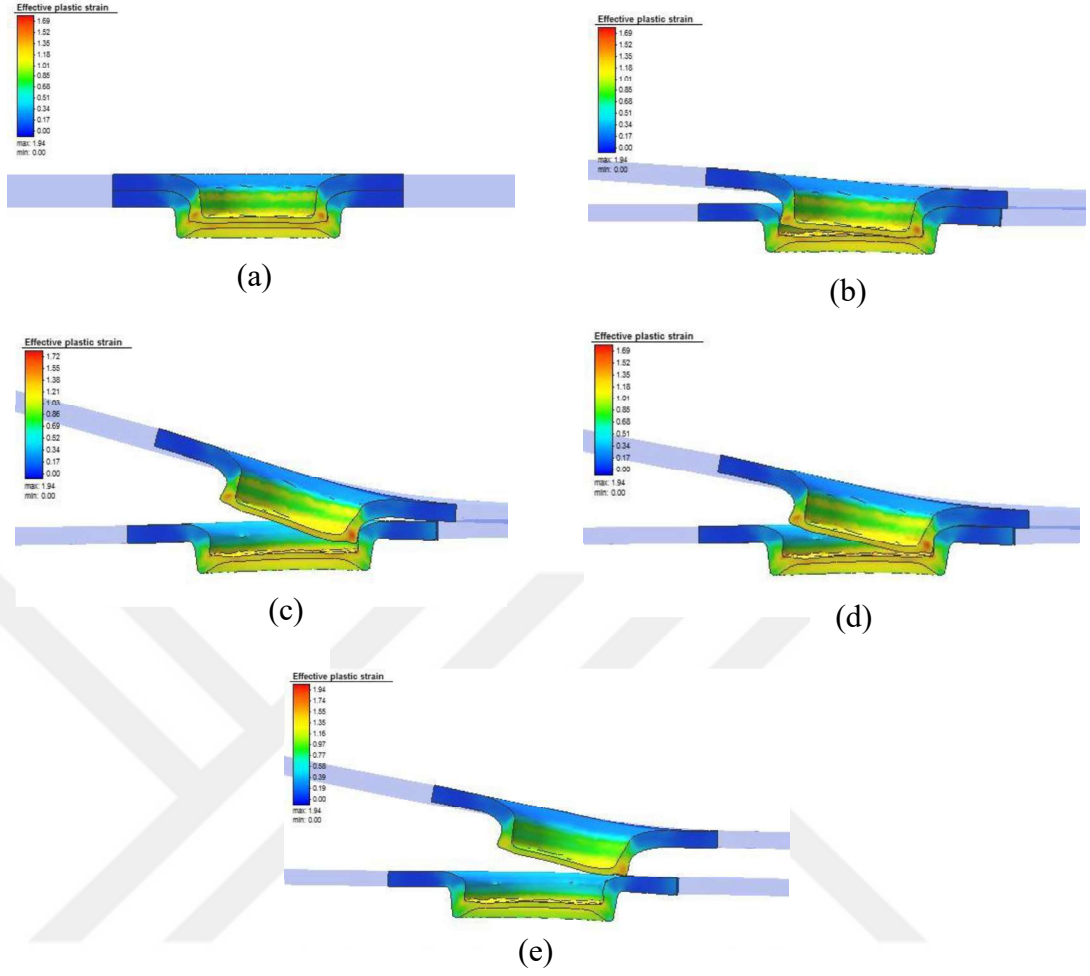
Sonlu elemanlar modelinde birleştirme işlemi 2D aksisimetrik olarak kurulmuştur. Form punta işlemiyle kenet oluştuktan sonra, bağlantının dayanımını ölçmek için 3D simetrik olarak sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. 2D aksisimetrik model üst sac ve alt sac için toplam olarak 3016 eleman oluşturulmuştur. Kritik bölgelerdeki deformasyonların daha hassas görülmesi, ağ yapısının bozulması ve istenmeyen deformasyonların oluşmaması için yeniden ağ yapısı örme (remeshing) metodu kullanılmıştır. Zımba, matris ve pot çemberi rijit olarak, üst sac ve alt sac ise deforme olabilir malzeme olarak modellenmiştir. Analiz programı olarak MSC Simufact Forming kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modeli proses ilerleyişi: (a) Proses başlangıcı %0, (b) Proses ilerleyişi %25, (c) Proses ilerleyişi %50, (d) Proses ilerleyişi %75, (e) Proses ilerleyişi %100 ve gerinim değerleri



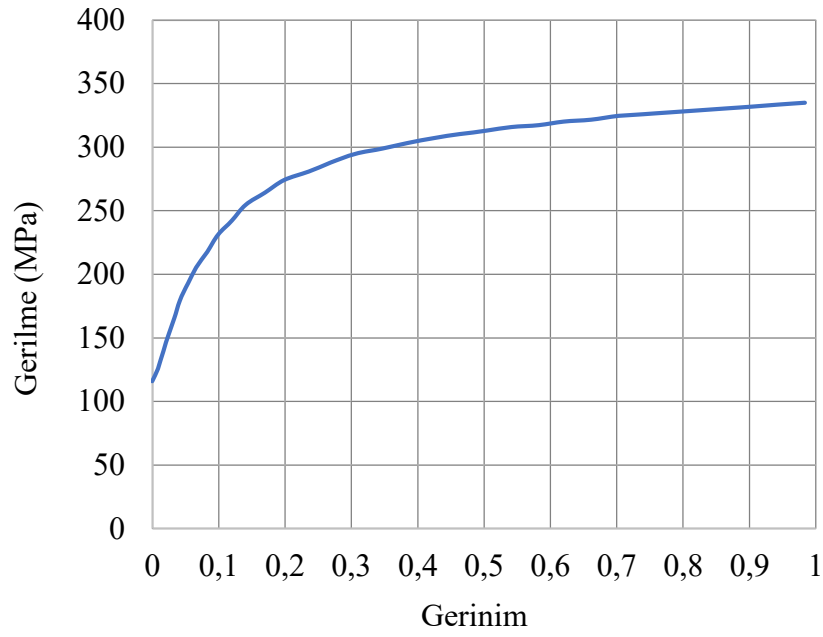
Şekil 3.4. Ayırma deneyi proses ilerleyişi: (a) Proses başlangıcı %0, (b) Proses ilerleyişi %25, (c) Proses ilerleyişi %50, (d) Proses ilerleyişi %75, (e) Proses ilerleyişi %100



Şekil 3.5. Çekme deneyi proses ilerleyişi: (a) Proses başlangıcı %0, (b) Proses ilerleyişi %25, (c) Proses ilerleyişi %50, (d) Proses ilerleyişi %75, (e) Proses ilerleyişi %100

3.2. Test ve Analiz Sonuçlarının Korelasyonu

Yapılacak olan çalışmadan elde edilecek sonuçların anlamlı olabilmesi için test ve sonlu elemanlar modelinin karşılaştırması yapılmış ve gerçeğe ne kadar yakın sonuçlar elde edildiği araştırılmıştır.

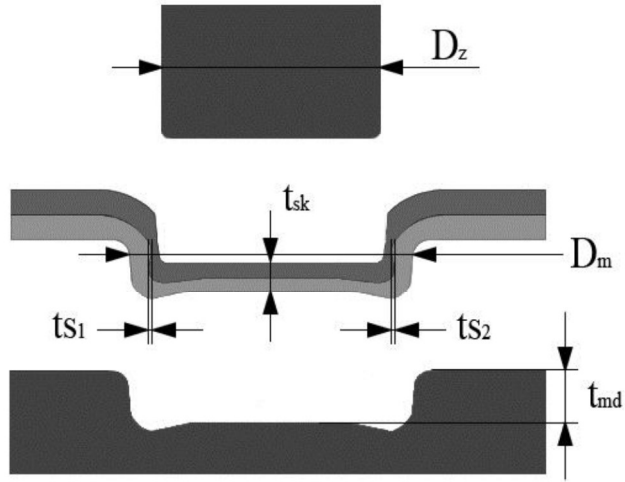


Şekil 3.6. AA6XXX-T4 malzemesi gerilme-gerinim eğrisi

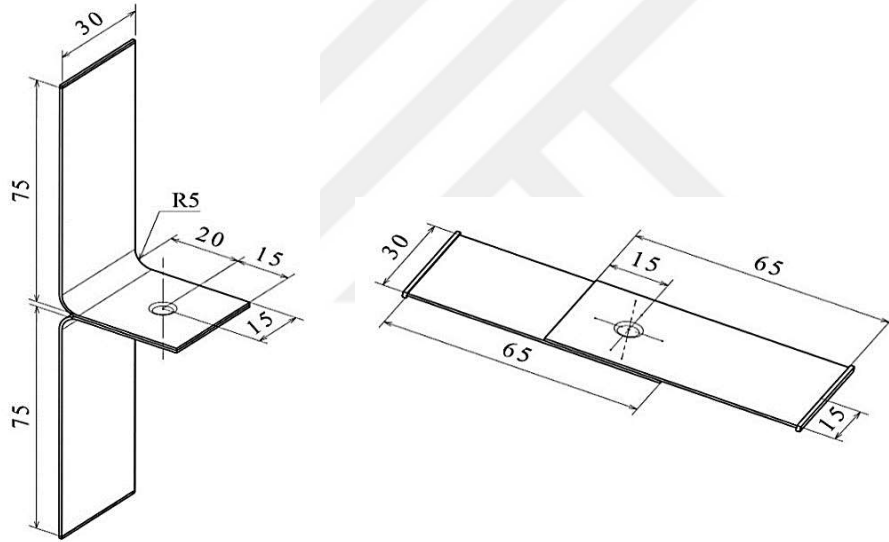
Çizelge 3.1. AA6XXX-T4 malzemesinin alaşım bileşenleri (% ağırlık) (<https://www.makeitfrom.com/material-properties/6XXX-T4-Aluminum>, Erişim tarihi: 20.09.2020)

Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Ti	Cr	Diğer
96,4	1,0	0,25	0	0	0	0	0	0	0
98,8	1,5	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2	0,15	0,1	0,15

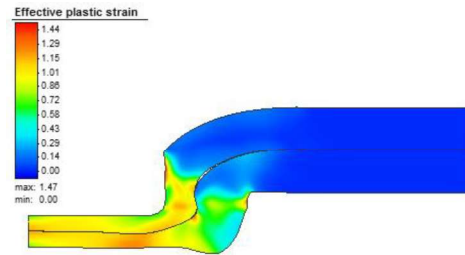
AA6XXX-T4 malzemesine ait gerilme gerinim grafiği Şekil 3.6'da verilmiştir. Çalışmada kullanılan saclar 0,8 mm kalınlıktadır. Karşılaştırma yapılacak form punta takım ölçüleri ise Şekil 3.7'de ve Çizelge 3.2'de verilmiştir. Birleştirme sonrası yapılacak olan ayırma ve çekme deneyleri için kullanılacak olan numunelerin ölçüleri Şekil 3.8'de verilmiştir. Birleştirme için 2D aksisimetrik model kullanılmıştır. Birleştirme sonrası test işlemleri için ise 3D simetrik model kullanılmıştır. Saclar deforme olabilir malzeme ve form punta takımları rijit olarak tanımlanmıştır. Test sonuçları Çizelge 3.2'de, kurulan sonlu elemanlar modelin sonuçları Çizelge 3.3'de verilmiştir.



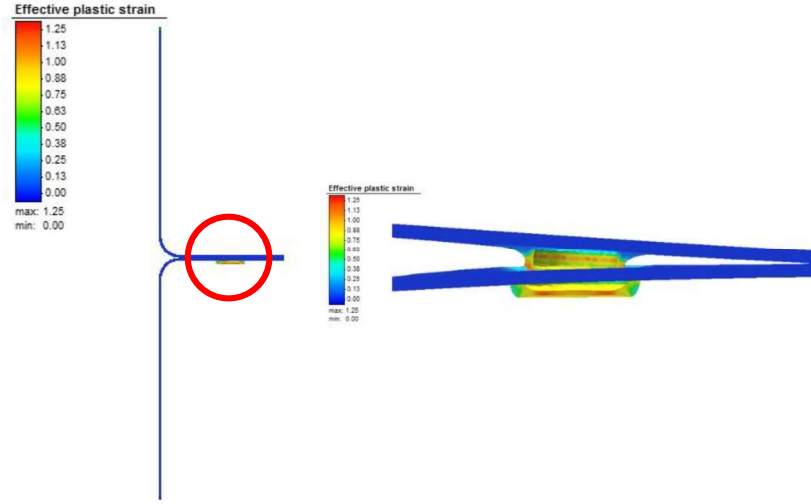
Şekil 3.7. Karşılaştırma yapılacak form punta takım ölçüleri



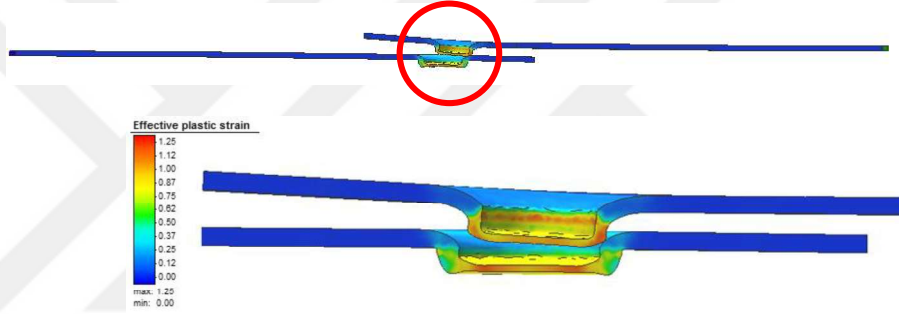
Şekil 3.8. Test numune ölçüleri



Şekil 3.9. Form punta sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları



Şekil 3.10. Ayırma deneyi sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları



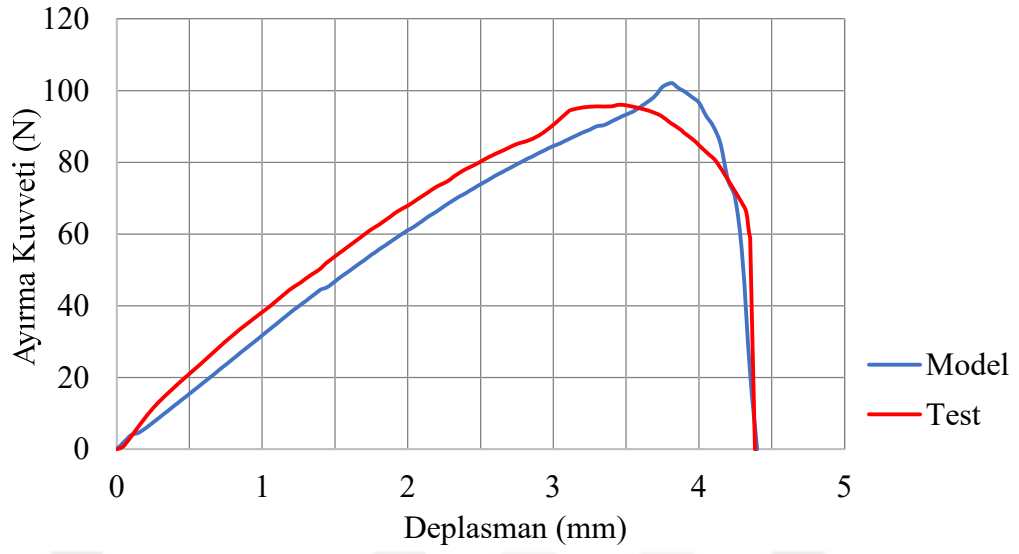
Şekil 3.11. Çekme deneyi sonlu elemanlar modeli gerinim sonuçları

Çizelge 3.2. Form punta bağlantısı geometrik ölçü ve test sonuçları

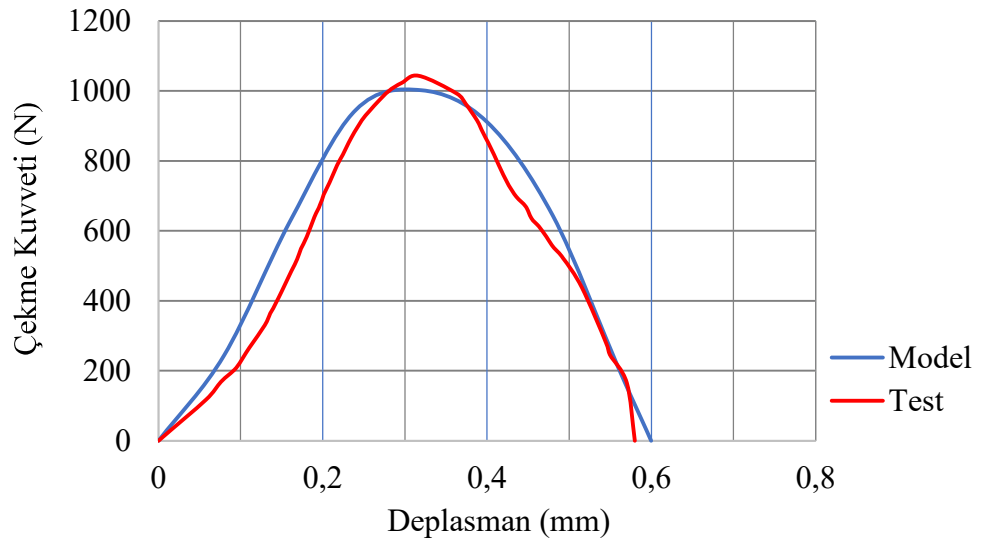
Üst sac (mm)	Alt sac (mm)	Zımba	D_z (mm)	D_m (mm)	t_{md} (mm)	t_{sk} (mm)	Kenet miktarı $(t_{s1}+t_{s2})/2$	Ayırma kuvveti (N)	Çekme kuvveti (N)
0,8	0,8	Düz	Ø5,2	Ø8,1	1	0,5	0,04	95	1048

Çizelge 3.3. Form punta sonlu elemanlar model sonuçları

Üst sac (mm)	Alt sac (mm)	Zımba	D_z (mm)	D_m (mm)	t_{md} (mm)	t_{sk} (mm)	Kenet miktarı $(t_{s1}+t_{s2})/2$	Ayırma kuvveti (N)	Çekme kuvveti (N)
0,8	0,8	Düz	Ø5,2	Ø8,1	1	0,5	0,044	101	1002



Şekil 3.12. Ayırma kuvveti-Deplasman sonuçları



Şekil 3.13. Çekme kuvveti-deplasman sonuçları

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de görüleceği gibi kenet miktarı, ayırma kuvveti ve çekme kuvvetinde %10 un altında bir hata payı ile sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlarla ilerleyen bölümlerde form punta bağlantı kalitesine etki eden parametreler değerlendirilecektir.

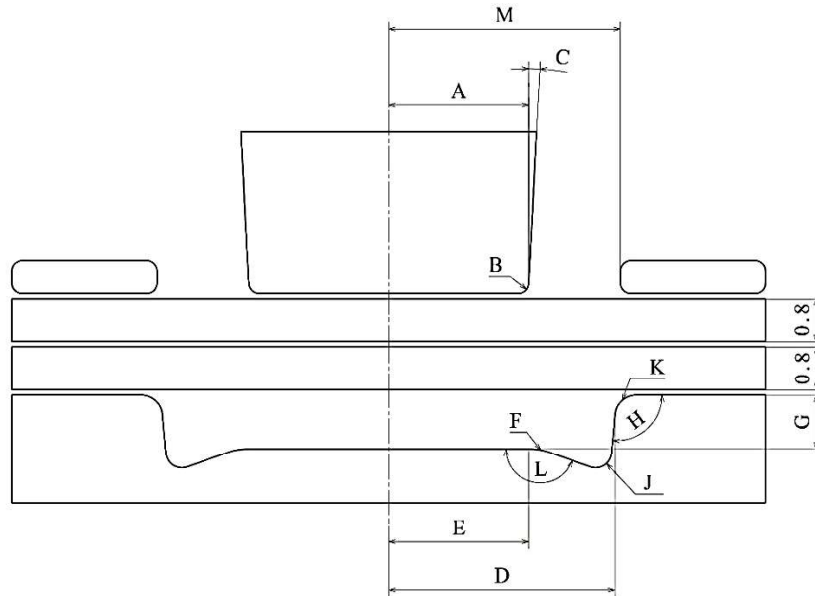
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Taguchi Deneyi

Form punta işleminde birleştirmeyi sağlayacak ve birleşmenin kalitesini belirleyen en önemli değişkenler takımların geometrik ölçüleridir. Uygun olmayan kalıp ve zımba ölçüleriyle birleştirme sağlanamaz veya birleşmenin kalitesini düşürebilir. Bu sebeplerden dolayı form punta takımlarının geometrik ölçülerinden hangilerinin birleşmenin kalitesine daha çok etki ettiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Takımlar üzerinde 12 adet geometrik ölçü belirlenmiş ve birleşme kalitesine etkisi incelenmiştir. Bu parametreler Taguchi metodu ile analiz edilmiştir. Sonuçlar takip eden diğer bölümlerde verilmiştir.



Şekil 4.1. Uygulanacak işlem adımları



Şekil 4.2. Taguchi değişkenleri takım geometrik ölçüleri

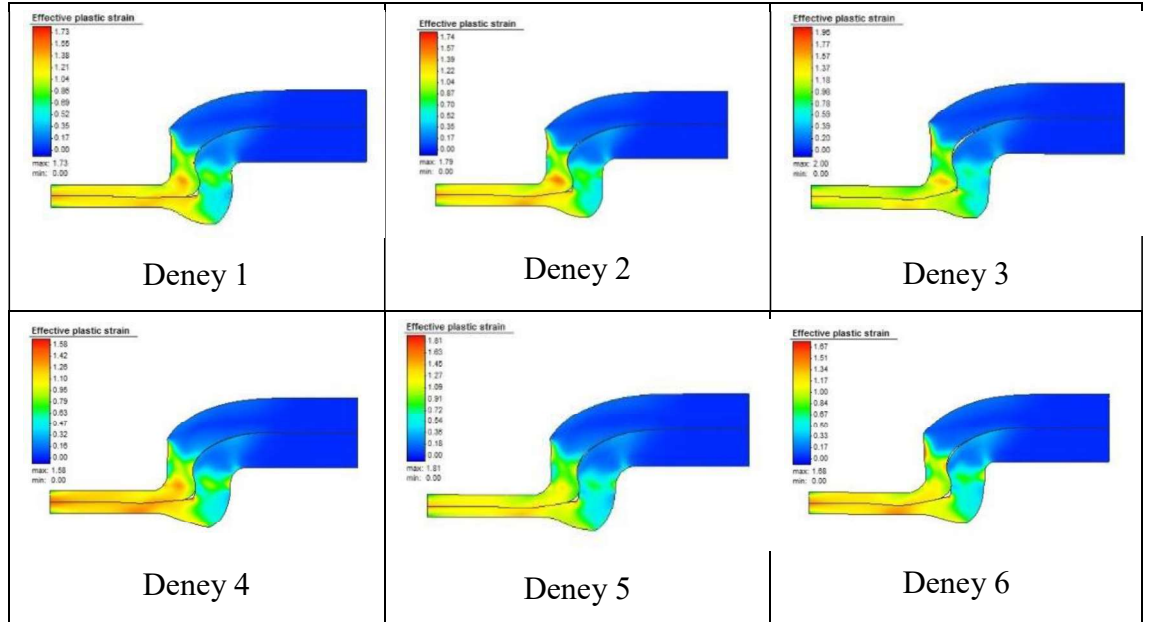
Sonuçların değerlendirilebilmesi için yapılması gereken $3^{12} = 531441$ deney yapmak gerekecekti. Taguchi metodu sayesinde yapılması gereken deney sayısı 27'dir.

Çizelge 4.1. Geometrik parametreler ve seviyeleri

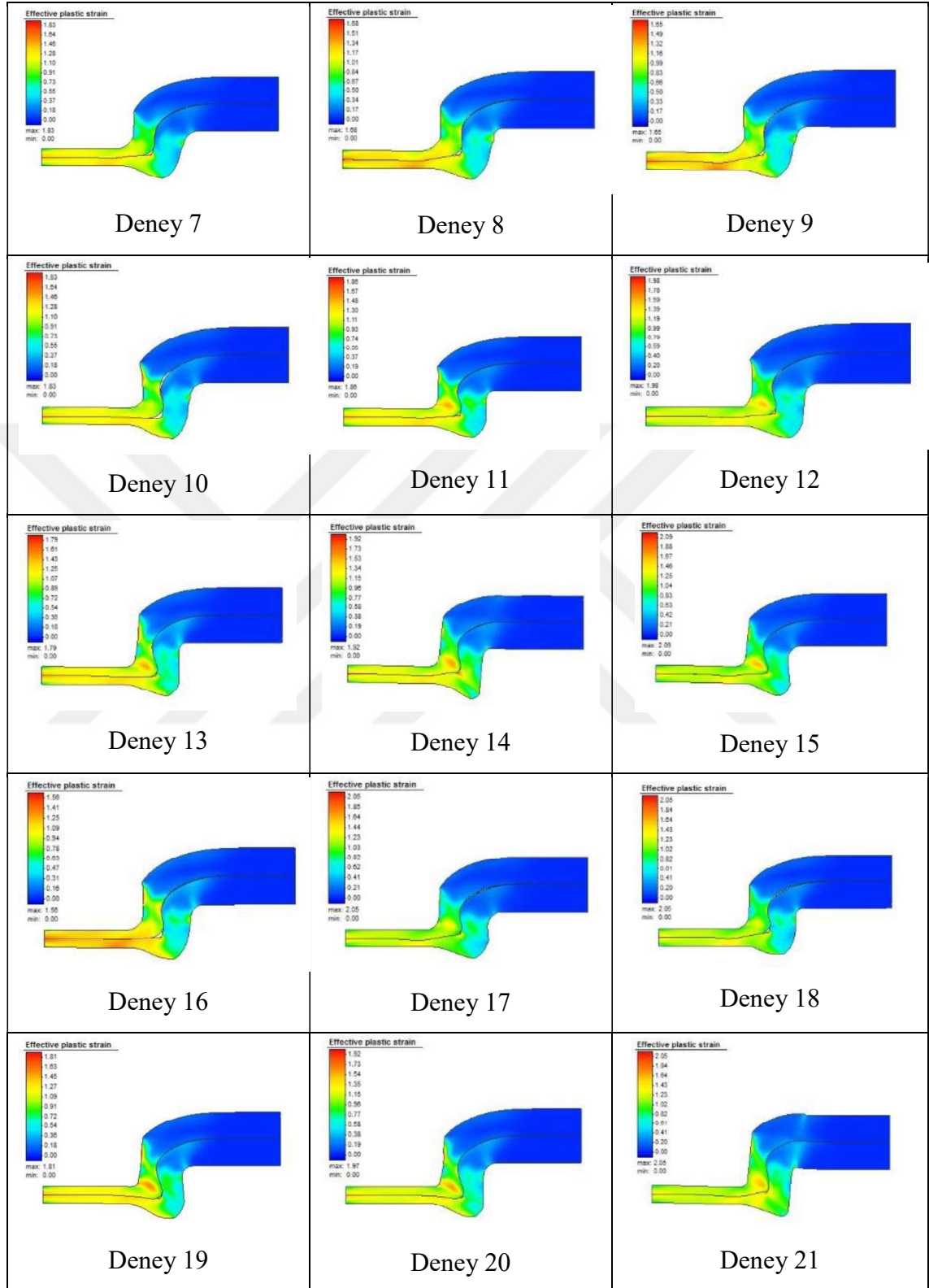
Seviye	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
Seviye 1	2,6	0,2	0	4	2,4	0,8	1	85	0,1	0,2	150	4,3
Seviye 2	2,7	0,3	3	4,1	2,5	1	1,1	90	0,2	0,3	155	4,4
Seviye 3	2,8	0,4	6	4,2	2,6	1,2	1,2	95	0,3	0,4	160	4,5

Deney tasarımı için 12 parametre ele alınmıştır. Bu parametreler: A; zımba çapı, B; zımba köşe yarıçapı, C; zımba duvar açısı, D; matris çapı, E; matris oturma çapı, F; matris oturma yarıçapı, G; matris derinliği, H; matris duvar açısı, J; matris iç yarıçapı, K; matris dış yarıçapı, L; matris oturma duvar açısı, M; baskı plakası mesafesi olarak belirlenmiştir. Yapılmış olan 27 farklı sonlu elemanlar analiz sonuçlarından elde edilen değerler Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da görülmektedir.

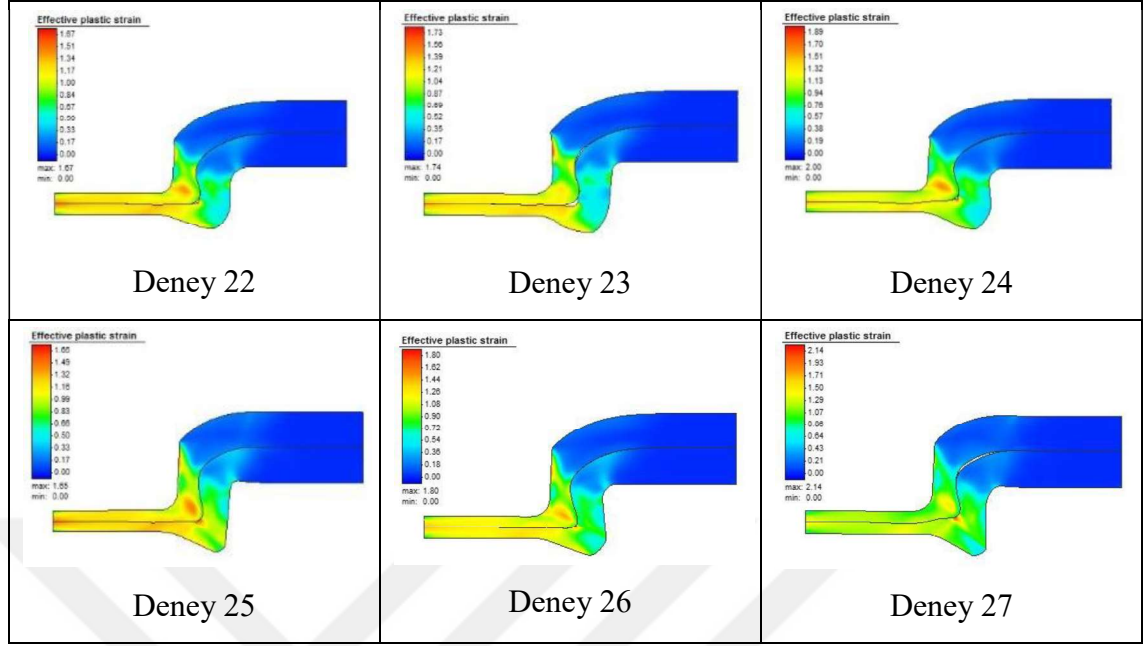
Çizelge 4.2. Taguchi deney analiz gerinim sonuçları



Çizelge 4.2. Taguchi deney analiz gerinim sonuçları (devamı)



Çizelge 4.2. Taguchi deney analiz gerinim sonuçları (devamı)



Çizelge 4.3. Taguchi deney değerleri

Deney No	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
1	2,6	0,2	0	4	2,4	0,8	1	85	0,1	0,2	150	4,3
2	2,6	0,2	0	4	2,5	1	1,1	90	0,2	0,3	155	4,4
3	2,6	0,2	0	4	2,6	1,2	1,2	95	0,3	0,4	160	4,5
4	2,6	0,3	3	4,1	2,4	0,8	1	90	0,2	0,3	160	4,5
5	2,6	0,3	3	4,1	2,5	1	1,1	95	0,3	0,4	150	4,3
6	2,6	0,3	3	4,1	2,6	1,2	1,2	85	0,1	0,2	155	4,4
7	2,6	0,4	6	4,2	2,4	0,8	1	95	0,3	0,4	155	4,4
8	2,6	0,4	6	4,2	2,5	1	1,1	85	0,1	0,2	160	4,5
9	2,6	0,4	6	4,2	2,6	1,2	1,2	90	0,2	0,3	150	4,3
10	2,7	0,2	3	4,2	2,4	1	1,2	85	0,2	0,4	150	4,4
11	2,7	0,2	3	4,2	2,5	1,2	1	90	0,3	0,2	155	4,5
12	2,7	0,2	3	4,2	2,6	0,8	1,1	95	0,1	0,3	160	4,3
13	2,7	0,3	6	4	2,4	1	1,2	90	0,3	0,2	160	4,3
14	2,7	0,3	6	4	2,5	1,2	1	95	0,1	0,3	150	4,4
15	2,7	0,3	6	4	2,6	0,8	1,1	85	0,2	0,4	155	4,5

Çizelge 4.3. Taguchi deney değerleri (devamı)

16	2,7	0,4	0	4,1	2,4	1	1,2	95	0,1	0,3	155	4,5
17	2,7	0,4	0	4,1	2,5	1,2	1	85	0,2	0,4	160	4,3
18	2,7	0,4	0	4,1	2,6	0,8	1,1	90	0,3	0,2	150	4,4
19	2,8	0,2	6	4,1	2,4	1,2	1,1	85	0,3	0,3	150	4,5
20	2,8	0,2	6	4,1	2,5	0,8	1,2	90	0,1	0,4	155	4,3
21	2,8	0,2	6	4,1	2,6	1	1	95	0,2	0,2	160	4,4
22	2,8	0,3	0	4,2	2,4	1,2	1,1	90	0,1	0,4	160	4,4
23	2,8	0,3	0	4,2	2,5	0,8	1,2	95	0,2	0,2	150	4,5
24	2,8	0,3	0	4,2	2,6	1	1	85	0,3	0,3	155	4,3
25	2,8	0,4	3	4	2,4	1,2	1,1	95	0,2	0,2	155	4,3
26	2,8	0,4	3	4	2,5	0,8	1,2	85	0,3	0,3	160	4,4
27	2,8	0,4	3	4	2,6	1	1	90	0,1	0,4	150	4,5

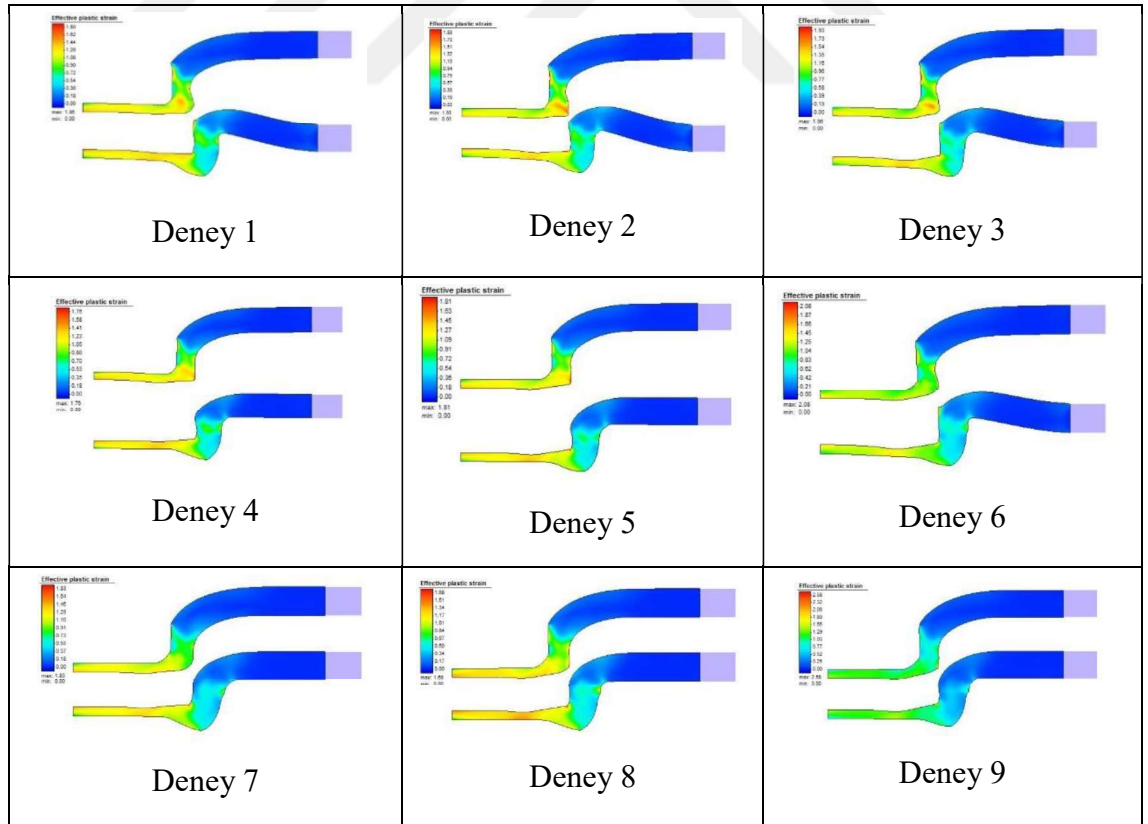
Çizelge 4.4. Taguchi deney sonuçları

Deney No	t_n (mm)	t_s (mm)	F_a (N)	F_c (N)	F_z (kN)
1	0,518	0,124	622,4	1112,2	13,75
2	0,485	0,141	665,1	1087,8	15
3	0,453	0,121	676,4	1039,7	16,1
4	0,581	0,067	584,2	1027,2	13,8
5	0,552	0,061	565,6	938	13,7
6	0,489	0,102	659,7	1016,4	13,6
7	0,62	0,002	28,2	222,5	13,1
8	0,569	0,026	249,4	692,8	13,3
9	0,54	0,03	297,1	726,3	13,4
10	0,477	0,083	621,6	989,9	13,6
11	0,557	0,119	687,2	1153,7	16,5
12	0,523	0,103	687,7	1058,3	17,6
13	0,432	0,147	644,8	1053,9	17,4
14	0,514	0,091	566,7	1017,7	21,9

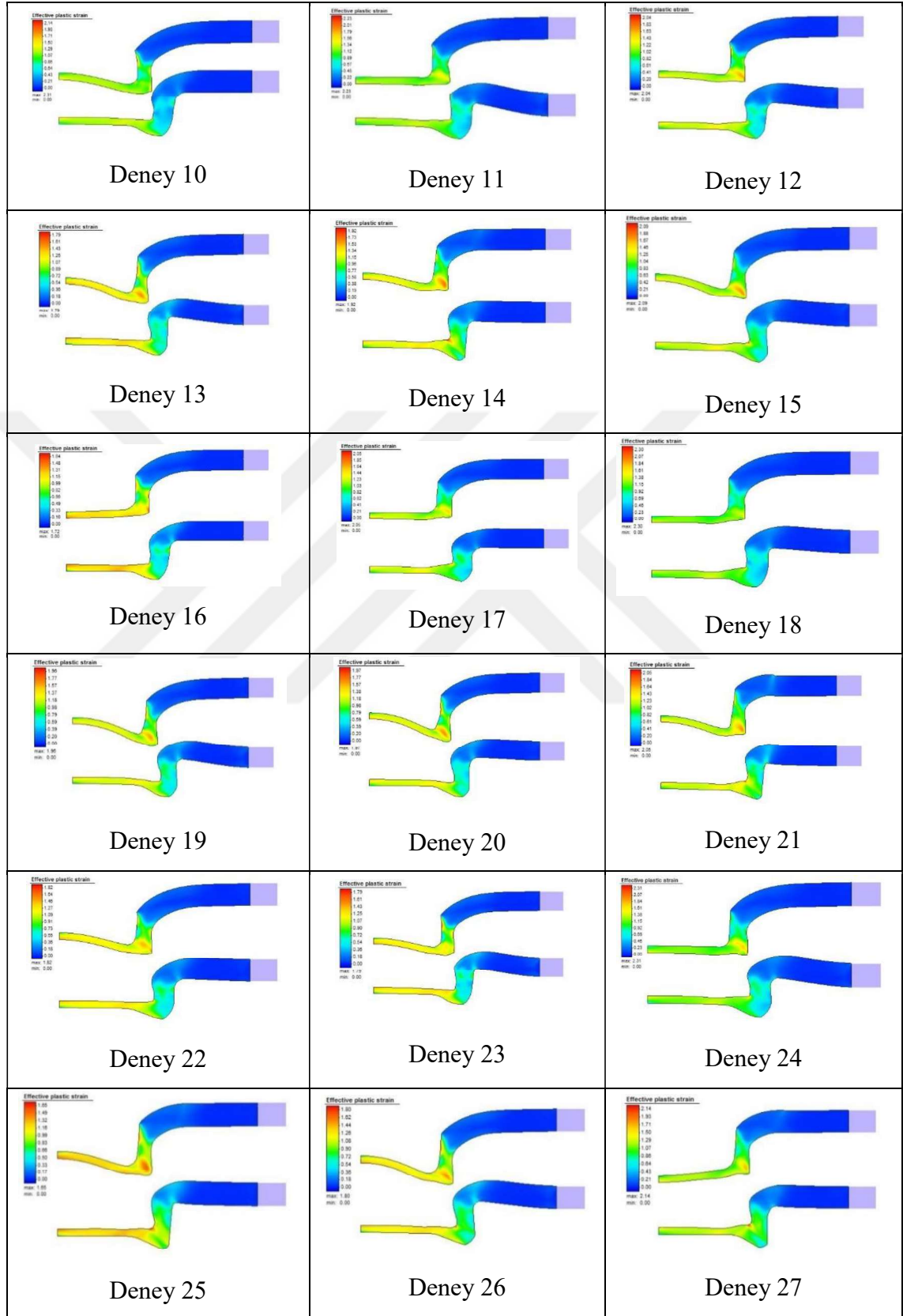
Çizelge 4.4. Taguchi deney sonuçları (devamı)

15	0,5	0,142	674,3	1069,1	19,7
16	0,512	0,063	541,9	898,7	19,9
17	0,595	0,064	572,7	985,1	16,4
18	0,553	0,081	617,3	1012,5	14,3
19	0,461	0,178	707,3	1116,2	17,8
20	0,428	0,165	693,2	1106,5	19,3
21	0,488	0,097	568,1	1091,5	25,3
22	0,545	0,106	710,9	1109,1	17
23	0,481	0,115	675,8	1087,6	15,5
24	0,585	0,118	705,2	1146,4	18,2
25	0,462	0,109	586,5	1009,2	22,6
26	0,447	0,157	659,9	1106,7	19,3
27	0,509	0,093	581,1	1039,7	22,3

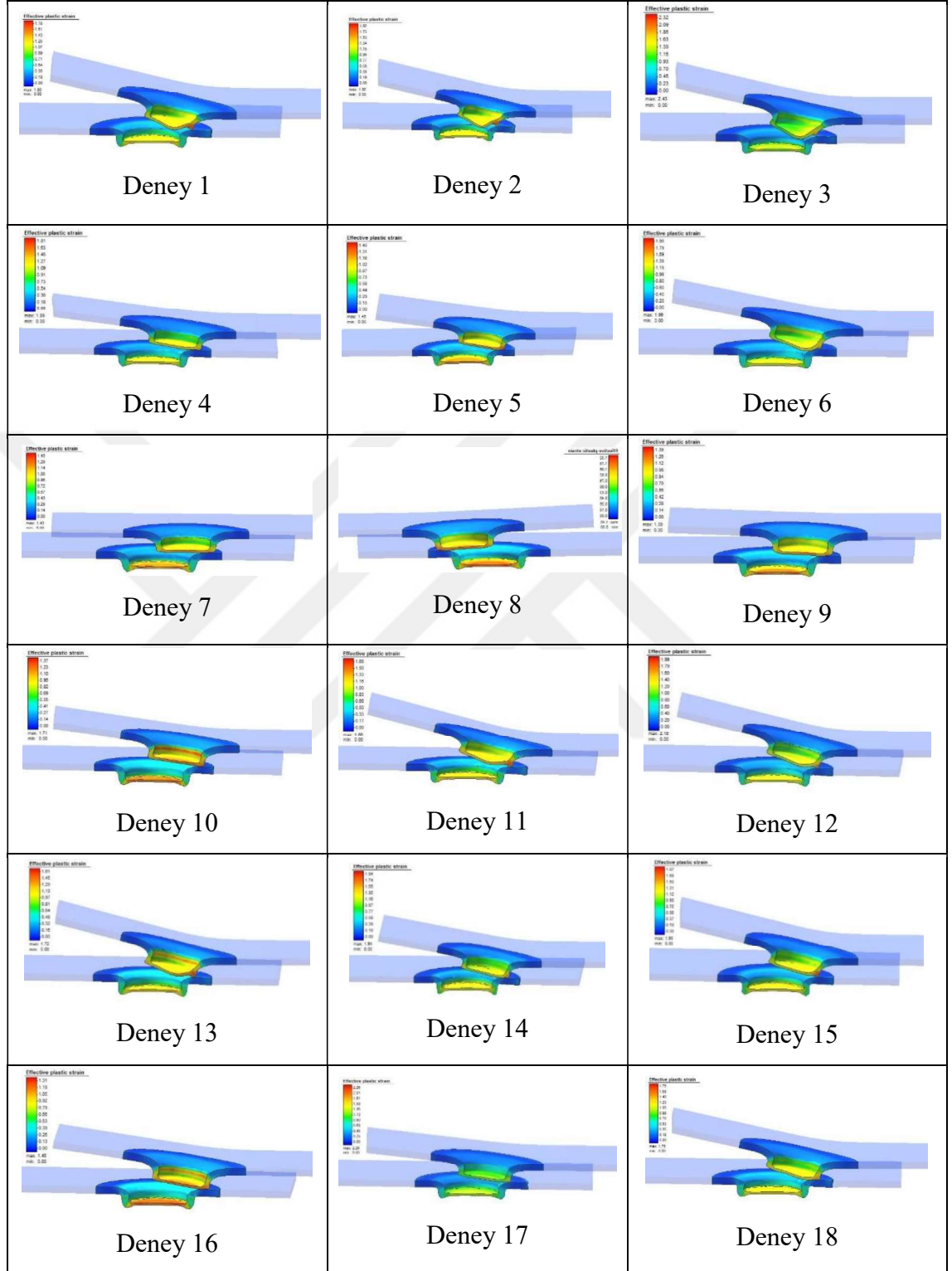
Çizelge 4.5. Ayırma deneyi gerinim değerleri



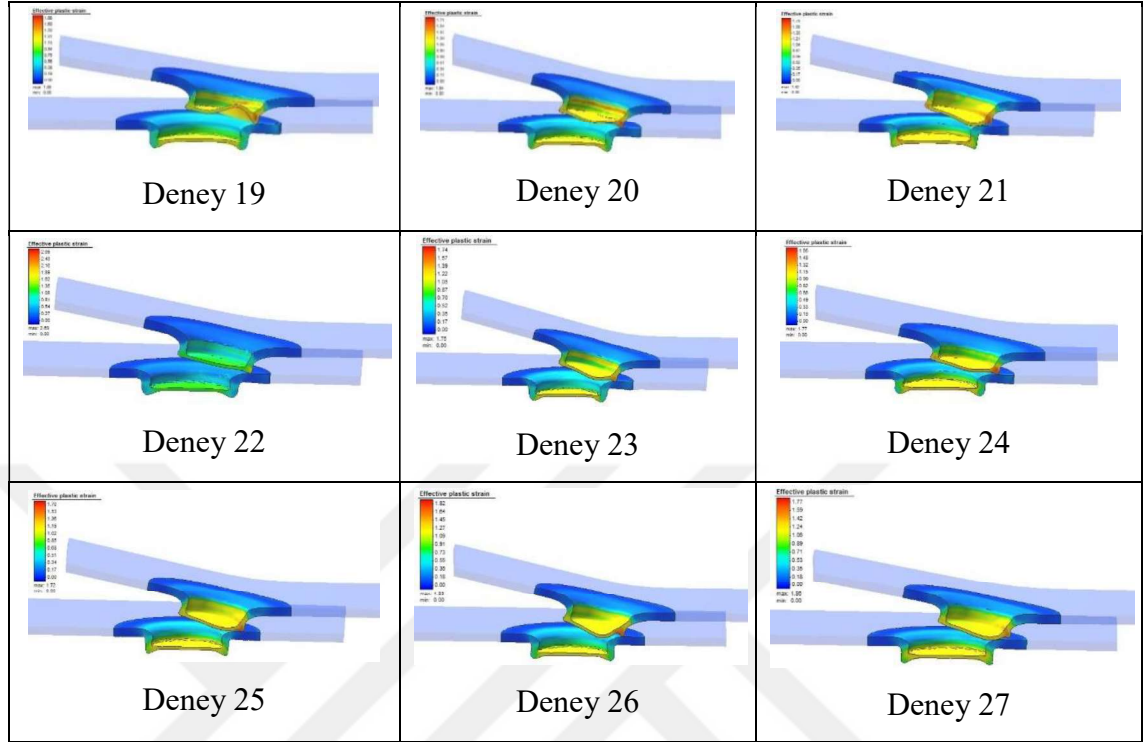
Çizelge 4.5. Ayırma deneyi gerinim değerleri (devamı)



Çizelge 4.6. Çekme deneyi gerinim değerleri



Çizelge 4.6. Çekme deneyi gerinim değerleri (devamı)



İki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için regresyon analizi kullanılır. Tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir. Değişkenler arasındaki ilişkinin yokluğu veya varlığının gücü hakkında bilgi regresyon analizi ile elde edilebilir.

Çizelge 4.7. Boyun kalınlığı regresyon analizi katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VIF
Sabit	0,129	0,201	0,64	0,532	
A	-0,2228	0,0251	-8,88	0,000	1,00
B	0,2317	0,0251	9,24	0,000	1,00
C	-0,003241	0,000836	-3,88	0,002	1,00
D	0,3206	0,0251	12,78	0,000	1,00
E	0,0178	0,0251	0,71	0,490	1,00
F	-0,0097	0,0125	-0,78	0,451	1,00

Çizelge 4.7. Boyun kalınlığı regresyon analizi katsayıları (devamı)

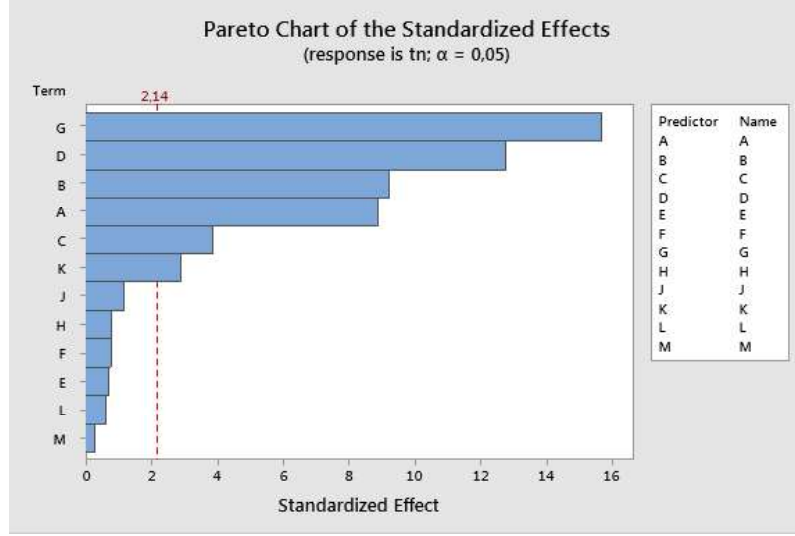
G	-0,3933	0,0251	-15,68	0,000	1,00
H	-0,000400	0,000502	-0,80	0,439	1,00
J	0,0294	0,0251	1,17	0,260	1,00
K	0,0722	0,0251	2,88	0,012	1,00
L	0,000311	0,000502	0,62	0,545	1,00
M	-0,0067	0,0251	-0,27	0,794	1,00

Çizelge 4.8. Boyun kalınlığı regresyon model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0, 0106405	97,72%	95,77%	91,05%

Çizelge 4.9. Boyun kalınlığı varyans analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	12	0,067983	0,005665	50,04	0,000
A	1	0,008933	0,008933	78,90	0,000
B	1	0,009660	0,009660	85,33	0,000
C	1	0,001701	0,001701	15,03	0,002
D	1	0,018496	0,018496	163,36	0,000
E	1	0,000057	0,000057	0,50	0,490
F	1	0,000068	0,000068	0,60	0,451
G	1	0,027848	0,027848	245,96	0,000
H	1	0,000072	0,000072	0,64	0,439
J	1	0,000156	0,000156	1,38	0,260
K	1	0,000939	0,000939	8,29	0,012
L	1	0,000044	0,000044	0,38	0,545
M	1	0,000008	0,000008	0,07	0,794
Hata	14	0,001585	0,000113		
Toplam	26	0,069568			



Şekil 4.3. Boyun kalınlığı pareto grafiği

Yukarıda görüldüğü gibi boyun kalınlığını (t_n) etkileyen en önemli değişkenler A, B, C, D, G, K değişkenleridir. P değerlerine bakıldığı zaman bu değişkenlerin modelin tanımlanmasında anlamlı bir değer ifade ettiği görülmektedir. Bu değişkenler, boyun kalınlığının belirlenmesinde model yaklaşık olarak %91'lik açıklama gücüne sahiptir.

Çizelge 4.10. Kenet miktarı regresyon analizi katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VIF
Sabit	0,498	0,336	1,48	0,160	
A	0,2578	0,0419	6,15	0,000	1,00
B	-0,2811	0,0419	-6,71	0,000	1,00
C	-0,00102	0,00140	-0,73	0,478	1,00
D	-0,2350	0,0419	-5,61	0,000	1,00
E	0,0044	0,0419	0,11	0,917	1,00
F	-0,0100	0,0210	-0,48	0,641	1,00
G	0,1156	0,0419	2,76	0,015	1,00
H	-0,002578	0,000838	-3,08	0,008	1,00
J	0,0617	0,0419	1,47	0,163	1,00
K	-0,0461	0,0419	-1,10	0,290	1,00

Çizelge 4.10. Kenet miktarı regresyon analizi katsayıları (devamı)

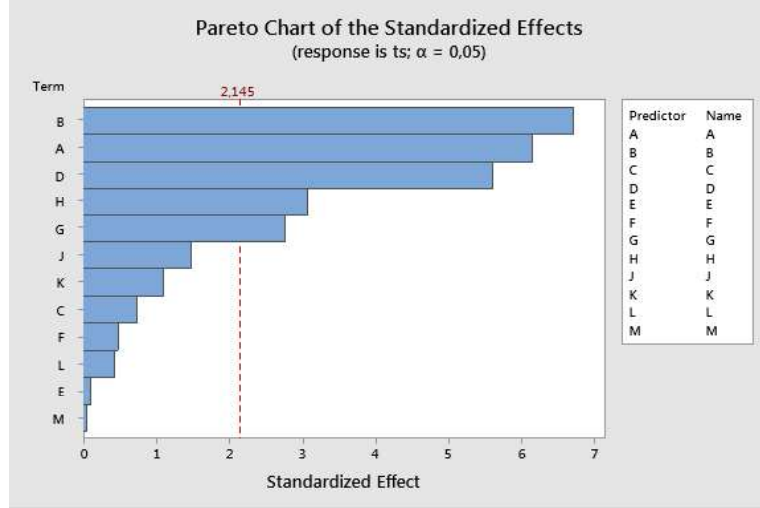
L	0,000356	0,000838	0,42	0,678	1,00
M	0,0017	0,0419	0,04	0,969	1,00

Çizelge 4.11. Kenet miktarı regresyon model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0177773	90,65%	82,63%	66,65%

Çizelge 4.12. Kenet miktarı varyans analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	12	0,042888	0,003574	11,31	0,000
A	1	0,011961	0,011961	37,85	0,000
B	1	0,014224	0,014224	45,01	0,000
C	1	0,000168	0,000168	0,53	0,478
D	1	0,009940	0,009940	31,45	0,000
E	1	0,000004	0,000004	0,01	0,917
F	1	0,000072	0,000072	0,23	0,641
G	1	0,002404	0,002404	7,61	0,015
H	1	0,002990	0,002990	9,46	0,008
J	1	0,000684	0,000684	2,17	0,163
K	1	0,000383	0,000383	1,21	0,290
L	1	0,000057	0,000057	0,18	0,678
M	1	0,000000	0,000000	0,00	0,969
Hata	14	0,004424	0,000316		
Toplam	26	0,047312			



Şekil 4.4. Kenet miktarı pareto grafiği

Yukarıda görüldüğü A, B, D, H ve G değişkenlerinin kenet miktarında bir önem derecesine sahip olmadığı görülmektedir. P değerlerine bakıldığı zaman bu değişkenlerin modelin tanımlanmasında anlamlı bir değer ifade ettiği görülmektedir. Bu değişkenler, kenet miktarının belirlenmesinde model yaklaşık olarak %66'lık açıklama gücüne sahiptir. Birleştirilecek sacların malzeme modellerinin de eklenmesiyle modelin açıklama gücü daha da güçlendirilebilir.

Çizelge 4.13. Ayırma kuvveti regresyon analizi katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VIF
Sabit	-30	311	-0,10	0,924	
t_n	526	511	1,03	0,313	2,14
t_s	3458	619	5,59	0,000	2,14

Çizelge 4.14. Ayırma kuvveti regresyon model özeti

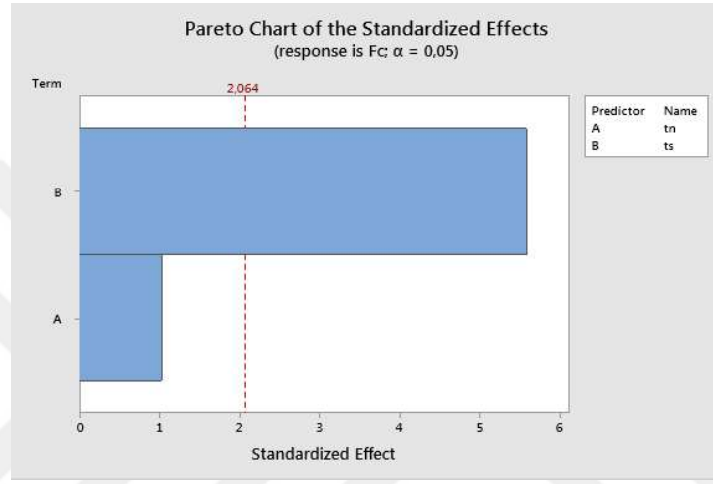
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
92,0437	68,03%	65,36%	53,10%

Çizelge 4.15. Ayırma kuvveti varyans analizi

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	2	432614	216307	25,53	0,000

Çizelge 4.15. Ayırma kuvveti varyans analizi (devamı)

t_n	1	9008	9008	1,06	0,313
t_s	1	264359	264359	31,20	0,000
Hata	24	203329	8472		
Toplam	26	635943			



Şekil 4.5. Ayırma kuvveti pareto grafiği

Zımba ve matrisin geometrik ölçüleri birleşmenin kalitesini etkiler. Birleşme sonucunda boyun kalınlığında bir miktar incelleme ve saclar arasında bir miktar kenet oluşur. Ayırma kuvvetine takım geometrileri etki eder. Dolayısıyla boyun kalınlığı ve kenet miktarı etki eder. Yani boyun kalınlığı ve kenet miktarı takım geometrilerine bağımlı değişkenlerdir. Dolayısıyla ayırma kuvveti, boyun kalınlığı ve kenet miktarına bağlıdır denilebilir. Yukarıda görüldüğü kenet miktarının, ayırma kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. P değerlerine bakıldığında zaman kenet miktarının anlamlı bir değer ifade ettiği görülmektedir. Boyun kalınlığının etkisinin anlamsız çıkması ise, boyun kalınlığının kenet miktarına olan oranının çok büyük olmasıdır. Kenet miktarı, ayırma kuvvetinin belirlenmesinde yaklaşık olarak %53'lik açıklama gücüne sahiptir. Birleştirilecek sacların malzeme modellerinin de eklenmesiyle modelin açıklama gücü daha da güçlendirilebilir.

Boyun kalınlığı, kenet miktarına ve ayırma kuvvetine etki eden parametreleri incelemek için Taguchi Yöntemi kullanılmıştır. Çözümlemeler istatistiksel veri analizlerinde de kullanılabilen MatLab ve MS Excel’de yapılmıştır. Sürecin optimal değerlerini değerlendirmek için L27 ortogonal dizisi kullanılarak yapılmış 27 deney sonucunda Sinyal/Gürültü (S/N) oranları bulunmuştur. Sonuçların delta ve rank değerleri Çizelge 4.15, Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Boyun kalınlığı için ortalamalar delta ve rank değerleri

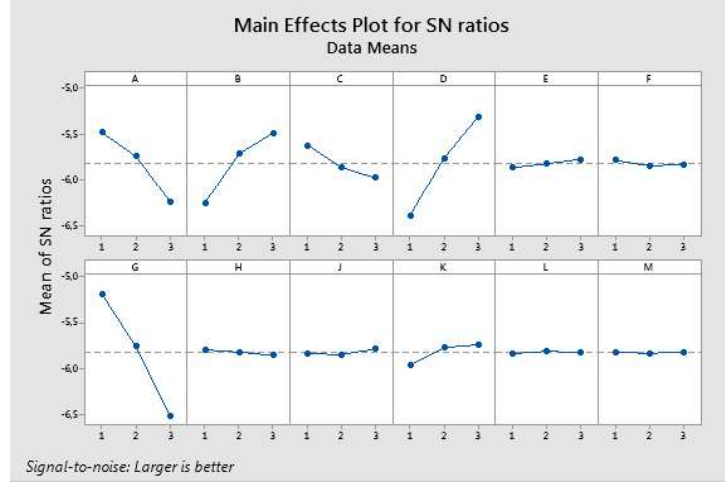
Seviye	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
1	0,534	0,488	0,525	0,48	0,512	0,517	0,552	0,516	0,512	0,505	0,512	0,515
2	0,518	0,52	0,511	0,518	0,514	0,512	0,517	0,514	0,512	0,516	0,515	0,513
3	0,49	0,534	0,506	0,544	0,516	0,513	0,473	0,512	0,518	0,52	0,515	0,514
Delta	0,045	0,046	0,019	0,064	0,004	0,005	0,079	0,004	0,006	0,014	0,004	0,002
Rank	4	3	5	2	11	8	1	9	7	6	10	12

Çizelge 4.17. Kenet miktarı için ortalamalar delta ve rank değerleri

Seviye	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
1	0,075	0,126	0,104	0,125	0,098	0,106	0,086	0,11	0,097	0,102	0,095	0,102
2	0,099	0,105	0,099	0,098	0,104	0,092	0,105	0,105	0,094	0,105	0,107	0,096
3	0,126	0,069	0,098	0,078	0,099	0,102	0,109	0,085	0,109	0,093	0,099	0,103
Delta	0,052	0,056	0,006	0,047	0,007	0,014	0,023	0,026	0,015	0,012	0,012	0,007
Rank	2	1	12	3	11	7	5	4	6	8	9	10

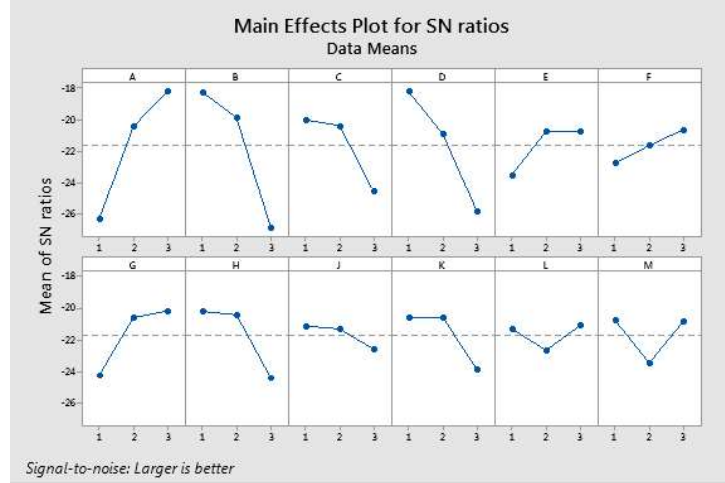
Çizelge 4.18. Ayırma kuvveti için ortalamalar delta ve rank değerleri

Seviye	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
1	483,1	658,8	643,1	630,8	560,9	582,6	546,2	608,1	590,3	590,1	583,9	597,2
2	623,8	643,0	625,9	612,2	592,8	571,4	607,1	609,0	582,8	601,7	582,4	566,4
3	654,2	459,3	492,1	518,1	607,4	607,2	607,8	544,1	588,0	569,3	594,9	597,5
Delta	171,1	199,4	151,0	112,7	46,6	35,7	61,6	64,9	7,5	32,3	12,5	31,1
Rank	2	1	3	4	7	8	6	5	12	9	11	10



Şekil 4.6. Boyun kalınlığı için S/N oranları

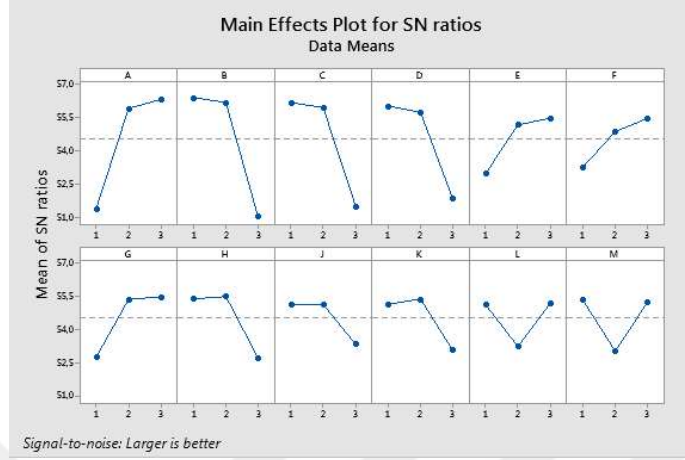
En büyük en iyi metoduyla yapılmış olan analizler sonucunda S/N oranı büyük olan değerler en iyi değerlerdir. Boyun kalınlığına etki eden değişkenlerden en büyük etkiye sahip olan değişkenler A, B, D ve G değişkenlerinin olduğu elde edilmiştir. Zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, matris çapı ve matris derinliği, boyun kalınlığına en fazla etki eden parametrelerdir.



Şekil 4.7. Kenet miktarı için S/N oranları

En büyük en iyi metoduyla yapılmış olan analizler sonucunda S/N oranı büyük olan değerler en iyi değerlerdir. Boyun kalınlığına etki eden değişkenlerden en büyük etkiye sahip olan değişkenler A, B, D, G ve H değişkenlerinin olduğu elde edilmiştir. Yani,

zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, matris çapı, matris duvar açısı ve matris derinliği, kenet miktarına en fazla etki eden parametrelerdir.



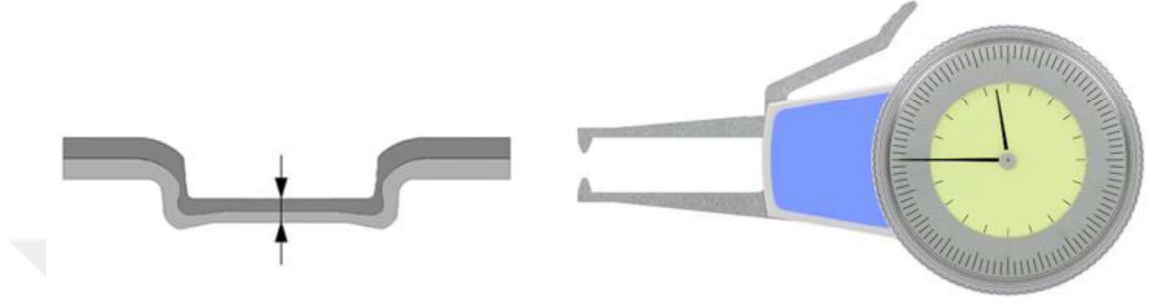
Şekil 4.8. Ayırma kuvveti için S/N oranları

En büyük en iyi metoduyla yapılmış olan analizler sonucunda S/N oranı büyük olan değerler en iyi değerlerdir. Ayırma kuvveti üzerinde A, B, C, D, G ve H en büyük etkiye sahip olan değişkenler olduğu görülmüştür. Zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, zımba duvar açısı, matris çapı, matris duvar açısı ve matris derinliği, ayırma kuvvetine en fazla etki eden parametrelerdir. Ayırma kuvvetinin karakteristiğini etkileyen parametreler, kenet miktarı ve boyun kalınlığının karakteristiğini etkileyen parametrelerle ortak ve daha fazladır.

Form punta bağlantılarının özelliklerini etkileyen faktörlere genel olarak bakıldığında, zımba çapının artması, birleştirme kuvvetini artırmaktadır. Zımba çapının gereğinden küçük olması ise kırılma ve yırtılmalara neden olmaktadır. Matris derinliğinin artması, üst sacın daha fazla plastik şekil değişimine sebebiyet vermesinden dolayı üst sacda yırtılmalar oluşturmaktadır. Matris derinliğinin gereğinden küçük olması ise kenetlemenin oluşmamasına neden olmaktadır. Matris çapının küçük olması boyun kalınlığını düşürmekte ve bağlantının dayanımını düşürmektedir. Matris çapının gereğinden büyük olması ise kenetlemenin oluşmamasına neden olmaktadır. Matris ve özellikle zımbanın kenarlarında bir miktar yarıçap olması saclarda oluşabilecek yırtılmaların önüne geçecektir.

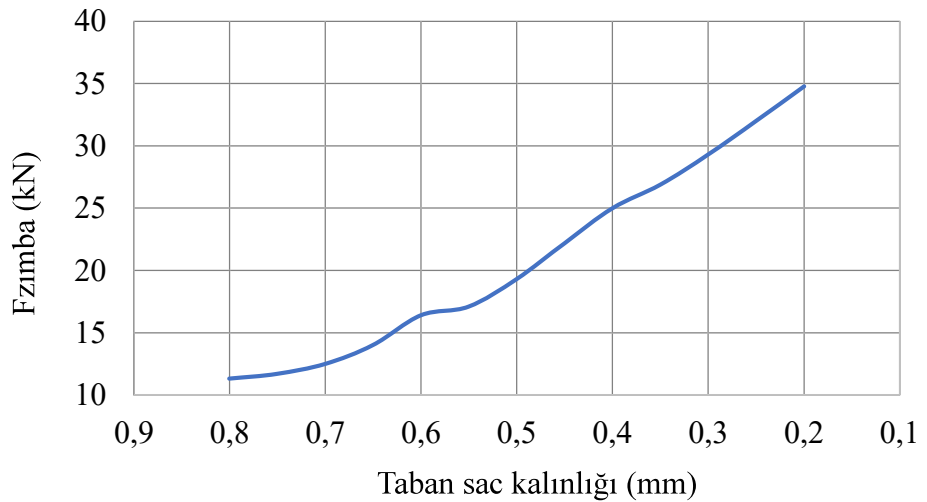
4.2. Taban Sac Kalınlığının Etkisi

Form punta bağlantılarında birleşmenin kalitesini teyit edebilmek için bazı ölçümler yapılmaktadır. Taban sac kalınlığının ölçülmesiyle birleşmenin kalitesi hakkında yorum yapılabilir. Bu ölçümü yapabilmek için farklı şekillerde ölçüm cihazları mevcuttur. Temsili bir ölçüm cihazı Şekil 4.9’da görülmektedir.



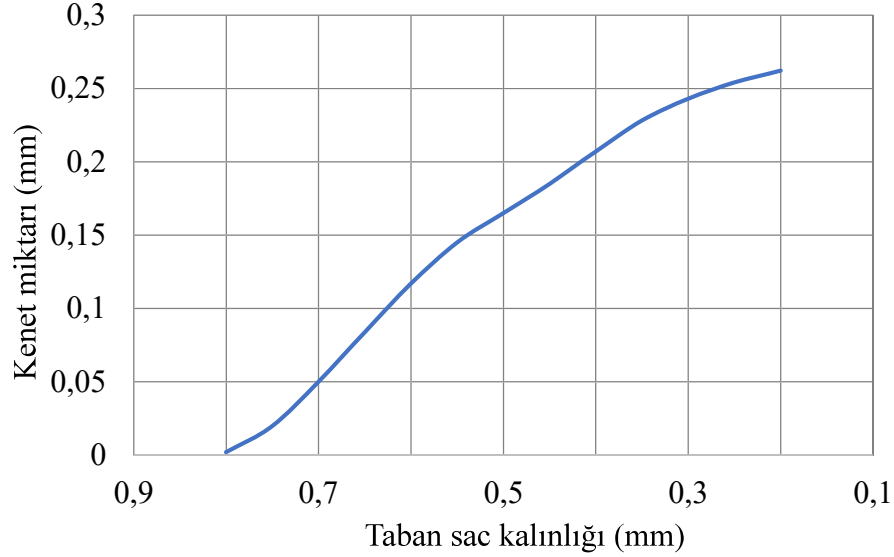
Şekil 4.9. Form punta taban kalınlığı ölçüm cihazı

Taban sac kalınlığının kenet miktarına ve ayırma kuvvetine olan etkisi ele alınmıştır. Zımba stroğu 0,05 mm artırılarak taban sac kalınlığı 0,8 mm’den 0,05 mm azalması sağlanmıştır. Böylece zımba stroğunun, zımba kuvvetine, kenet miktarına ve ayırma kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.10’da görüldüğü gibi tahmin edileceği üzere zımba stroğu arttıkça zımba kuvveti artmaktadır.



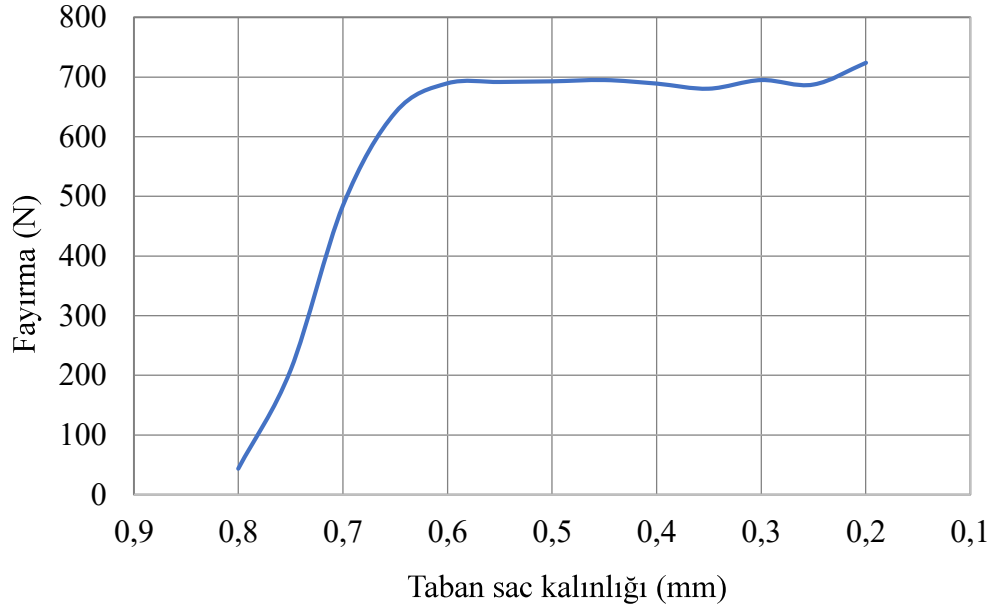
Şekil 4.10. Taban sac kalınlığının zımba kuvvetine etkisi

Zimba stroğunun dolayısıyla taban sac kalınlığının kenet miktarına etkisi Şekil 4.11’de görülmektedir. Zimba stroğu arttıkça taban sac kalınlığı incelmekte ve sacların matris içerisinde yayılımı artmaktadır. Böylece kenet miktarı da artmaktadır.



Şekil 4.11. Taban sac kalınlığının kenet miktarına etkisi

Zimba stroğu arttıkça taban sac kalınlığı azalmakta ve ayırma kuvveti belirli bir seviyeye kadar artmaktadır. Kenet miktarının artmasına rağmen ayırma kuvvetinin belirli bir seviyede sabit kalması taban sac kalınlığına bağlıdır. Yani, zimba stroğu artırılıp taban sac kalınlığı belirli bir seviyenin altına düşürülmesiyle ayırma kuvvetinde önemli seviyede bir değişiklik görülmez. Sonuçlar Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Taban sac kalınlığının ayırma kuvvetine etkisi

Zımba stroğunun belirli bir değeri geçmemesi önemlidir. Çünkü, belirli bir seviyeden sonra ayırma kuvvetinde ciddi bir artış görülmez. Üstelik zımba için daha fazla kuvvet gerekli olduğundan dolayı gereksiz enerji sarfiyatına sebep olur. Ayrıca, taban sac kalınlığının gereğinden daha fazla düşürülmesiyle kalite problemleriyle karşılaşılabilir. Geri yaylanma, yırtılma, kopma, delinme gibi problemlerle karşılaşılabilir.

4.3. Sürtünme Katsayısının Etkisi

Üst sac – alt sac, alt sac – matris, üst sac – pot çemberi, üst sac – zımba arasında temastan dolayı oluşacak sürtünmeyi modellemek için Coulomb Sürtünme Modeli kullanılır. Coulomb sürtünme katsayısı deneysel çalışmalarla bulunabilir. Fakat, deneysel çalışmaların yapılamadığı veya deneysel verilere ulaşamadığı durumlarda bir varsayım yapılır. Literatürde yapılmış bazı çalışmalarda kullanılmış sürtünme katsayıları Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.19. Literatürdeki çalışmalarda kullanılmış Coulomb sürtünme değerleri

Malzeme	Malzeme	Üst sac/ Alt sac	Alt sac/ Matris	Üst sac/ Zimba	Üst sac/ Pot çemberi	Literatür
AL5754	AL5754	0,3	0,1	0,1	-	[Oudjene ve Ben-Ayed 2008]
M-S	7075 AL	0,30	0,25	0,25	0,15	[Eshtayeh ve Hrairi 2016]
7075 AL	7075 AL	0,15	0,25	0,25	0,15	[He ve ark. 2014]
AL-5052	AL-5052	0,1/0,2	0,1/0,2	0,1/0,2	0,1/0,2	[Zheng ve ark. 2012]

Takım ve saclar arasında farklı sürtünme katsayıları kullanılarak, sürtünme katsayısının birleşmeye olan etkisi incelenmiştir. Saclar arasında ve sac-takım arasındaki Coulomb sürtünme katsayıları 0,1, 0,2 ve 0,3 olarak ele alınmıştır.

Çizelge 4.20. Coulomb sürtünme katsayıları

Seviye	Zimba / Üst sac A	Üst sac / Alt sac B	Alt sac / Kalıp C	Üst sac / Baskı D
Seviye 1	0,1	0,1	0,1	0,1
Seviye 2	0,2	0,2	0,2	0,2
Seviye 3	0,3	0,3	0,3	0,3

Üst sac / zimba, alt sac / üst sac, alt sac / kalıp, üst sac / baskı arasındaki farklı sürtünme katsayıları ele alınmış ve Taguchi L9 ortogonal dizilimi kullanılarak sonlu elemanlar analizi yardımıyla deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda kenet miktarları Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Taguchi L9 ortogonal dizisi ve deney sonuçları

Deney	A	B	C	D	Kenet Miktarı (mm)	Boyun Kalınlığı (mm)	Zimba Kuvveti (kN)	Ayırma Kuvveti (N)
Deney 1	1	1	1	1	0,123	0,521	17,1	633,8
Deney 2	1	2	2	2	0,134	0,523	19,4	657,1
Deney 3	1	3	3	3	0,141	0,525	20,4	672,5
Deney 4	2	1	2	3	0,119	0,527	21,2	635,4
Deney 5	2	2	3	1	0,131	0,528	21,6	656,2
Deney 6	2	3	1	2	0,134	0,509	18,9	677,7
Deney 7	3	1	3	2	0,116	0,53	22,2	630,1
Deney 8	3	2	1	3	0,117	0,509	19	655,8
Deney 9	3	3	2	1	0,128	0,516	21,7	674

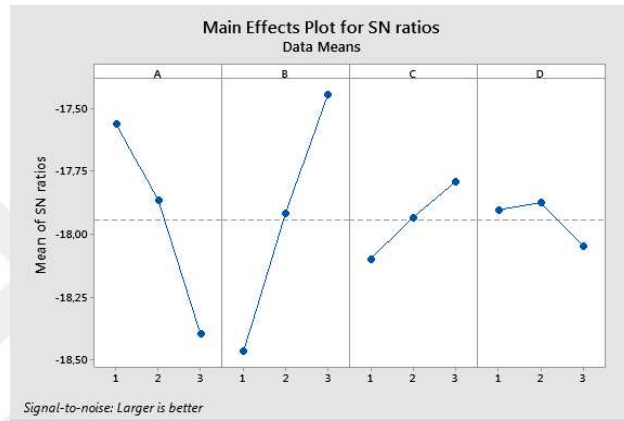
Çizelge 4.20’de görüleceği gibi saclar ve takımlar arasındaki sürtünme katsayılarının değişmesiyle kenet miktarı ve boyun kalınlığında bir miktar değişimler gözlenir. Dolayısıyla zimba kuvvetinde ve ayırma kuvvetinde de bir miktar değişim gözlenir. Boyun kalınlığına etkisi düşüktür. Daha önceki bölümlerde ele alındığı gibi ayırma kuvvetini nispeten kenet miktarı belirle denilebilir. Bu yüzden ilerleyen bölümlerde kenet miktarı ve ayırma kuvveti ele alınacaktır. Kenet miktarı ve ayırma kuvveti ile ilgili delta ve rank değerleri Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23’te görülmektedir.

Çizelge 4.22. Kenet miktarı ortalamalar için delta ve rank değerleri

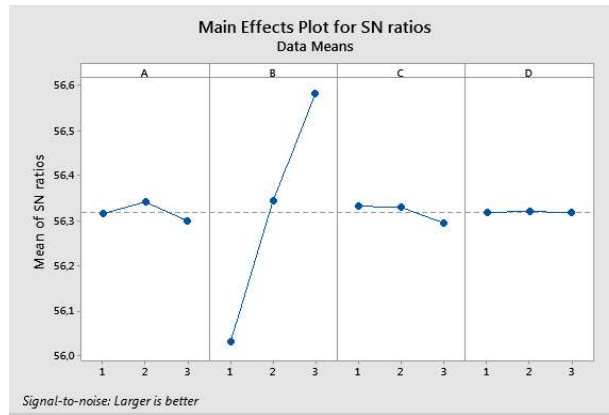
Seviye	A	B	C	D
1	0,1327	0,1193	0,1247	0,1273
2	0,1280	0,1273	0,1270	0,1280
3	0,1203	0,1343	0,1293	0,1257
Delta	0,0123	0,0150	0,0047	0,0023
Rank	2	1	3	4

Çizelge 4.23. Ayırma kuvveti ortalamalar için delta ve rank değerleri

Seviye	A	B	C	D
1	654,5	633,1	655,8	654,7
2	656,4	656,4	655,5	655,0
3	653,3	674,7	652,9	654,6
Delta	3,1	41,6	2,8	0,4
Rank	2	1	3	4



Şekil 4.13. Sürtünme katsayısının kenet miktarı üzerindeki etkisi ve S/N oranı



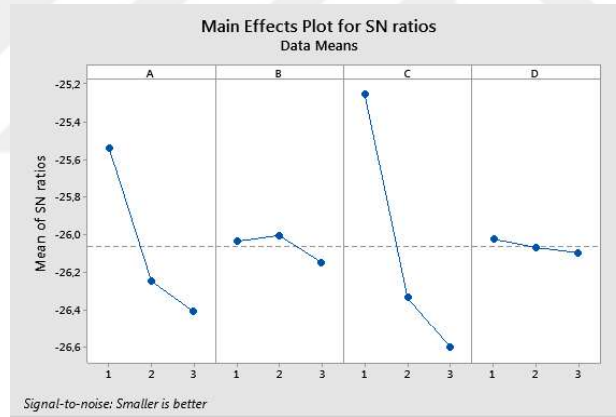
Şekil 4.14. Sürtünme katsayısının ayırma kuvveti üzerindeki etkisi ve S/N oranı

En büyük en iyi metoduna göre yapılan analizde Şekil 4.13'te görüldüğü gibi kenet miktarının belirlenmesinde zımba-üst sac ve üst sac-alt sac arasındaki sürtünme katsayısının etkili olduğu görülmektedir. En büyük en iyi metoduna göre yapılan analizde Şekil 4.14'te görüldüğü gibi ayırma kuvvetinin belirlenmesinde ise üst sac-alt sac arasındaki sürtünme katsayısının etkili olduğu görülmektedir. Saclar arasındaki sürtünme

katsayısı belirli bir değerde olacağı için sürtünme katsayısının ayırma kuvveti üzerinde etkisi çok fazla görülmeyecektir. Saclar arasındaki sürtünme katsayısını azaltacak bir uygulama yapılabilir. Fakat bu durumda korozyona sebebiyet verebilecek durumlar oluşabilir. Korozyona sebebiyet vermeyecek uygulamalar yapılabilir.

Çizelge 4.24. Zımba kuvveti ortalamalar için delta ve rank değerleri

Seviye	A	B	C	D
1	18,97	20,17	18,33	20,13
2	20,57	20,00	20,77	20,17
3	20,97	20,33	21,40	20,20
Delta	2,00	0,33	3,07	0,07
Rank	2	3	1	4



Şekil 4.15. Sürtünme katsayısının zımba kuvveti üzerindeki etkisi ve S/N oranı

En küçük en iyi metoduna göre yapılan analizde Şekil 4.15'te görüldüğü gibi zımba-üst sac ve alt sac-kalıp arasındaki sürtünme katsayısı zımba kuvvetine etki etmektedir. Yani saclar ve form punta takımları arasındaki sürtünme katsayısı zımba kuvvetine etki etmektedir. Birleştirme işlemi yapılırken enerji sarfiyatının düşürülmesi için zımba ve kalıp üzerinde sürtünmeyi düşürecek işlemler yapılması uygun olacağı düşünülmektedir. Böylece saclar matris içerisinde daha kolay genişleyecek ve daha düşük kuvvet değerleriyle birleştirme sağlanmış olacaktır.

4.4. Yanıt Yüzey Yöntemi

Yanıt Yüzey Metodu, 1950’li yıllarda Box ve Wilson tarafından tanımlanmış olup, bazı girdi değişkenleriyle bir veya daha fazla çıktı değişkeninin arasındaki ilişkiyi inceler. Yanıt Yüzey Metodu, Response Surface Methodology olarak bilinir. Matematiksel ve istatistiksel çözümler kullanır. Deney tasarımında (DoE), bir veya daha fazla bağımsız giriş değişkeninden etkilenen bir veya daha fazla değişkeni geliştirmek ve optimize etmek için kullanılır. Yanıt yüzeyi metodolojisi deneysel tasarımı (DoE), Box-Behnken Tasarımı ve Merkezi Kompozit Tasarım olarak ikiye ayrılır (Kızılaslan 2019).

Ayrırma kuvvetini maksimize etmek için Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılmıştır. Yukarıda, ayırma kuvvetini etkileyen en önemli 6 faktör ele alınmıştır. Bu faktörler A, B, C, D, H, G geometrik değişkenleridir. Bu 6 faktör, Yanıt Yüzey Yöntemi, maksimum hedef yöntemi ile analiz edildiğinde Çizelge 4.25’teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.25. Ayırma kuvveti varyans analizi sonuçları

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	626827	31341	20,63	0,001
Lineer	6	474048	79008	52,00	0,000
A	1	131738	131738	86,71	0,000
B	1	178981	178981	117,81	0,000
C	1	102544	102544	67,49	0,000
D	1	57133	57133	37,61	0,001
G	1	2093	2093	1,38	0,285
H	1	2465	2465	1,62	0,250
Kare	6	91585	15264	10,05	0,006
A*A	1	18234	18234	12,00	0,013
B*B	1	42297	42297	27,84	0,002
C*C	1	20424	20424	13,44	0,010
D*D	1	8555	8555	5,63	0,055

Çizelge 4.25. Ayırma kuvveti varyans analizi sonuçları (devamı)

G*G	1	953	953	0,63	0,459
H*H	1	1376	1376	0,91	0,378
2 Yönlü Etkileşim	8	19486	2436	1,60	0,291
A*G	1	827	827	0,54	0,489
A*H	1	331	331	0,22	0,657
B*G	1	3850	3850	2,53	0,163
B*H	1	5963	5963	3,92	0,095
C*G	1	4284	4284	2,82	0,144
C*H	1	4359	4359	2,87	0,141
D*G	1	313	313	0,21	0,666
D*H	1	169	169	0,11	0,750
Hata	6	9116	1519		
Toplam	26	635943			

Çizelge 4.26. Model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)
38,9781	98,57%	93,79%

Çizelge 4.27. Ayırma kuvveti yanıt yüzey yöntemi sonuçları

A	B	C	D	G	H	Ayırma Kuvveti Fit Değeri
2,78	0,21	0	4,01	1	94,89	908,29

Çizelge 4.26’da görüldüğü gibi, A, B, C, D, G, H değişkenlerinin tablodaki değerlerde olması ile en yüksek çekme kuvvetinin elde edileceği görülmektedir.

5. SONUÇ

Çalışmanın bu kısmında elde edilen sonuçlardan ve sanayide uygulama esnasında form punta bağlantılarında karşılaşılan bazı hata türleri ele alınacaktır. Bunlar, uygulama esnasında karşılaşılabilecek muhtemel hata türleridir. Bunların belirtilmesindeki amaç, uygulama esnasında sorunla karşılaşılabilecek durumda, sorunun ne sebeple kaynaklandığı hakkında tahmin yürütülebilmesi amacıyla ele alınmıştır.

- Zımba kuvvetinin yetersiz olduğu durumlarda kenet oluşmaz ve dolayısıyla birleşme sağlanamaz.
- Zımba kuvvetinin gereğinden yüksek olduğu durumlarda ise, taban sac kalınlığı inceler ve bağlantının kalitesini düşürür.
- Zımba çapının gereğinden büyük olduğu durumlarda sacların boyun bölgesinde incelmeler meydana gelir ve zımba kuvveti artacağından dolayı enerji sarfiyatı artar.
- Matris derinliğinin gereğinden düşük olduğu durumlarda kenet sağlıklı bir biçimde oluşamaz. Dolayısıyla bağlantının kalitesini düşürür.
- Matris derinliğinin gereğinden fazla olduğu durumlarda sacların boyun bölgesinde incelmeler meydana gelir ve yırtılmalar gözlemlenebilir.
- Kalın sac / ince sac, ince sac / kalın sac, sünek sac / gevrek sac, gevrek sac / sünek sac gibi malzeme konumlandırmasının doğru olmadığı durumlarda (zımba tarafı, matris tarafı) birleşme kalitesi düşebilir veya hiç birleşme sağlanamayabilir.
- Pot çemberi baskı kuvvetinin yetersiz olduğu durumlarda, saclar zımbanın hareket yönünün tersine bir hareket göstermeye çalışır. Bu durumda, sac yüzeyinde bir miktar düzlemsellik kaybolabilir ve istenmeyen deformasyonlara sebep olabilir.



Şekil 5.1. Uygulamada oluşması muhtemel hatalar

Form punta bağlantılarında takım geometrilerinin bağlantının kalitesine ne şekilde etki ettiği araştırılmıştır. Ayırma kuvveti ve çekme kuvvetini belirleyen, kenet miktarı ve boyun kalınlığını belirleyen boyutsal parametreler incelenmiştir. Kenet miktarı ve boyun kalınlığı, ayırma kuvveti ve çekme kuvveti göz önüne alındığında genel olarak zımba çapı, matris çapı, matris derinliği, zımba köşe yarıçapı, kalıp duvar açısı, zımba duvar açısı form punta bağlantılarının kalitesini etkilediği elde edilmiştir. Bağlantıların dayanımını artırmak için hangi parametrelere yönelmek gerektiği bilgisi elde edilmiştir. Sadece form punta takımlarının geometrik ölçüleri değil, saclar arasındaki sürtünme katsayıları ve zımba kuvvetinin de mekanik kenet miktarına ve boyun kalınlığına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, zımba kuvvetinin belirli bir değerden sonra ayırma ve çekme kuvvetini etkilemediği, hatta istenmeyen deformasyonlara sebebiyet verebileceği gösterilmiştir. Böylece, zımba kuvvetinin belirli bir seviyeyi geçmemesi hem enerji sarfiyatı açısından hem de bağlantının kalitesi açısından faydalı olacağından bahsedilmiştir.

Form punta, kaynak yöntemine alternatif bir yöntemdir. İstenilen mekanik performans karşılandığı takdirde kullanılmasının birçok avantajı vardır. Proses süresi, proses maliyeti, ısıl yük oluşturmama, farklı malzeme türlerinin birleştirilebilmesi gibi önemli avantajları vardır. Gelişen teknoloji ve araçlarda kullanılan malzeme çeşitliliği arttıkça form punta kullanımı giderek artacaktır. Kırılma mekaniği gibi hasar mekanizmalarının çözüme dahil edilmesiyle, proses esnasında veya proses sonrasında bağlantının davranışında ve kalitesinde daha kesin sonuçlar elde edilebilir. Daha sonra yapılacak olan çalışmalar için form punta prosesinin, bakır, magnezyum, çinko gibi farklı tür metalik malzemeler, plastikler, kompozit malzemeler, yüksek mukavemet çelikleri gibi farklı malzemelerin birleştirilmesi üzerine çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Apte, P. R. Taguchi Template.** Indian Institute of Technology Bombay, Department of Electrical Engineering, Ders Notları, Mumbai, Hindistan.
- Bilal, H., İkiz, T. C., Öztürk, F. 2018.** Klinç Bağlantılarının Sonlu Elemanlar Analizlerinin Değerlendirilmesi. 9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON), Bursa.
- Carboni, M., Beretta, S., Monno, M. 2006.** Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(2): 178–190.
- Ceylan, İ. 2008.** Metallerin Plastik Şekillendirilmesinde Kullanılan Malzeme Modellerinin Sonlu Elemanlar ile Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Konstrüksiyon Anabilim Dalı, İstanbul.
- Clinch Products BOLLHOFF**, <https://www.boellhoff.com/tr-en/products-and-services/assembly-technology/clinching-systems-rivclinch.php> (Erişim tarihi: 20.09.2020).
- Corigliano, A., Mariani, S., Orsatti, B. 2000.** Identification of Gurson-Tvergaard material model parameters via Kalman filtering technique. I. Theory. *International Journal of Fracture*, 104(4): 349–373.
- Çakmak, D. 2019.** Pişiricilerde Kullanılan Yüksek Verimli Bekin Özelliklerinin Taguchi Deney Tasarımı Metodu İle Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.
- Çetkin, A. 2010.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Galvanizli Çelik-Alüminyum Sac Form Punta Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 7(4): 25-38.
- De Paula, A. A., Aguilar, M. T. P., Pertence, A. E. M., Cetlin, P. R. 2007.** Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3): 352–357.
- Di Lorenzo, G., Landolfo, R. 2004.** Shear experimental response of new connecting systems for cold-formed structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3–5): 561–579.
- Eshtayah, M. M., Hrairi, M. 2016.** Recent and future development of the application of finite element analysis in clinching process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12): 2589–2608.
- Eshtayah, M., Hrairi, M. 2016.** Multi objective optimization of clinching joints quality using Grey-based Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1–4): 233–249.
- Gerstmann, T., Awiszus, B. 2014.** Recent developments in flat-clinching. *Computational Materials Science*, 81: 39–44.
- Hamel, V., Roelandt, J. M., Gacel, J. N., Schmit, F. 2000.** Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing. *Computers and Structures*, 77(2): 185–200.
- He, X., Zhao, L., Yang, H., Xing, B., Wang, Y., Deng, C., Gu, F., Ball, A. 2014.** Investigations of strength and energy absorption of clinched joints. *Computational Materials Science*, 94(C): 58–65.
- Israel, M., Mauermann, R., Schellnock, J. 2013.** Thick Sheet Clinching Joining up to 20 mm Total Thickness. , 2: 1–10.
- Kahraman, S. 2017.** Kendinden Kenetlenmeli Bağlantı Elemanlarına Ait Boyutsal Özelliklerin Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim

Dalı, Bursa.

Kaya, H. 2012. Form Punta (Clinching) Yöntemiyle Birleştirilmiş İnce Sac Levhaların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon.

Kızılaslan, A. S. 2019. Gaz Türbin Kanatçıklarındaki Kısmi Düzensizliğin Yanıt Yüzeyi Yöntemiyle İstatistiksel Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Lambiase, F., Di Ilio, A. 2016. Damage analysis in mechanical clinching: Experimental and numerical study. *Journal of Materials Processing Technology*, 230: 109–120.

Lee, C. J., Kim, J. Y., Lee, S. K., Ko, D. C., Kim, B. M. 2010. Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets. *Materials and Design*, 31(4): 1854–1861.

Malzeme Aluminium 6XXX T4. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6XXX-T4-Aluminum> (Erişim tarihi: 20.09.2020).

MSC Simufact Forming Mechanical Joining Tutorials. 2020.

Mucha, J., Kašćák, L., Spišák, E. 2011. Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(1): 135–148.

Mucha, Jacek 2011. The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint. *Materials and Design*, 32(10): 4943–4954.

Mäkelä, M. 2019. Workbook – Experimental design exercises in Matlab, Aalto University, School of Chemical Engineering, Department of Bioproducts and Biosystems, Finland.

Neugebauer, R., Kraus, C., Dietrich, S. 2008. Advances in mechanical joining of magnesium. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1): 283–286.

Neugebauer, R., Todtermuschke, M., Mauermann, R., Riedel, F. 2008. Overview on the state of development and the application potential of dieless mechanical joining processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(4): 51–60.

Oudjene, M., Ben-Ayed, L. 2008. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method. *Engineering Structures*, 30(6): 1782–1788.

Rimašauskas, M., Bargelis, A. 2005. Framework of consideration productivity for assembling operations in sheet metalworking. *Mechanika*, 55(5): 51–55.

Slimane, A., Bouchouicha, B., Benguediab, M., Simane, S.A. 2015. Parametric study of the ductile damage by the Gurson–Tvergaard–Needleman model of structures in carbon steel A48-AP. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(2): 217–223.

Song, Y., Yang, L., Zhu, G., Hua, L., Liu, R. 2019. Numerical and experimental study on failure behavior of steel-aluminium mechanical clinched joints under multiple test conditions. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(1): 72–79.

Tu, H. 2018. Numerical Simulation and Experimental Investigation of the Fracture Behaviour of an Electron Beam Welded Steel Joint. *Doctoral Thesis*, Tongji University School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, China.

Türtük, İ. C. 2018. Metallerde Sıcaklık Tabanlı Gevrek – Sünük Geçiş Kırılmasının Modellenmesi İçin Sürekli Ortamlar Hasar Mekanik İle Bütünleşik Gözenekli Plastisite Teorisi Üzerine Yaklaşımlar. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Varis, J. P. 2003. The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1–3): 242–249.

Volvo V60 2020, <https://www.carbodydesign.com/2018/02/the-new-volvo-v60/> (Erişim tarihi: 20.09.2020).

Yılmaz, S. 2015. Poliamit Kompozitlerin Kırılma Tokluğu Ve Kırılma Davranışının Esas Kırılma İşi Ve J-İntegral Metotları İle Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.

Zhao, S. D., Xu, F., Guo, J. H., Han, X. L. 2014. Experimental and numerical research for the failure behavior of the clinched joint using modified Rousselier model. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10): 2134–2145.

Zheng, J., He, X., Xu, J., Zeng, K., Ding, Y., Hu, Y. 2012. Finite element analysis of energy saving jointing method base on energy materials: Clinching. *Advanced Materials Research*, 577: 9–12.

