

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ZIRH ÇELİKLERİNDE KAYNAĞI ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN KAYNAK SONUCU OLUŞAN ÇARPILMAYA
ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BELİRLENMESİ**

HAZIRLAYAN

KÜBRA EZGİ DEMİRTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA- 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİMDALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ZIRH ÇELİKLERİNDE KAYNAĞI ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN KAYNAK SONUCU OLUŞAN ÇARPILMAYA
ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BELİRLENMESİ**

HAZIRLAYAN

KÜBRA EZGİ DEMİRTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. Öğr. Üyesi BEDİ CENK BALÇIK

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Kübra Ezgi Demirtaş tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 04/07/2024

Tez Adı: Zırh Çeliklerinde Kaynağı Etkileyen Parametrelerin Kaynak Sonucu Oluşan Çarpılmaya Etkisinin Modellenmesi ve Belirlenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK (Başkent Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Ahmet Hakan ARGEŞO, Atılım Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 27 / 06 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı: Kübra Ezgi DEMİRTAŞ

Öğrencinin Numarası: 22110035

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

Programı: Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Bedi Cenk BALÇIK

Tez Başlığı: Zırh Çeliklerinde Kaynağı Etkileyen Parametrelerin Kaynak Sonucu Oluşan Çarpılmaya Etkisinin Modellenmesi ve Belirlenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 58 sayfalık kısmına ilişkin, 27 / 06 / 2024 tarihinde tez danışmanım tarafından “Turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7’dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Öğrenci Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Bedi Cenk BALÇIK

Tarih: ... / ... / 2024

.....

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve değerli katkılarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi. Bedi Cenk Balçık 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalar ve analiz çalışmaları konusunda desteklerini esirgemeyen BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne ve yönlendirmeleriyle bana ilk günden bu güne, daima yol gösteren Kıdemli İmalat Müh. ve Metot Müdürü Gürol Aydın'a ve çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Süreç Geliştirme Lideri Göker Gökdemir'e teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatıma başlarken, bana inanıp ve güvenip çalışma fırsatı veren, yaptığım işi sevdiren ve bu sektörde her zaman desteklerini hissettiğim Makine Mühendisi Bülent Çoşan ve Makine Mühendisi Özgür Düzgün'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman bana destek olan, hiç bir yardımı esirgemedi hep yanımda olan ve beni bu günlere getiren babam Cüneyt Demirtaş'a, annem Leyla Demirtaş'a ve kardeşim Ekin Demirtaş'a sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Kübra Ezgi DEMİRTAŞ

ZIRH ÇELİKLERİNDE KAYNAĞI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN KAYNAK SONUCU OLUŞAN ÇARPILMAYA ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE BELİRLENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2024

Bu çalışmada yüksek mekanik özellikleri sebebiyle askeri ve sivil alanlarda yüksek kullanım alanları bulunan MIL-A-46100 standardına uygun malzemeler MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak işlemi için parçalara X kaynak ağzı hazırlığı yapılmış, kaynak ağzı açısı, kaynak ağzı simetrisi, fıkstür adeti ve paso sıralaması parametreleri incelenmiştir. Kaynak işlemi sonrasında çarpılma davranışı ve miktarını tayin etmek amacıyla 3D ölçüm cihazları ile taranmıştır. Aynı işlemler sonlu elemanlar analizi yöntemiyle analiz edilmiş ve çıkan sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından alınan sonuçlar deney sonuçlarını doğrulamıştır. Deney çalışmaları yapılamayan prototip çalışmalarında sonlu elemanlar analizi kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Farklı parametreler ile yapılan deney ve analizler sonucunda paso sıralamasını değiştirmenin, simetrik kaynak ağzı tasarımının, kaynak ağzı açısının daralmasının ve kaynak işlemi sırasında parçaların sabitlenmesinin çarpılma miktarı üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Zırh çeliği, Kaynak, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

Kübra Ezgi DEMİRTAŞ

**MODELING AND DETERMINATION OF THE EFFECT OF PARAMETERS
AFFECTING WELDING IN ARMOR STEEL ON DISTORTION RESULTING
FROM WELDING**

Başkent University Institution of Sciences

Department of Defense Technologies and Systems

2024

In this study, materials meeting the MIL-A-46100 standard, which are widely utilized in military and civilian industries because of their mechanical properties were welded using MAG welding processes. X groove preparations were performed on the parts prior to welding and parameters such as groove angle, groove symmetry, fixture number and pass sequence were examined. Following the welding procedure the parts were scanned using 3D measurement equipment to assess distortion behavior and amount. The same techniques were analyzed using the finite element analysis approach and the results were compared to the experimental results. The findings of the analysis confirmed the experimental results. It concluded that finite element analysis can be used for prototype manufacture when experimental studies cannot be carried out. The experiments and studies with various parameters revealed that modifying the pass sequence, reducing groove angle and fixtures all had a positive effect on the amount of distortion.

KEYWORDS: Armor steel, Welding, Finite Element Analysis

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. ZIRH ÇELİKLERİ	6
3.1. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi	6
3.2. Zırh Çeliklerinin Üstünlükleri	6
3.3. Zırh Çeliklerinin Kompozisyonu	7
3.4. Zırh Çeliklerinde Isıl İşlem.....	9
3.5. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti	10
3.5.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri	11
3.5.2. Malzeme kalınlığı.....	12
3.5.3. ArmoX 500 T kaynak kabiliyeti.....	12
4. KAYNAKLI İMALAT SONRASI OLUŞAN ÇARPILMALAR VE KALINTI GERİLMELER.....	13
4.1. Kaynak Sonrası Kalıntı Gerilmeler	13
4.2. Çarpılma Tipleri.....	15
4.3. Kaynak Sayısı ve Sırasının Çarpılmaya Etkisi	16
4.4. Çarpılmaların Engellenmesi.....	16
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	17
5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Çalışma Prensipleri	17
5.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması.....	18
5.3. Sysweld Programı.....	20
5.4. SYSWELD Programının Girdi Adımları.....	21

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
6.1. Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar	28
6.2. Deney Grupları	29
6.3. Numune 1 ve Numune 2 Kaynak Hazırlığı	30
6.4. Numune 1 ve Numune 2 Kaynak İşlemi	30
6.5. Numune 1 ve Numune 2 Ölçüm İşlemi	32
6.6. Numune 1 ve Numune 2 Ölçüm Sonuçları	34
6.7. Numune 3 ve Numune 4 Kaynak İşlemi	35
6.8. Numune 3 ve Numune 4 Ölçüm İşlemi	36
6.9. Numune 5 Kaynak İşlemi	40
6.10. Numune 5 Ölçüm İşlemi	41
6.11. Numune 6 Kaynak İşlemi.....	41
6.12. Numune 6 Ölçüm İşlemi	42
7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE PARÇALARIN ANALİZİ.....	45
7.1. Numunelerin Mesh İşlemi.....	45
7.2. Numune 1 ve 2 için Simülasyon Sonuçları	46
7.3. Numune 3 ve 4 için Simülasyon Sonuçları	49
7.4 Numune 5 ve 6 için Simülasyon Sonuçları	52
7.5. Sonuçların Üçlü Kombinasyonlar ile Karşılaştırılması	56
7.5.1. Numune 1, Numune 2 ve Numune 4 karşılaştırılması.....	56
7.5.2 Numune 1, Numune 5 ve Numune 6 karşılaştırılması.....	56
8. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	61

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. MIL-SPEC’te geçen kimyasal [13]	8
Tablo 3.2. Levha kalınlıklarına bağı olarak üretilen zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [13]	8
Tablo 3.3. Zırhlı çeliklerde imalat işlemleri doğrultusunda beklenen örnekler [14]	11
Tablo 6.1. Miller XMT450 technical data (“Anonymous 7”, n.d.)	28
Tablo 6.2. Parametreler tablosu	29
Tablo 6.3. Numune 1 ve 2 için noktasal 3D ölçüm sonuçları	34
Tablo 6.4. Numune 3 ve 4 için noktasal ölçüm sonuçları	38
Tablo 6.5. Numune 5 ve 6 için noktasal ölçüm sonuçları	43
Tablo 7.1. Numune 1 ve 2 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları	48
Tablo 7.2. Numune 3 ve 4 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları	51
Tablo 7.3. Numune 5 ve 6 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kaynaklı ürünün toplam maliyeti.....	2
Şekil 3.1. Korunma ve saldırma amaçlı kullanılan çeliklerin iç yapısına ait örnekler	6
Şekil 3.2. Zırh çeliklerinin üretim aşaması.....	9
Şekil 3.3. Karbürleyici elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri	10
Şekil 4.1. Isıtılan çubuklarda serbest genleşme	13
Şekil 4.2. Isıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genleşme.....	13
Şekil 4.3. Az karbonlu alaşımsız çelik levha üzerine dikiş çekildiğinde ITAB noktalarının termal çevrimi	14
Şekil 4.4. Kaynak prosesinde sıcaklık dağılımı (a) A,B,C parçaların konumları (b) A,B,C zamana bağlı sıcaklık değişimi	15
Şekil 4.5. Kaynaklı birleştirmelerde meydana gelen temel çarpılmalar	16
Şekil 5.1. Modelde düğüm noktası ve eleman gösterimi.....	18
Şekil 5.2. Modelin elemanlara ayrılması	19
Şekil 5.3. Kullanılan eleman tipleri	19
Şekil 5.4. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı alanlar	20
Şekil 5.5. SYSWELD (Visual-Weld) ara yüzü	21
Şekil 5.6. Girdi basamakları 1. adım	22
Şekil 5.7. Girdi basamakları 2. adım.	22
Şekil 5.8. Girdi basamakları 3. adım	23
Şekil 5.9. Girdi basamakları 4. adım	24
Şekil 5.10. Girdi basamakları 5. adım	25
Şekil 5.11. Girdi basamakları 6. adım	26
Şekil 5.12. Girdi basamakları 7. adım	27

Şekil 5.13. Girdi basamakları 9. adım	28
Şekil 6.1. Kaynak makinesi	28
Şekil 6.2. Ölçüm cihazı	29
Şekil 6.3. Puntalama görüntüsü	30
Şekil 6.5. Numune 2 kaynak öncesi.	31
Şekil 6.4. Numune 1 kaynak öncesi.	31
Şekil 6.7. Numune 2 için paso sıralaması.....	31
Şekil 6.6. Numune 1 paso sıralaması.....	31
Şekil 6.8. Numune 1 ve Numune 2 kaynak sonrası.....	32
Şekil 6.9. Numune 1 ve 2 için oluşturulan katı model	32
Şekil 6.10. Numune 1 için 3D için ölçüm sonuçları.....	33
Şekil 6.11. Numune 2 için 3D için ölçüm sonuçları.....	33
Şekil 6.12. Numune 1 ve 2 için 3D ölçüm sonuçları.....	35
Şekil 6.14. Numune 3 ve 4 için kısıtlama gösterimleri	35
Şekil 6.15. Numune 3 ve 4 için kaynak öncesi ve kaynak sonrası	36
Şekil 6.16. Numune 3 ve 4 için oluşturulan katı model	37
Şekil 6.17. Numune 3 3D ölçüm sonuçları.....	37
Şekil 6.18. Numune 4 3D ölçüm sonuçları.....	38
Şekil 6.19. Numune 3 ve 4 için ölçüm sonuçları.....	39
Şekil 6.20. Numune 5 için kaynak ağzı	40
Şekil 6.21. Numune 5 kaynak öncesi ve sonrası	40
Şekil 6.22. Numune 5 3D ölçüm sonuçları.....	41
Şekil 6.23. Numune 6 kaynak ağzı hazırlığı.....	42
Şekil 6.24. Numune 6 kaynak öncesi ve sonrası	42
Şekil 6.25. Numune 6 3D ölçüm sonuçları.....	43

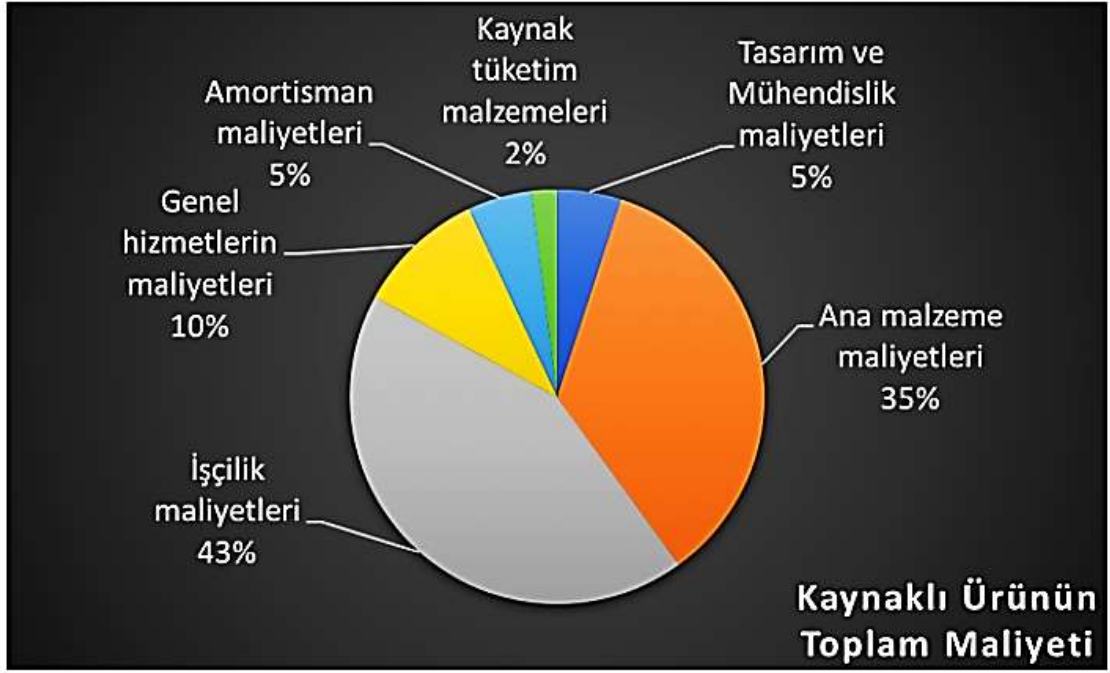
Şekil 6.26. Numune 5 ve 6 için ölçüm sonuçları.....	44
Şekil 7.1. Numunelerin mesh (çözüm ağı)	45
Şekil 7.2. Numune 1 ve 2 için simülasyon sonuçları.....	46
Şekil 7.3. Numune 1 için analiz sonuçları	47
Şekil 7.4. Numune 1 için analiz sonuçları	47
Şekil 7.5. Numune 1 ve 2 simülasyon için ölçüm sonuçları.....	48
Şekil 7.6. Numune 3 ve Numune 4 için simülasyon sonuçları.....	49
Şekil 7.6. Numune 3 ve Numune 4 için simülasyon sonuçları (devam)	50
Şekil 7.7. Numune 3 simülasyon sonuçları	50
Şekil 7.8. Numune 4 simülasyon sonuçları	51
Şekil 7.9. Numune 3 ve 4 simülasyon için ölçüm sonuçları.....	52
Şekil 7.10. Numune 5 ve 6 için simülasyon sonuçları.....	53
Şekil 7.11. Numune 5 simülasyon sonuçları	54
Şekil 7.12. Numune 6 simülasyon sonuçları	54
Şekil 7.13. Numune 5 ve 6 simülasyon için ölçüm sonuçları	55
Şekil 7.14. Numune 1, Numune 3 ve Numune 4 analiz ve deneysel karşılaştırma	56
Şekil 7.15. Numune 1, Numune 5 ve Numune 6 grafiği	57
Şekil 7.16. Bütün numunelerin grafiği	57

1. GİRİŞ

Dünya tarihine bakıldığında zırhın gelişimi antik çağlarda vücut zırhlarıyla başlamış devletlerin birbiriyle toprak ve egemenlik için savaştığı insan gücünün ön planda olduğu dönemlerde kılıç ve kalkan gibi dövüş araçları ile devam etmiştir. Milattan önce 1500lü yıllarda savaşların insan gücüyle gerçekleştiği zamanlarda kullanılmaya başlandığı düşünülen zırhların ilk formları uzun süreler boyunca bedenlerin korunması şeklindeydi. Bu savaşlara süvari birlikleri ve araçların girmesiyle çeşitli boyutlu metal zırh plakalar olarak üretilmiştir. Sürekli gelişim gösteren savunma stratejileri, sınırların büyümesi ve savaşan tarafların arasındaki mesafelerin artması ile uzun menzilli silahlar geliştirilmiş ve zırhlara olan ihtiyaç fazlasıyla artmıştır.

Ülkemizin coğrafik olarak stratejik bir bölgede yer alması nedeniyle, zırh çeliği kullanımı açısından önemli bir potansiyel söz konusudur fakat bu zamana kadar yapı çelikleri ve paslanmaz çeliklerin çarpımları hakkında araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda kaynak işlemi sırasındaki; Malzeme kalınlığı, tel çapı, tel ilerleme hızı, akım, voltaj kaynak hızı gibi işlem parametrelerinin değiştirilmesi üzerinde durulmuştur. Açıkça görülmektedir ki, tasarım ve mühendislik maliyetlerinin toplam maliyetler içerisindeki etkisi oldukça düşüktür. Tasarım başlığında yapılacak pozitif etki bizi daha fazla olan işçilik maliyetinden de tasarruf ettirecektir.

Bir ürünün hikayesine bakıldığında tasarımından üretimine ve kullanıcıya ulaşmaya kadar geçirdiği süreçte tüm adımları ele alınırsa eğer ürünün güncel halini muhafaza etmesi ve gelen revizyonlar imalat maliyetini etkileyen en önemli etkidir. İmalat süresi dahil son ürüne etkisi olan değişiklikler bu süreç gözetildiğinde maliyete etki eden en önemli parametredir. Ürünün tasarımından son kullanıcıya ulaşana dek geçirdiği bu süreçte günümüzde her geçen gün ilerleyen teknolojik gelişmelerin etkisi ile hem maliyeti hem de termin sürecini uzatmaktadır.



Şekil 1.1. Kaynaklı ürünün toplam maliyeti

Diğer taraftan ilerleyen teknolojiyle birlikte sonlu elemanlar analizi yöntemiyle kompleks geometriye sahip şekiller çok daha küçük parçalara ayrılarak çözülebilmektedir. Kompleks geometriye sahip parçalar modellenerek sonuçlar analiz edilebilmektedir. Böylece her parametre için farklı prototipler üretmek zorunda kalmadan optimum parametrelerin seçilmesini sağlayabilmektedir.

Özellikle savunma ve havacılık gibi yüksek teknoloji gerektiren endüstrilerde, deneysel veri üretiminin maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle, sayısal modellerden elde edilen sonuçların imalat süreçlerinin optimize edilmesinde kullanılması hedeflenmektedir. Ayrıca, son ürün üzerindeki artık gerilmelerin miktarı ve konumu hakkında bilgi sahibi olmak, uzun vadeli bakım periyotlarını belirlemek, hem zaman hem de prestij kaybına neden olan kazaları önlemek için önemlidir. Bu sebeple tasarım ilkelerinden, kaynak dikişinin tasarımdaki konumu, kaynak ağzının tasarımı, fişstürün tasarımı, paso sıralaması gibi parametreler üzerinde çalışılacaktır.

Bu çalışma sonunda kaynak işleminde, zırh çeliklerinde tasarım parametrelerinin çarpılmalar üzerindeki etkisi deneysel çalışmalar ve modellenmesi sonucunda kaynak işlemi öncesi kaynak sağlığı ve olası çarpılmalar hakkında tasarım açısından yol gösterici olacaktır. Bu sayede zırh çeliklerinde kaynak kalitesi açısından en büyük sorunlardan biri olan çarpılmayı azaltabilecek uygun kaynak tasarım parametreleri belirlenebilecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kaynaklı imalat yöntemi en çok kullanılan imalat yöntemlerinden biridir. Kaynaklı imalat sonrasında oluşan kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar en önemli sorunlardandır. Kaynaklı imalat sonrası tamiri hem masraflı hem uzun terminli kimi zaman ise tamiri mümkün değildir. Kaynaklı imalat pasoların sıralaması, kaynak ağzı açıları gibi farklı parametreler mevcuttur. Uygun tasarımsal parametrelerin seçilmesi için birçok farklı çalışma yapılmıştır. Gelişmiş teknolojik ürünlerin sıkça kullanılması gereken endüstriyel alanlarda bu malzemelerin temini, deneysel çalışmaların yapılması, üretim geliştirme süreçleri çok maliyetli olabilmektedir. Bu şartlarda simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar imalat optimizasyonları için büyük önem taşımaktadır. Literatürde kaynaklı imalat ve açısal distorsiyon ve sonlu elemanlar analizi ile ilgili yapılan çalışmalar belirtilmiştir.

Yılmaz tarafından östenitik paslanmaz çelik levhaların koruyucu gaz altında T tipi kaynak sırasında meydana gelen çarpılmayı araştırmak amacıyla yaptığı araştırmada kaynak öncesi ve sonrası levha boyut ölçümleri yapılmış, kaynak sırasında sıcaklık ölçümleri ve ısı dağılımı gözlemlenmiştir. Sıfır ayarı yapılan numunelerin tüm yüzeyi lazer cihazı ile taranarak veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Kaynak öncesinde gerçekleştirilen tüm bu işlemler kaynak sonrasında tekrarlanarak deformasyonlar kayıt altına alınmıştır. Testler sonucunda ilave ısı girdisi kullanımının dalgalılıktan kaynaklanan kaynak bozulmalarını önlediği, ortaya çıkan açısal bozulmanın ise parçanın hareketini sınırladığı tespit edilmiştir [1].

Çelik çalışmasında sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı ve artık gerilmeyi deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Yapısal analizde malzemenin mekanik özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinde arttığı ve son gerilmenin erime bölgesinde olduğu görülebilmektedir. Sabit gerilmeler nedeniyle parça önce dışa, sonra içe doğru şekil değiştirdiği görülmüştür [2].

Erol tarafından yapılan çalışmada St37/St37 ve Ck45/Ck45 malzeme çiftlerinin alın ve köşe kaynağı gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında gerçekleştirilen işlem sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu adımda kaynak prosesi her proses parametresi için bilgisayar ortamında simüle edilmiş ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak tahmin doğruluğu doğrulanmıştır. Deneysel çalışma için yapılan ölçümler, St37 kaynak çiftinde meydana gelen çarpılmaların, Ck45 kaynak çiftinde meydana gelen bozulmalardan daha büyük olduğu sonucuna varmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel

Çalışmalardan kaynak malzemesi kalınlığının kaynak işlemi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kalınlık arttıķa ortalama sıcaklık değerlerinin ve çarpılma miktarının azaldığı belirlenmiştir [3].

Tapıcı tarafından yapılan çalışmada manuel kaynak prosesini iyileştirme adımlarında, kaynak uygulanan elik profil parçalarının doğru yerleştirilmesini sağlayan bir fikstür tasarımı sistematik olarak ilerlemiş, tasarıma uygun kaynak parametleri belirlenerek kaynak robotuna kaynak yaptırılmıştır. Isı girişinin kaynak çarpılmaları üzerindeki etkisi, yüksek ısı girdili kaynak işleminin bir sonucu olarak ortaya çıkan çarpılmaları hesaba katmak için ters açılı bir fikstrde farklı hızlarda kaynak yapılarak incelenmiştir. Kaynak parametreleri sabit tutularak 6 numune üç farklı hızda kaynak işlemi yapılmıştır. Her numune çiftinden biri fikstür üzerinde diğeri fikstrden ayrılarak soğutulmuştur. Farklı kaynak hızları ile farklı ısı girdilerinin parçada oluşturduğu gerilime etkisi araştırılmıştır. Isı girdisi arttıķa iş parçasında oluşan gerininin arttığı gözlenmiştir. Testler sonucunda kaynak hızıyla ters orantılı olarak ısı girdisi arttıķa iş parçasındaki çarpılma miktarının arttığı gözlemlenmiştir [4].

Çeliker tarafında yapılan çalışmada AISI 304 kalite paslanmaz elik malzemeler ark kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Aynı işlemler Ansys workbench programı sonlu elemanlar metoduyla simülasyonu yapılmıştır. İşlem sonrası meydana gelen kalıntı gerilmeler ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Yapılan alışma sonucu kaynak teknolojisi kullanılan bu malzeme birleştirmesinde bu tür gerilmelerin ortaya çıkabileceği ve çarpılma sorunu yaşanabileceği görülmüştür [5].

Ramos ve Castro yaptıkları çalışmada 10 mm kalınlığında 2 plakanın T köşe kaynağında S355 yapı çeliği ve dolgu malzemesi kullanıldığı varsayılmıştır. Yapının mesh işlemi için kaynak bölgesinden dışarıya doğru temsil eden 3 farklı element tipleri kullanılmıştır. Modelin termo-metalurjik ve termo-mekanik analizler için hesaplama adımları ve zamanları tabloda belirtilmiştir. Beklendiği gibi element sayısı arttıķa çözüm sresinin arttığı gözlemlenmiştir. Analiz 20, 23 ve 26 için aynı modelde 3 farklı element boyutuyla çalışılmıştır. Maksimum kalıntı gerilme 3 model için de aynıdır. Fakat ayrıntılı mukavemet analizleri için küçük ve detaylı element boyutu ile çalışılmalıdır. Distorsiyon analizleri ise bu farklılıklar gözardı edilebilmektedir [6].

Zubairuddin et al., “Thermal analysis of thin P91 steel using FlexPDE and SYSWELD” isimli çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan iki farklı yazılım programı olan SYSWELD ve FlexPDE kullanarak 3 mm P91 saclarının kaynaklarını incelemiştir [7].

Bate et al., “Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD” isimli çalışmasında SYSWELD yazılım kodu içindeki Goldak çift elips ısı kaynağı modelini kullanarak, termal ve mekanik özellikleri incelemiştir [8].

Zubairuddin et al., yaptığı çalışmada yüksek sıcaklık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan petrol ve gaz endüstrileri ile termal enerji santralleri gibi alanlarda sıklıkla karşılaşılan 1.5 mm kalınlığında östenitik paslanmaz çelik 316Ln için lazer kaynak işlemini sonlu elemanlar analizi yöntemiyle çalışan SYSWELD programında analiz etmiştir. Kaynak işleminin temel davranışını incelemek ve sonlu elemanlar analizi yönteminin hesaplamalarını termal döngüler ile doğrulamayı amaçlamıştır [9].

Moslemi et al., “Influence of welding sequences on induced residual stress and distortion in pipes” isimli çalışmasında AISI 316L kalite paslanmaz çeliklerin kaynaklı borularda kaynak sıralarının neden olduğu artık gerilmeler ve çarpılmalar üzerindeki etkileri araştırmak için, dört farklı kaynak sırasını karşılaştırarak SYSWELD yazılımında termal-elastik-plastik yaklaşıma dayalı üç boyutlu (3B) sonlu eleman (FE) modelini kullanmıştır [10].

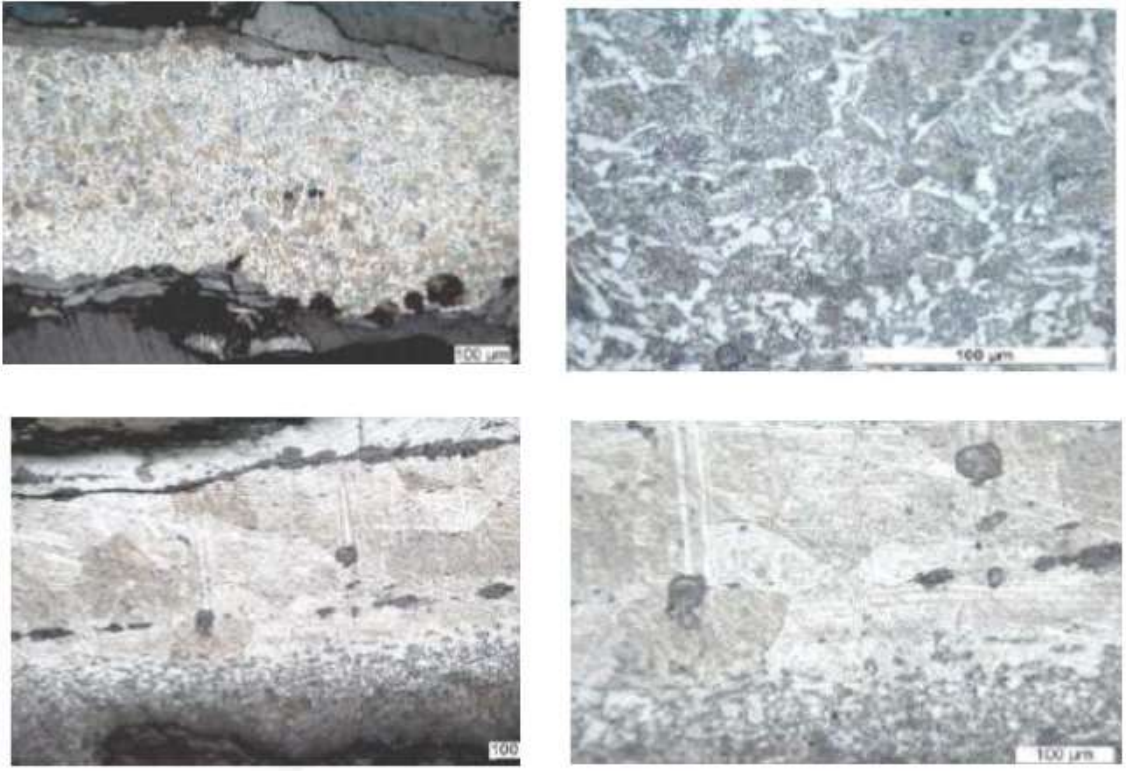
Ferro et al., “Setup of a numerical model for Post Welding Heat Treatment simulation of steel joints” isimli çalışmasında S355 kalite malzemelerin T-birleşimlerinde deformasyonlarını öngörmeyi amaçlayarak SYSWELD yazılımını kullanmıştır. Sayısal sonuçlar deneyseller verilerle tatmin edici bir uyum göstermiştir. Kalan artık gerilmelerin etkilerinin de doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu belirtilmiştir [11].

Literatür taramasında karbon çelikleri ve yapısal çeliklerde gazaltı kaynak yöntemleri, kaynak ağzı tasarımlarıyla ilgili deneysel araştırmalara veya sadece analizlere rastlanılmıştır. Günümüzde çok önemi kritik olan zırh saclarında deneysel çalışmalara ve prototip üretiminde önemli yeri olan sonlu elemanlar analizinin aynı anda farklı tasarımsal parametrelerle davranışların incelenmesi amaçlanmıştır. Zırh saclarında farklı tasarımsal parametrelerin analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ile analiz yönteminin verimliliği ve zırh saclarında tasarım parametrelerinde optimum sonuçlar vermesi tespit edilerek literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

3. ZIRH ÇELİKLERİ

3.1. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi

Roma döneminde kullanılan zırh amaçlı araç gereçlere bakıldığında çoğunun malzemesinin demir ve çelik esaslı olduğu görülmüştür. Çoğunlukla demir ve çelik esaslı bu malzemeler sıcak veya soğuk deformasyon yardımıyla sertleştirilmiştir. Arkeolojik çalışmalar sayesinde bulunan Roma dönemine ait korunma ve saldırma amaçlı kullanılan çeliklerin iç yapısına ait örnekler Şekil 3.1’de verilmiştir [12].



Şekil 3.1. Korunma ve saldırma amaçlı kullanılan çeliklerin iç yapısına ait örnekler [12]

3.2. Zırh Çeliklerinin Üstünlükleri

Günümüzde hızla gelişen silah ve savaş teknolojisiyle birlikte bu unsurlara karşı alınması gereken önlemlerde paralel ölçüde gelişme göstermektedir.

Günümüzde askeri zırhlı personel taşıma araçları, askeri kurtarma araçları, tanklar ve buna benzer zırhlı savunma araçlarında en çok tercih edilen malzeme çeşidi çeliklerdir. Çünkü çelikler zırh malzemesinden beklenen başlıca özelliklerin çoğunu sağlamaktadır.

Kullanılacak olan zırhların yerlerine göre farklı özellikler göstermesi beklenmektedir fakat genel olarak zırh çeliklerinden yüksek balistik özellikler, kaynak sonrası istenilen ana malzeme davranışı, kolay imalat yapılabilirlik ve uzun kullanım ömrü gibi bazı başlıca özellikler beklenmektedir.

Savunma amaçlı geliştirilen zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh malzemelerinden beklenen bir özellik de hafif olmalarıdır. Çünkü hafiflik, zırhın engebeli arazide çok yönlü hareketini ve manevra kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir.

Zırh çeliklerinin farklı çalışma prensibindeki mermilerin hedefte amaçladığı çatlaması, kırılması, parçalara ayrılması gibi durumlara karşı mukavemet göstermesi gerekmektedir.

3.3. Zırh Çeliklerinin Kompozisyonu

Zırh çeliklerinin geliştirilmesinde kompozisyonları çok önemlidir. Zırh çeliklerinden beklenen yüksek balistik özellikler, kaynaklanabilirlik, uzun kullanım ömrü gibi özellikler kompozisyonları ile doğrudan alakalıdır. Buna ek olarak diğer bir kritik özellik olan tokluk ise mermilerin yüksek kinetik enerjilerine karşı çok önemlidir. Genel olarak yüksek tokluk değerlerine sahip olması yüksek kinetik enerjili mermilerin hedefte yaratacağı yıkama karşı iyi olduğu kabul edilmektedir. Isıl işlemlerin ve alaşımlama işlemlerinin tokluk değerlerinde etkisi çok önemlidir.

İmalat; kesim, büküm, kaynak, işleme gibi birçok aşama içerir. Düşük karbon eşdeğeri, düşük hidrojen içeriği, düşük artık gerilim, yüksek süneklik gibi özellikler belirtilen imalat işlemleri için temel gerekliliklerdir. Gelenekselleşmiş zırh çelikleri su verilmiş ve temperlenmiştir.

Zırh malzemesi olarak kullanılan çelikler Amerikan Standardına göre MIL kodu aile sınıflandırılmaktadır ve genellikle düşük karbon (%0,3) yüzdesine sahiptirler. Karbon oranına ek olarak Molibden değeri de önemli bir sınırdır. Hem tane sınırlarından karbür çökelmelerini hem de yapıda tane büyümesini engellemektedir. Zırh çelikleri temelinde alaşımlı çelik sınıfında bulunur ve düşük karbonlu olarak geçer (genellikle %0,30 değerinden az), başlıca elementleri Ni, Cr, Mo ve Mangandır [12].

Tablo 3.1’de ABD Ordu Standartına uygun, zırh çelik kalitelerinin kimyasal bileşimleri verilmiştir [13].

Tablo 3.1. MIL-SPEC'te geçen kimyasal [13]

Element	Yüzde Olarak kimyasal Değeri		
	12560	46100	46177
Karbon	0,180-0,280	0,22-0,32	0,18-0,28
Mangan	1,1-1,6	0,70-1,00	1,10-1,60
Fosfor	Yaklaşık 0,015	Yaklaşık 0,010	Yaklaşık 0,025
Kükürt	Yaklaşık 0,015	Yaklaşık 0,010	Yaklaşık 0,015
Silisyum	0,2-0,4	0,35-0,5	0,2-0,4
Krom	1,2-1,6	0,4-0,7	-
Nikel	2-3,4	0,8-1,3	-
Molibden	0,4-0,55	0,5-0,65	0,4-0,55

Zırh çeliklerini ve yüksek kinetik enerjili mermilerin çarpma etkilerini düşündüğümüzde zırh çeliklerinin etkili bir koruma sağlaması için mukavemet ve yüksek sertliği sahip olması gerekmektedir. Daha sonra hedefte oluşan yıkımın olumsuz etkileri içinde zırh çeliğinin tokluk özelliğinin yüksek olması gerekmektedir. Yani zırh çeliklerinde yüksek mukavemet, sertlik ve tersinir özellik olan tokluk aynı anda istenmektedir. Uygun kimyasal kompozisyon ve ısıt işlemlerle bu özellikler elde edilmektedir. MIL-A-12560 haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA) ve yüksek mukavemetli (HHA) MIL-A-46100 olarak bilinmektedir. Zırh çeliklerini sınıflarına ayırdığımızda class I ve class II olarak görebiliriz. Bu sınıflara ait çelikler farklı kompozisyonlara, farklı ısıt işlem basamaklarına, farklı matrislere, farklı mukavemet, farklı sertlik değerleri ve -40 °C'de farklı tokluk değerlerine sahiptirler. Tablo 3.2.'de verilen farklı ısıt işlem ve kompozisyon kombinasyonlarıyla amacına en uygun zırh çeliği üretilmektedir [13].

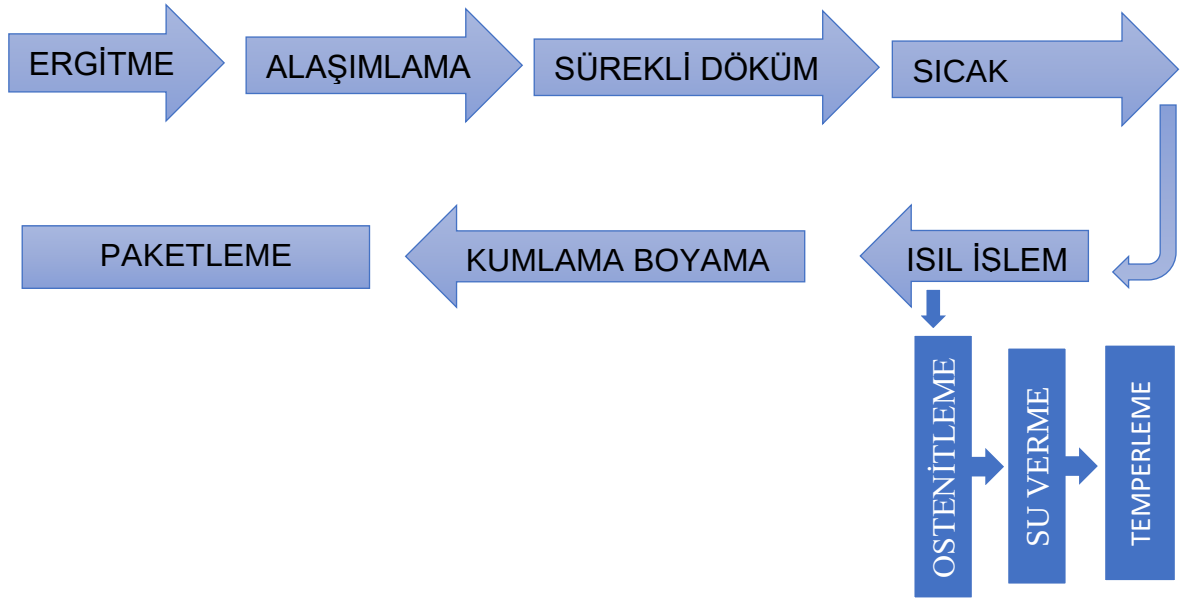
Tablo 3.2. Levha kalınlıklarına bağlı olarak üretilen zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [13]

Zırh Çeliği		Kalınlık (mm)	Sertlik (HB)	Darbe Enerjisi (-40 °C, J)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
Kalite	Sınıf						
MIL-A-12560	Class 1	3 < 20	380-430	Min. 18	Min. 950	1100-1400	Min.9,0
		40-80	300-350	Min. 30	Min. 850	900-1200	Min. 11,0
	Class 2	3.0-150	280-330	Min. 40	Min. 800	850-1150	Min. 12,0
MIL-A-46100	Class 1	3,0-150	480-540	Min. 16	Min. 1200	1400-1800	Min. 8,0
	Class 2	3-50	420-480	Min. 27	Min. 1100	1200-1600	Min. 9,0

Zırh çelikleri için diğer bir önemli konu ise ağır veya hafif araçlarda zorlu engebeli ortamlardaki hareketleridir. Kaynak bölgelerinde özellikle zırh çeliklerinde gerilemeli

korozyon problemi ortaya çıkabiliyor. Özellikle korozif ortamlarda eklendiğinde korozyon daha fazla tetiklenir. İmalatta her geçen gün artan teknolojik gelişmeler ile beraber termomekanik işlemler ve kontrollü haddeleme ile metalurjik özellikleri geliştirilmektedir.

Zırh çeliklerinin standartlarında tanımlanan kimyasal kompozisyonlara uygun şekilde ingotlar haline getirilir ve akabinde döküm sonrası haddeleme işlemi yapılır ve talep edilen kalınlıkta plakalar şeklinde üretimi tamamlanmaktadır. Eğer sıcak haddeleme işlemi uygulanırsa (RHA) haddelenmiş zırh çeliği adı verilmektedir. Eğer haddeleme işlemi uygulanmaz ise (HHA) yüksek sertlikte zırh çeliği olarak adlandırılmaktadır. Bahsedilen Her iki zırh çeliği için Şekil 3.2 de gösterilen ısıt işlemler uygulanır ve martenzitik iç yapı ve istenen sertlik, tokluk ve mekanik değerleri sağlanmaktadır [14].



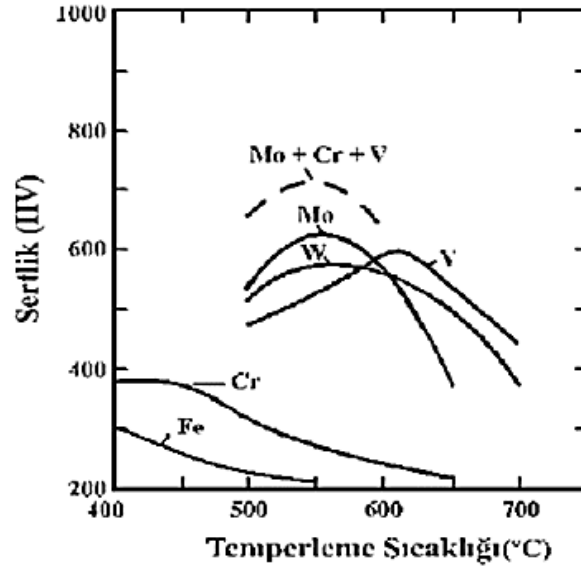
Şekil 3.2. Zırh çeliklerinin üretim aşaması [14]

3.4. Zırh Çeliklerinde Isıl İşlem

Genel olarak çeliklerde istenen spesifik özellikler istenilen değerlerde olması için malzemeye ısıtma ve soğutma gibi işlemler uygulanmaktadır.

Temperleme işlemlerinde özellikle yalın karbonlu çeliklerde su verme işleminden sonra martenzit yapısı içinde bulunan karbon ve demir ile birleşerek sementit (Fe_3C) çökmesini meydana getirmektedir. Bu süreçte martenzit ferrite dönüşmekte ve sertlik düşmektedir. Fakat çeliğin içinde bulunan Karbür oluşturmalar yüksek temperleme sıcaklarında karbon ile birleşerek özel karbür çökmesini sağlamaktadırlar. Bu işlemlerden sonra oluşan sertlik ikincil sertlik olarak adlandırılmaktadır. Bu karmaşık çözelti sertleşmesi özgün sertlik artışına sebep olmaktadır. Şekil 3.3 farklı karbürleyici elementlerin sayesinde

oluşan karbürlerin temperleme karakteristikleridir. Molibden krom ve vanadyum elementlerinin çelik üzerinde yüksek temperleme sıcaklığında meydana getirdiği bu özgül sertlik artışı karmaşık bir çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla oluşmaktadır. Şekil 3.3'te değişik karbürleyici elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 3.3. Karbürleyici elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri [15]

Görüldüğü gibi molibden, krom ve vanadyum barındıran çeliklerde yüksek temperleme sıcaklıklarında meydana gelen karbürler ile sertliği arttırmaktadır. Bu diyagram görüldüğü üzere krom ve molibdenin alaşım elementi olarak seçilmesini açıklamaktadır [15].

Zırh çeliklerinde temperleme için östenitleştirme işlemi 900-950 C° de gerçekleştirilmektedir. İkincil sertliği sağlayan sıcaklık ise 600 C° civarındadır. Karbür oluşumlarının anlaşılması ısıtma işlem prosedürü için çok önemlidir.

Zırh çeliklerinde merminin hedefte yaratacağı darbeye karşı direnci için temperleme mekanizmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir.

3.5. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

Kaynak işlemi sırasında aşırı ısı girdisi olması sebebiyle bir ısıtma işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Kaynak işlemi sırasında aşırı girdisi, kaynak dikişi tipi, kaynak parametreleri gibi bazı değerlerin büyük olması işlem sonrasında malzemede iç gerilmelerin ve çarpılmaların çok yüksek değerlerine ulaşmasına neden olabilmektedir. Ön ısıtma olarak

bahsettiğimiz kaynak öncesi malzemelerin belirli bir değere kadar ısıtılması sıcaklık dağılımını yumuşatmak ve dikişteki soğuma hızını yavaşlatarak iç gerilmeleri ve çarpılmaları bir miktar önleyebilmektedir. Kaynak dikişindeki ve ısıdan etkilenen bölgedeki sıcaklıkları martenzit sınırına inmesini geciktirmekte ve perlit, ferrit ve beynit dönüşümlerini gerçekleştirmesine zaman tanıyarak martenzit oluşumunu azaltmaktadır.

Zırh çelikleri kullanıldıkları alanlara göre özelleştirilmiş ve buna uygun şekilde ısıtılma işlemlere tabi tutulmaktadır. Homojen ve homojen olmayan zırh çelikleri başlıkları altında görevleri itibariyle iki farklı ısıtılma işlemi uygulanmaktadır. Kinetik enerjisi olmayan mermilerin darbe etkisi sebebiyle Homojen zırh çelikleri bütün olarak ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır. 25 mmlik et kalınlığına sahip bir homojen zırh çeliğinde 321 ile 375 HBW sertlik olması beklenmektedir [16]. Homojen olmayan zırh çelikleri için ise kinetik enerjisi yüksek mermilerin hedefte yaratacağı delim etkisine karşı yüzeyleri sertleştirme işlemi uygulanmaktadır. 25 mmlik et kalınlığına sahip bir homojen olmayan zırh çeliğinde 477 ila 534 HBW sertlik olması beklenmektedir [17].

Homojen olmayan zırh çelikleri yüzeylerinde ekstra sertliği sahip oldukları için kaynak işlemlerinde fazladan dikkat istemektedir. Aynı zamanda kaynak yapıldıktan sonra da sert yüzeylerin aynı özelliğini koruması ve kaynak sebebiyle bu özelliklerini kaybetmemesi beklenmektedir.

Tablo 3.3. Zırhlı çeliklerde imalat işlemleri doğrultusunda beklenen örnekler [14]

	İmalat İşlemleri			
	<i>Isıl kesme</i>	<i>Kaynak</i>	<i>Talaşlı İşlem</i>	<i>Şekillendirme</i>
Gerekli Metalurjik Özellikler	-düşük karbon eşdeğeri -sınırlı segregasyon	-düşük karbon eşdeğeri -düşük hidrojen miktarı	-yüksek olmayan sertlik	-yüksek süneklik
	-çok düşük hidrojen miktarı	-düşük kalıntı gerilmeleri		

3.5.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri

Zırh çelikleri, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik sınıfına girmektedir. Sahip olduğu yüksek mekanik özellikler düşük alaşım ve ısıtılma işlemleri ile verilse de karbon içeriği sertlik açısından çok önemlidir. Çatlama ve sertleşme eğiliminin yüksek olması sebebiyle et kalınlığı yüksek malzemelerde ısıtılma işlemi gerek duyulmaktadır. Kaynak işlemlerinde ön

ısıtma, pasolar arası sıcaklık ve kontrollü soğuma işlemlerini kaynağın ısıtma işlem başlığı altında incelenebilmektedir.

3.5.2. Malzeme kalınlığı

Karbon değerine ek olarak zırh çeliklerinde kullanıldıkları alanlar sebebiyle diğer kalite çeliklere göre et kalınlığı olarak kalın kesit kalınlıklarında üretilmektedir. Kesit kalınlığı arttıkça ön ısıtma aşaması önem kazanmaktadır. Ön ısıtma işlemi kaynak dikişinde ve ısıdan etkilenen bölgede sıcaklık dağılımını eşit hale getirerek genişlemesini ve dikişin yavaş soğumasını sağlayarak iç gerilmeleri ve çarpılmayı ciddi önlemlerle azalmasına yardımcı olmaktadır. Kaynak havuzuna giren ve eğer çıkmaz ise daha sonra çatlağa sebep olacak hidrojenlerin ön ısıtma sayesinde katılaşma olmadan havuzdan atılmasını sağlamakta ve hidrojen çatlağı riskini azaltmaktadır.

3.5.3. Armox 500 T kaynak kabiliyeti

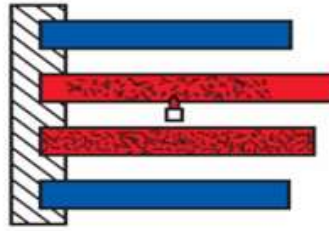
ArmoX 500 T zırh çeliklerinde günümüzde balistik amaçla zırhlı kara araçlarında çokça kullanılan İsveç Menşei SSAB firması tarafından üretilen Armox serisine ait zırh çeliklerindendir. Hem yüksek mekanik özellikler hem de bulunabilirlik açısından günümüz savunma sanayinde tercih sebebidir. Aynı zamanda düşük karbon eşdeğeri sayesinde kaynaklanabilirlik açısından avantaj sağlamaktadırlar. Kaynak işlemi sırasında ana malzemedeki yüksek mekanik özelliklerin kaybedilmemesi açısından kaynak işlemi sırasında sıcaklıklar sınırlı tutulmak zorundadır.

4. KAYNAKLI İMALAT SONRASI OLUŞAN ÇARPILMALAR VE KALINTI GERİLMELER

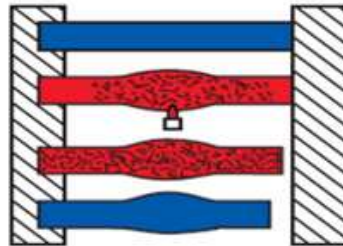
Kaynaklı imalat yöntemlerinde en büyük parametrelerden olan ısı girdisi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan kalıntı gerilmeler ve parçalarda meydana gelen çarpılmalar. Aynı yapı bileşenleri ve aynı yapıda bile kaynak bölgesinin genişliği ve özgül ısı girdisine bağlı olarak çarpılma miktarları değişkenlik göstermektedir. Ancak bir yapıda sadece elastik değişime izin verilmektedir.

4.1. Kaynak Sonrası Kalıntı Gerilmeler

Kaynaklı bir parçada tüm yükler (fiktür, mengene vb.) kaldırıldıktan sonra parça içinde kalan gerilmelere kalıntı gerilme denmektedir. Sabit olmayan sıcaklık değişimi etkisinde kalan bir parçada oluşan gerilmelere ısıl gerilmeler denmektedir. Kaynak işleminde malzemenin bir bölümü kaynak havuzu olarak adlandırılan bölge çok kısa süreler içinde erime noktasından çok daha yüksek sıcaklara erişmektedir. Soğuma işlemi ise aynı hızda gerçekleşmez ve daha fazla zaman almaktadır. Çok yüksek sıcaklıklara kısa süre içinde çıkılması ve akabinde gerçekleşen yavaş soğuma sonrası oluşan bu farklılıklar malzemelerde çarpılma ve kalıntı gerilmelere sebep olmaktadır [18].



Şekil 4.1. Isıtılan çubuklarda serbest genişleme [18]

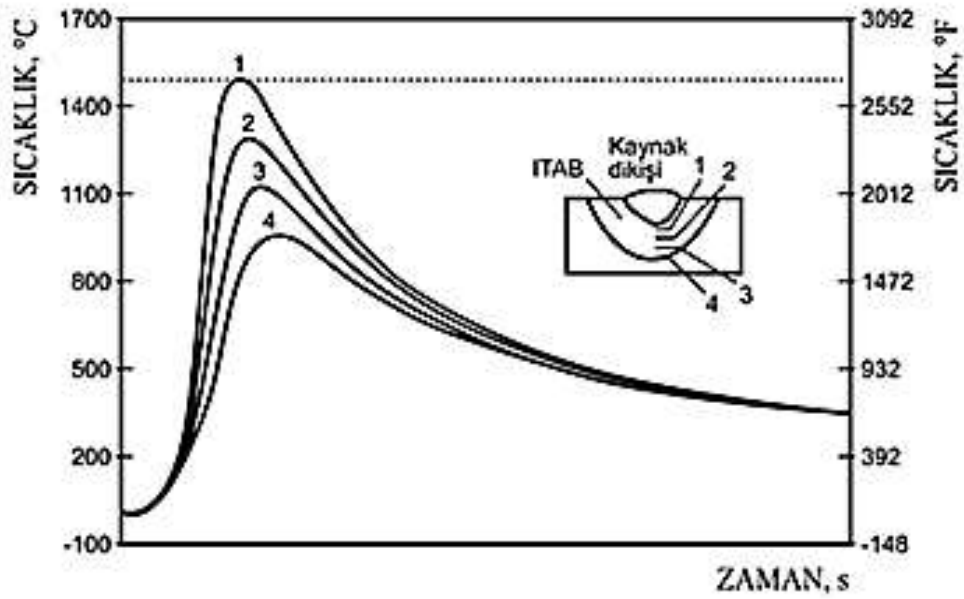


Şekil 4.2. Isıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genişleme [18]

Şekil 4.1, ısıtılan çubuklarda serbest genişlemede hareketi sınırlandırılmamış ısı verilen çubuklar serbest şekilde genişlemekte ve büzülmemektedir.

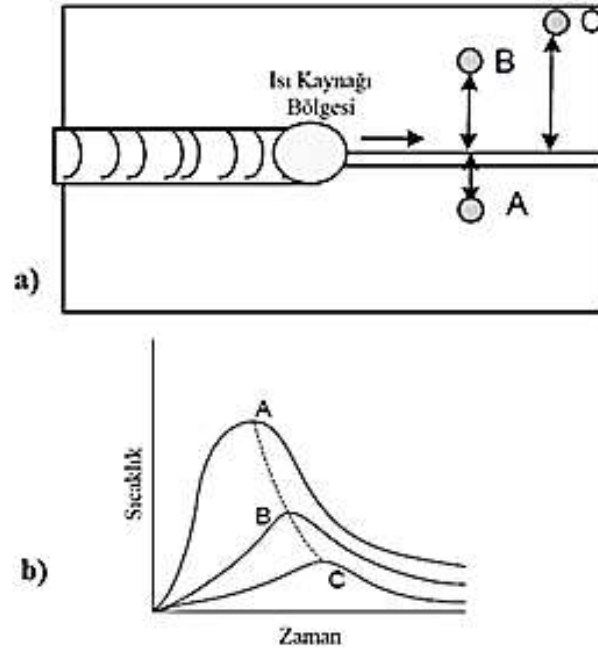
Şekil 4.2, ısıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genişlemede çubuklar bir eksenel yönde sınırlandırılmıştır ve ısı verilmiştir. Serbest şekilde genişlemeyen parçalar ısıнын etkisi geçtikten sonra da deformasyon halinde kalmıştır.

Çeliklerin kaynağında HAZ bölgesinde kaynak sonrası heterojen mikroyapı oluşur. Kaynak dikişinden uzaklaştıkça ulaşılan en yüksek sıcaklık değeri düşmektedir. Şekil 4.1’de ve 4.2’de görüleceği gibi kaynak dikişinden başlayan ve git gide uzaklaşan 4 noktanın termal çevrimi gösterilmiştir. Termal çevrim eğrisi ITAB sıcaklığın zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Kaynak bölgesinde maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklıkta kalma süresi ve soğumanın hızı çok önemlidir.



Şekil 4.3. Az karbonlu alaşımsız çelik levha üzerine dikiş çekildiğinde ITAB noktalarının termal çevrimi [19]

Kaynak işleminde sıcaklık en yüksek noktasına ulaştığında metalin yumuşamasının sebep olduğu basma gerilimi azalmakta ve yüzeye doğru sıfıra varmaktadır. Aynı zamanda parçanın soğuması devam ederken çekme gerilimi büyüklüğü artmaktadır. Parçaların sıcaklık dağılımı Şekil 4.4’te gösterilmiştir [19].

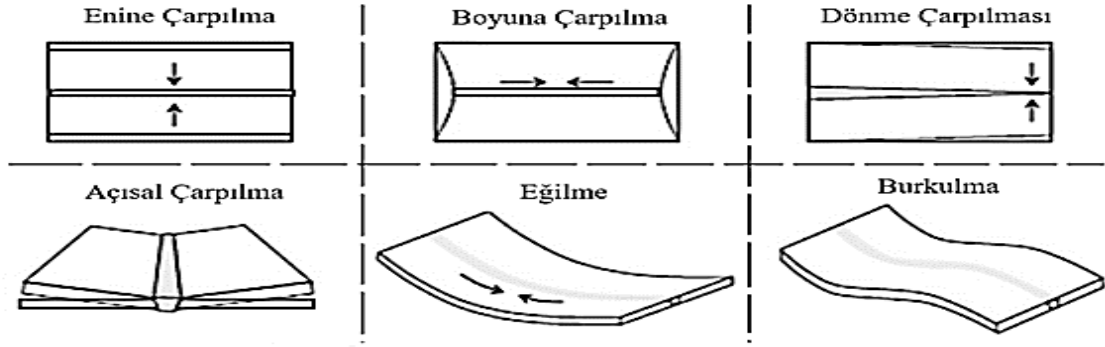


Şekil 4.4. Kaynak prosesinde sıcaklık dağılımı (a) A,B,C parçaların konumları (b) A,B,C zamana bağlı sıcaklık değişimi [19]

4.2. Çarpılma Tipleri

Kaynak yöntemiyle imal edilecek parçalarda kaynak paso sırası, kaynak dikişi konumu, konstrüksiyonun yapısı, kaynak ağzı gibi birçok parametreye dikkat edilmelidir. Kaynaklı yapılarda çarpılmalar Şekil 4.5'te şekilde gösterilmiştir.

- Enine Çarpılmalar
- Boyuna Çarpılmalar
- Dönme çarpılmalar
- Açısal Çarpılmalar
- Eğilme (Bombe oluşumu)
- Burkulmalar



Şekil 4.5. Kaynaklı birleştirmelerde meydana gelen temel çarpılmalar [20]

Kaynaklı yapılarda oluşan çarpılmaların giderilmesi çok fazla maliyete sebep olmaktadır. Bu sebeple çarpılmaların kaynak öncesinde ve kaynak esnasında alınacak önlemler ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu önlemler kaynak bölgesinde meydana gelen gerilmelerin plastik değişime uğramasına engelleme prensibiyle çalışmaktadır. Bu sebeple büzülmeyi meydana getiren parametreler iyi anlaşılmalıdır. Bu parametrelerin uygunsuzluğu çarpılma ile doğru orantılıdır. Bu parametreler iyi anlaşılmalı ve büyük maliyetlere yol açmadan kaynak sırasında veya öncesinde alınacak önlemler uygulanmalıdır.

4.3. Kaynak Sayısı ve Sırasının Çarpılmaya Etkisi

Kaynak işleminde paso sayısı ve sırası ana metale giren ısı girdisi sebebiyle büyük önem taşımaktadır. Özellikle kalın plakaları kaynatmak için çok sayıda pasolar her paso sonrası çarpılma miktarını artırır. Fazla paso kullanılan imalatlarda genellikle ilk pasolar daha sonra atılacak pasoların kuvvetlerine direnç oluşturabilmektedir. Bu sebeple kaynak işlemlerinde pasoların sayısı ve özellikle kaynak ağzı tasarımları çarpılmalar üzerinde çok etkilidir. Kaynak ağzı tasarımlarında kaynak ağzı genişliğini azaltmak, U veya X kaynak ağzı tasarımı tercih edilmesi çarpılmayı azaltabilmektedir.

4.4. Çarpılmaların Engellenmesi

Farklı imalat yöntemleri, imalatta kullanılan parametreler ve imalat sonrası yöntemler ile kaynak esnasında oluşan çarpılmaların önüne geçilebilir ve çarpılmalar kontrol altına alınabilmektedir. Kaynak esnasında kullanılan fiksürler, kaynak yöntemi ve kaynak sırası çarpılmalara doğrudan etki eden en önemli faktörlerdir. Çarpılmayı düzeltmek için kaynak sonrası ısıtma işlemleri yöntemleri kullanılabilir fakat bu yöntemler kaynak esnasında alınan önemlere göre hem daha fazla zaman kaybı hem de daha fazla maddi kayıptır. Kaynak fiksürleri kullanılan yöntemlerden biridir.

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

1950'li yıllarda havacılık sektöründe kullanılmaya başlanan sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak Boeing, Bell Aerospace gibi firmalar tarafından kullanılmıştır. Bu tekniğin temel fikrini geliştiren ilk çalışma Turner ve arkadaşları tarafından 1956 yılında yayımlanmıştır [21]. Sonlu elemanlar yöntemi mekanik problemlerin çözümüne uygun sayısal bir yöntemdir.

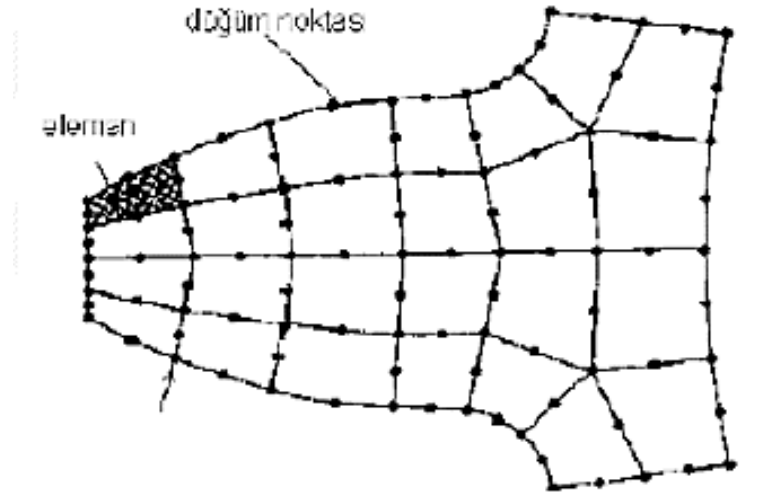
5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Çalışma Prensipleri

Yöntem, fiziksel sistemin matematiksel bir temsiliyi sağlayan sonlu elemanlar analizi (FEA) ile başlamaktadır. Öte yandan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), karmaşık bir problemi daha küçük problemlere bölerek ve her problemi ayrı ayrı çözerek tüm sistemi çözebilmektedir [22].

Sonlu elemanlar yöntemi, çözüm bölgesini birbirine bağlı ve çok sayıda sonlu elemandan oluşan bir yapı olarak modellemektedir. Bu yöntemde, her bir sonlu elemanda teorilere dayalı olarak sınır koşulları ve denge denklemleri tanımlanarak, çözüme yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir.

Yöntemin genel ilerleme basamakları aşağıdaki gibidir. Uygun analiz tipi belirlenir, model oluşturulur, modele gerekli malzeme bilgisi aktarılmakta, örgü (mesh) yapısı uygulanmakta, problemin sınır şartları tanımlanır, problem çözülür ve sonuçlar değerlendirilmektedir [23].

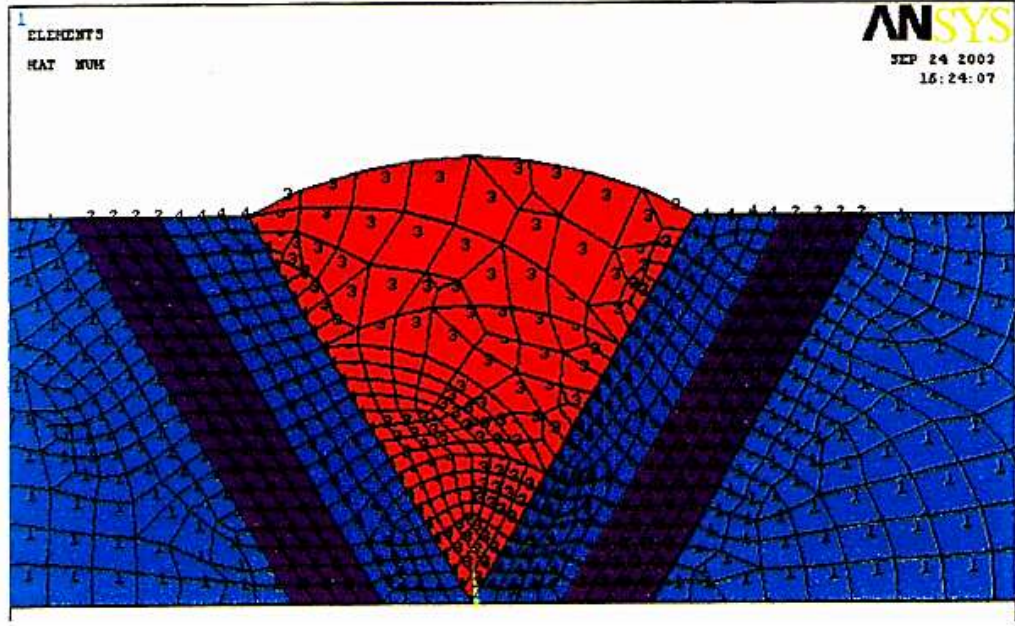
Sonlu elemanlar yönteminde modelin yapılabilmesi için öncelikle katı modelinin oluşturulması gerekmektedir. Daha sonra Şekil 5.1'de görüldüğü gibi düğüm noktaları ile çözüm ağı oluşturulmaktadır [24].



Şekil 5.1. Modelde düğüm noktası ve eleman gösterimi [24]

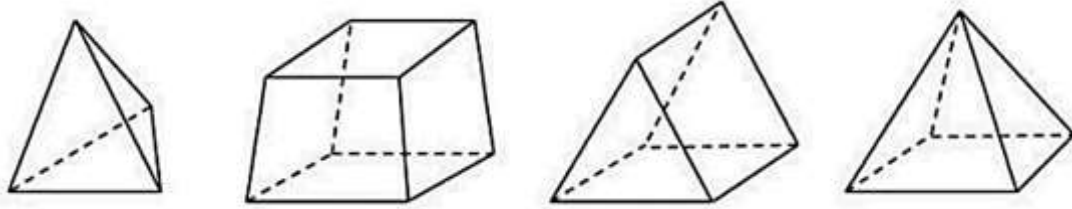
5.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Parçaların çözülebilmesi için öncelikle modelleme gerekmektedir. Parçaların modelleri programların içinde düğüm noktaları ile oluşturulabilir veya parçalar başka katı model programlarında modellendikten sonra uygun formatlar ile programların içine alınabilmektedir. Katı model oluşturulduktan sonra parçaların geometrik şekillerine göre elemanlar seçilmelidir. Uygun geometrik yapıya göre elemanlar seçildikten sonra parçalar çözüm ağı olarak çözülebilir elementlere ayrılmaktadır [25]. Modellerin elemanlara ayrılması Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Daha sonra program kütüphanesinden uygun malzeme tanımlanmaktadır. Programın çalışabilmesi için uygun sınır koşulları ve gerekli parametreler tanımlanmakta ve program çalıştırılmaktadır.



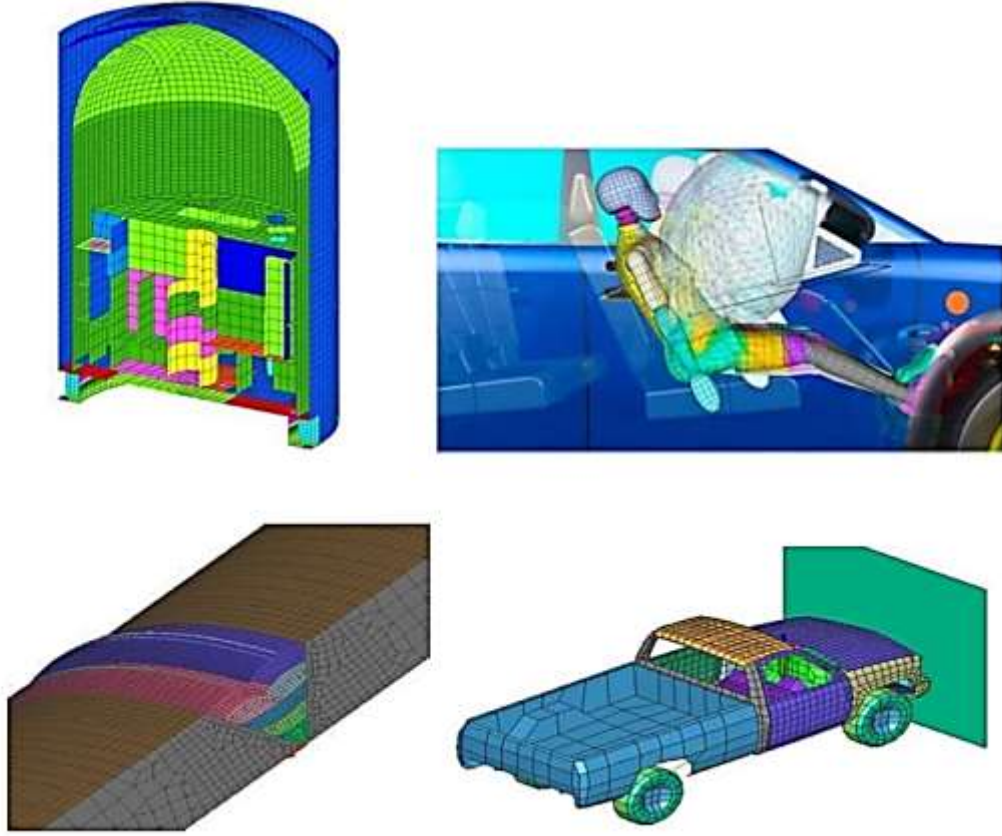
Şekil 5.2. Modelin elemanlara ayrılması [25]

Sonlu elemanlar ağı yapılırken kullanılan 4 farklı 3D eleman tipi vardır. Bu çeşitler; dörtyüzlü (tetrahedral), altıyüzlü (hexahedral), beşyüzlü (pentahedral) ve piramittir.



Şekil 5.3. Kullanılan eleman tipleri [26]

Şekil 5.3'te gösterilen eleman tipleri bir 3D modeli sonlu elemanlarına ayırmak amacıyla çeşitli kombinasyonlar ile kullanılmaktadır. Şekil 5.4'te verilen sistem modelleri Sonlu elemanlar yönteminin ne denli geniş olduğu ve çok çeşitli amaçlarla farklı sektörlerde de kullanıldığı hakkında fikir vermektedir [26].



Şekil 5.4. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı alanlar [27]

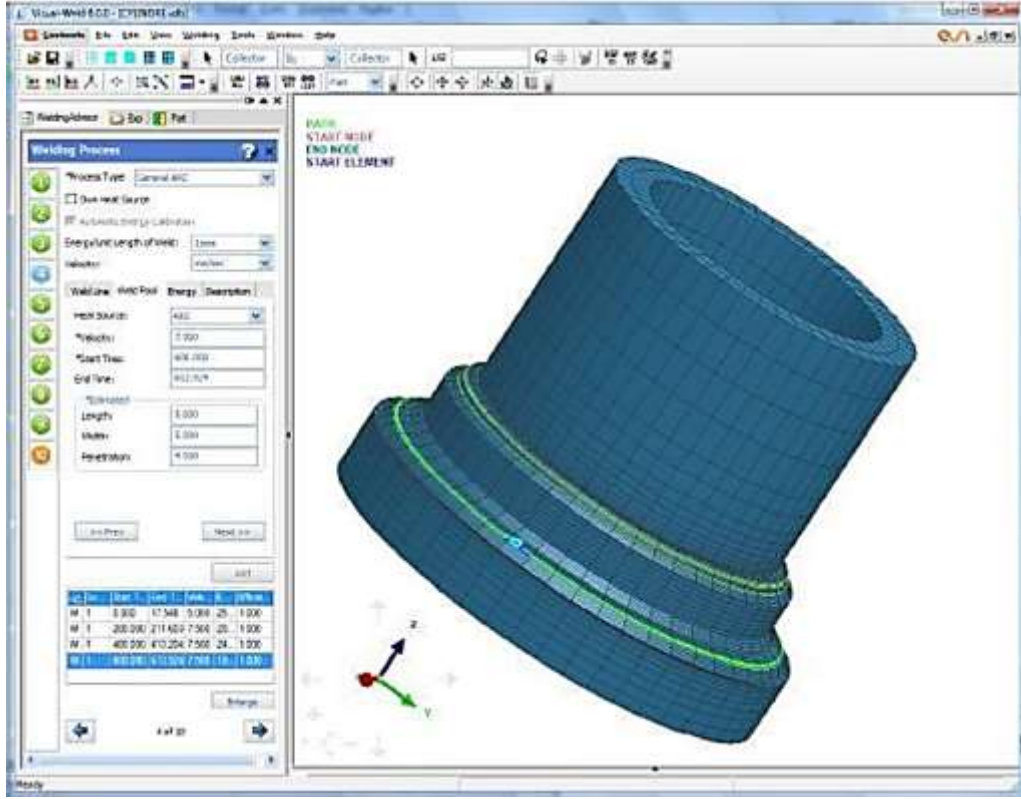
5.3. Sysweld Programı

Sysweld, malzeme davranışının, tasarımının ve prosesinin tüm yönlerini dikkate alarak Isıl işlem, kaynak ve montaj süreçlerinde simülasyon için önde gelen bir yazılım çözümüdür. Kaynak mühendisleri, süreç türünü ve süreç parametrelerini tam olarak optimize ederek parçanın şekli ve sonuçta meydana gelen malzeme davranışının etkilerini anlamak için çarpılma artık gerilimler, plastik gerinimler, faz dönüşümleri arasında optimumu bulmaya çalışmaktadırlar. Sysweld, sonlu elemanlar metoduna dayanan termal ve mekanik olayları tam olarak hesaplayacak şekilde tasarlanmıştır.

Yazılım kaynak simülasyonlarının verimli bir şekilde kurulmasını kolaylaştırmak için kullanımı kolay bir arayüz sunmaktadır.

Bu ara yüz ile malzeme veri tabanından malzeme bilgisi, ısı kaynağı veri tabanından gelen ısı kaynağı bilgisi, sınır koşulları ve termal yükler tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamalar daha sonra SYSWELD çözücüsü (solver) tarafından otomatik olarak yorumlanabilen girdi kartları şeklinde birleştirilmektedir.

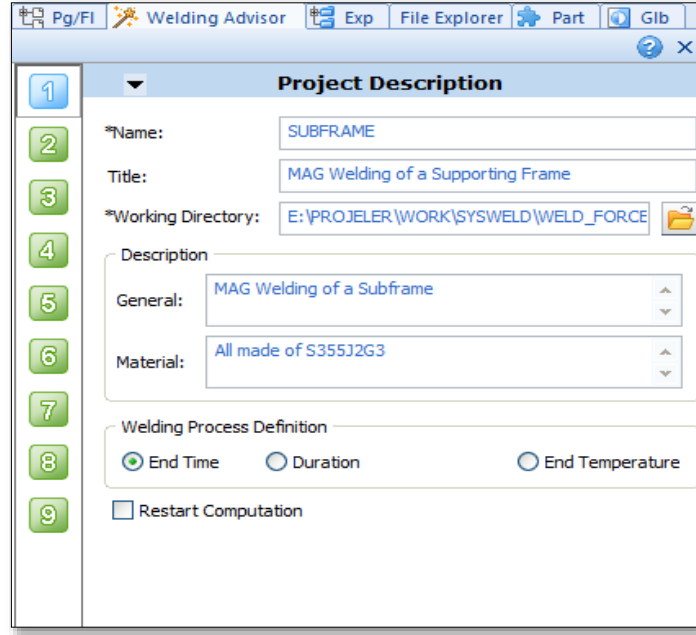
Bir kaynak prosesinde meydana gelen tüm mekanik olaylar doğru bir şekilde simüle edilebilir.



Şekil 5.5. SYSWELD (Visual-Weld) ara yüzü

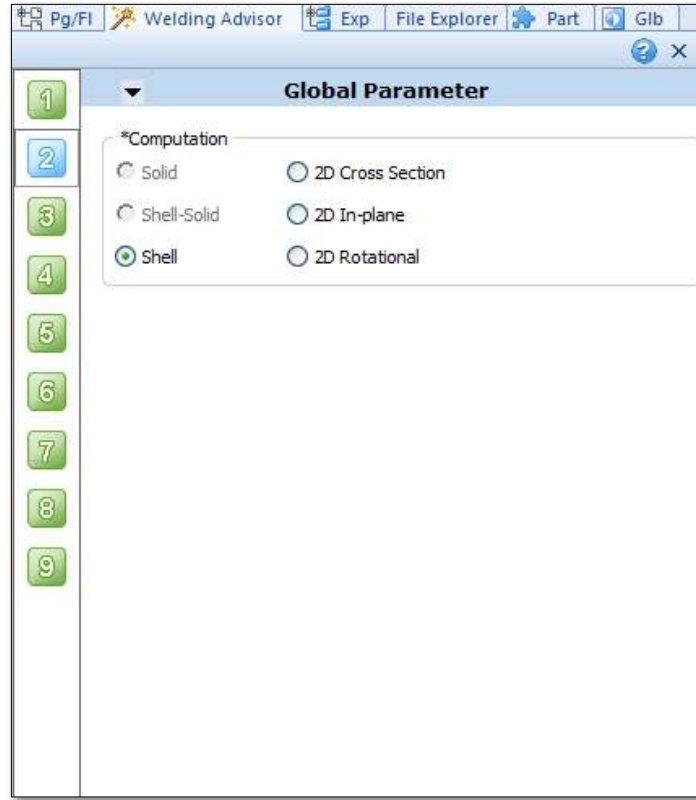
5.4. SYSWELD Programının Girdi Adımları

Girdi kartları, malzeme özelliklerinin, kısıtlamaların ve yüklerin tanımını ve çözücü için komut sırası içermektedir. Parçaların mesh işlemi tamamlandıktan sonra programın çalışması için 9 adımdan oluşan girdi basamaklarının tamamlanması gerekmektedir. İlk adım olarak dosyanın Şekil 5.6'da görüldüğü gibi bilgisayardaki konumu ve dosyanın adı gibi bilgileri tanımlıyoruz.



Şekil 5.6. Girdi basamakları 1. adım

Girdi basamakları 2. adımda ise Şekil 5.7’de görüleceği gibi modelimizin format modelini seçiyoruz, modelimiz 3D katı model olduğu için solid kısmı seçilmektedir.



Şekil 5.7. Girdi basamakları 2. adım.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi 3. Basamakta malzemeler hakkında gereken bilgileri tanımlamaktayız. Kaynaklanan malzemelerin ve ilave telin malzeme bilgileri yazılım içinde kayıtlı olan malzeme kütüphanesinden seçilmektedir. Her bir paso için ve kaynaklanan ana malzemeler için malzeme bilgileri bu adımda tanımlanmıştır.

Component Properties

Material

*Database: Public

*Class: All

☒ Components ☐ Joints with Filler

☐ Machining

Assign

*Material: AlMgMn-Wire-AlMgMn

*Thickness:

☐ Get thickness value(s) from Part Manager

Component/Joint	Material	Thickness
B1	S355J2G3	3.000
B2	S355J2G3	3.000
B3	S355J2G3	3.000
B4	S355J2G3	3.000
LCB_L	S355J2G3	2.200
LCB_R	S355J2G3	2.200

☐ Component Activation Sequence

Şekil 5.8. Girdi basamakları 3. adım

Girdi basamakları 4. Adımda Şekil 5.9’da görüleceği üzere kaynak işlemi ile ilgili parametreler tanımlanmaktadır. Kaynak yöntemi, her bir paso için ayrı takip edeceği yol, başlangıç ve bitiş noktaları, dolgu malzemesi, pasoların atılma sırası, kaynak işlemi sırasında ısı girdisi ve kaynak havuzu bilgileri tanımlanmıştır.

Welding Process

*Process Type: General ARC

Select heat source file

Energy/unit Length of Weld: J/mm

Velocity: mm/sec

☒ Automatic Energy Calibration

☐ Variable Velocity and Power

Weld Line Weld Pool Energy

*Weld Line

Filler Material

*Welding Group

Reference Line

*Start Node

*End Node

*Start Element

Next >>

Delete Add

Join	Source	Initial Time	End Time	Velocity	EPUL	Efficiency
J0...	1	0.000	7.506	20.001	400....	1.000
J0...	1	9.510	17.101	20.001	400....	1.000
J0...	1	19.100	26.606	20.001	400....	1.000
J0...	1	28.600	36.191	20.000	400....	1.000
J0...	1	39.190	46.955	20.001	400....	1.000
J0...	1	47.960	55.494	19.999	400....	1.000
J0...	1	57.490	65.255	20.001	400....	1.000
J0...	1	67.280	74.814	19.999	400....	1.000
J0...	1	76.790	90.694	20.001	400....	1.000

4 of 9

Şekil 5.9. Girdi basamakları 4. adım

Girdi basamakları 5. adımda Şekil 5.10'da görüleceği üzere soğuma koşulları tanımlanmaktadır. Deney parçaları da kaynak işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır ve soğuma işlemi gerçekleştikten sonra ölçümleri tamamlanmıştır. Bu sebeple bu basamakta kaynak işlemi ve soğuma süresinde geçen vakit hesaplanmıştır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı verileri tanımlanmıştır.

Windows taskbar: Pg/Fl, Welding Advisor, Exp, File Explorer, Part, Glb

Cooling Condition

Definition

*Collector

*Medium: Free Air Cooling

*Ambient Temp.: 20.000

Buttons: Delete, Add

Collector	Temperature	Function
SHELL_AIR_HEA...	20.000	SHELL_AIR_HEA...

Buttons: Enlarge

Cooling Condition

*Cooling

Name:

*Initial Time:

*End Time:

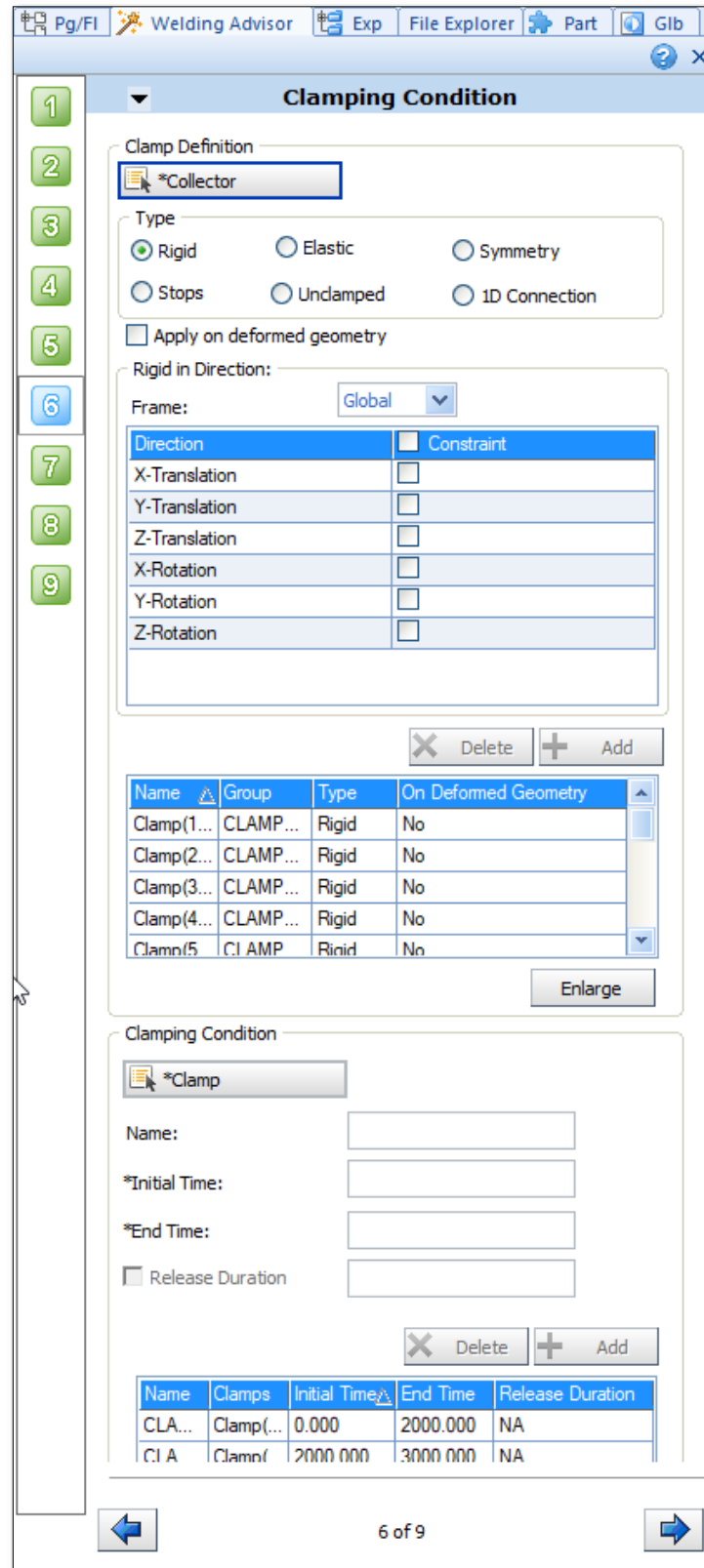
Buttons: Delete, Add

Name	Coolings	Initial Time	End Time
COOLING_...	Cooling_SHE...	0.000	3000.000

Buttons: Enlarge

Şekil 5.10. Girdi basamakları 5. adım

Girdi basamakları 6. adımda Şekil 5.11’de görüleceği üzere parçaların sabitleme koordinatları ve adetlerinin tanımlandığı alandır. Bu adımda parçaların hangi düzlemlerde ve hangi noktalardan sabitlendiği verileri tanımlanmaktadır.



Şekil 5.11. Girdi basamakları 6. adım

Girdi basamakları 7. ve 8. adımlarında parçalara etki eden yer çekimi ve etki eden yüklerin tanımlandığı adımlardır. Kaynak esnasında ve sonrasında parçalara yük uygulanmadığı için bu adımda sadece yer çekimi kuvveti tanımlanmıştır.

Loads and Deformations

Function DB:

Definition

Load Type:

Select:

Displacement(U):

f(time):

g(position, time):

☐ Local reference frame

Group	Load Type	(x y z)	fFunc	gFunc
FORCE_C...	Force	0.000, 0.0...	NewCurve1	None

Hint: load=value.f(t).g(X,t)

Loading Condition

Name:

*Initial Time:

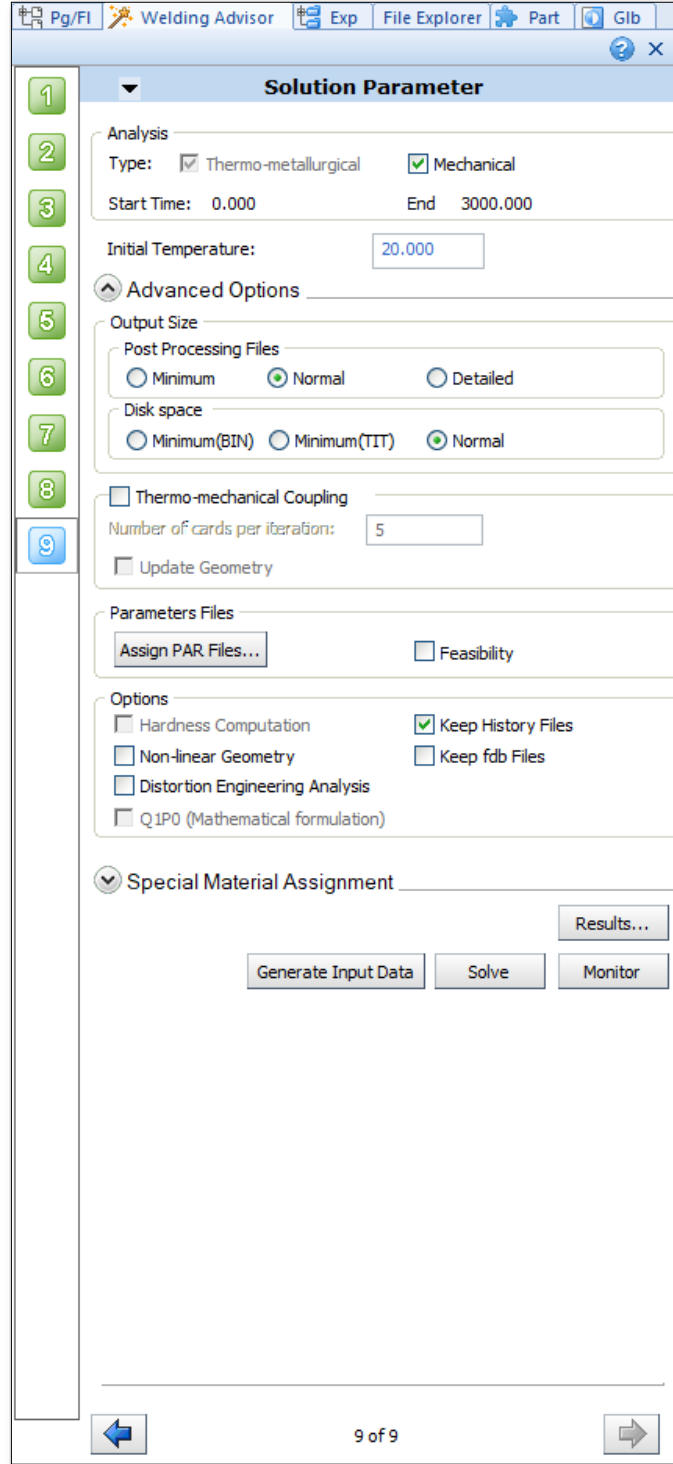
*End Time:

Name	Loads	Initial Time	End Time
LOAD_CON...	FORCE_CLA...	1000.000	1001.000

7 of 9

Şekil 5.12. Girdi basamakları 7. adım

Girdi basamakları 9. son adımında çözüm parametreleri tanımlanmaktadır. Şekil 5.12 de görüleceği gibi mekanik çözümler ve diğer parametreler tanımlandıktan sonra çözüm işlemi başlatılmıştır.



Şekil 5.13. Girdi basamakları 9. adım

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar

Bu çalışmada kullanılan parçalar alın kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş ve gaz altı ark kaynak yöntemi kullanılmıştır. Bu kaynak işleminde Miller XMT 450 serisi Gaz altı ark kaynak makinası kullanılmıştır. Kaynaklarda kullanılan kaynak makinesinin fotoğrafı Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. Kaynak makinesi

Tablo 6.1. Miller XMT450 technical data (“Anonymous 7”, n.d.)

Özellikler	Değer
Giriş Gücü	230/460-575 V
Çıkış Gücü	15–600 A
CV Konumunda Voltaj	10-38 V
CC Konumunda Akım	5-600 A
Açık Devre Gerilimi	95 VDC
Ağırlık	55,3 kg

Kaynak işlemi sonrası parçalara, ilerleyen teknoloji ile birlikte paralel olarak gelişen ölçüm tekniklerinden olan 3 boyutlu tarama yapılmıştır. Tarama için BMC Otomotiv San. ve Tic. A.Ş. firması Sakarya Arifiye yerleşkesinde 3D tarama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Ölçüm cihazı

6.2. Deney Grupları

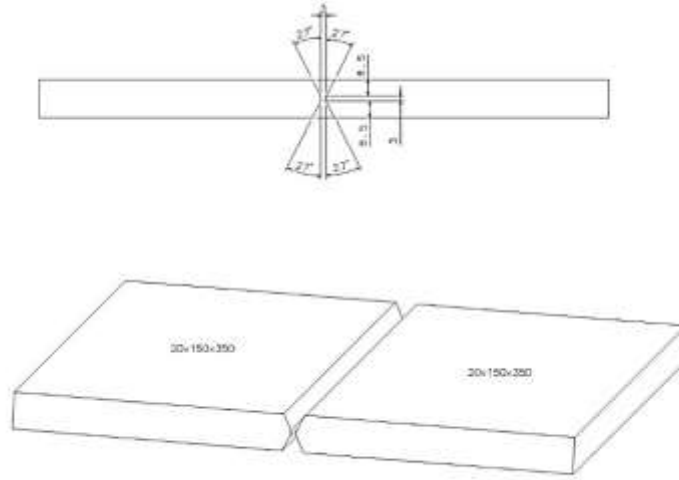
Deneylerde kullanılan malzemeler MIL-A-46100 standardına uygun malzemelerden 150mm x 300mm ölçülerinde 12 adet plaka lazer yöntemiyle kesilmiş frezeleme ile X kaynak ağzı açılarak deneylere hazır hale getirilmiştir. Kesilen plakalar 6 adet olacak şekilde birbiri ile puntalanmıştır, kaynaklı imalat sırasında kullanılan parametreler Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Parametreler tablosu

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6
Paso Sırası	1-2-3-4-5-6-7-8	1-2x3-4x5-6x7-8	1-2-3-4-5-6-7-8	1-2-3-4-5-6-7-8	1-2-3-4-5-6-7	1-2-3-4-5-6-7-8
Kısıtlama Adeti	YOK	YOK	2 Adet	4 Adet	YOK	YOK
Kaynak Ağzı Açısı	54 Derece	54 Derece	54 Derece	54 Derece	45 Derece	54 Derece
Kaynak Ağzı Simetrisi	Simetrik X	Simetrik X	Simetrik X	Simetrik X	Asimetrik X	Asimetrik X

6.3. Numune 1 ve Numune 2 Kaynak Hazırlığı

Parçalara açılan kaynak ağzı ve puntalama görüntüsü Şekil 6.3.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 6.3. Puntalama görüntüsü

6.4. Numune 1 ve Numune 2 Kaynak İşlemi

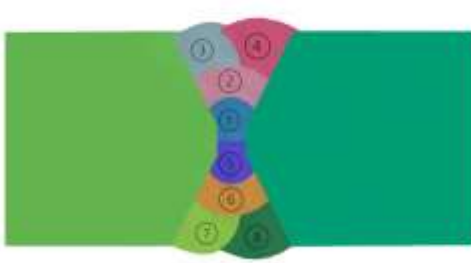
İki numune puntalandıktan sonra kısıtlanmadan tam penetrasyon kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Parçalar arası puntalanırken 3 mm boşluk bırakılmıştır. Puntalama sırasında aralığı sağlamak için 3mm ince saclar kullanılmıştır. Parçaların başlangıç ve bitiş noktalarındaki hataları önlemek için saclar yerleştirilmiştir. Numunelerin kaynak öncesi puntalanmış hali Şekil 6.4 ve 6..’te gösterilmiştir. Kaynak işlemi sırasında kullanılan işlem parametreleri sabit tutulmuştur. Numune 1 için paso sıralaması bir tarafa arka arkaya 4 paso daha sonra diğer tarafa 4 paso atılmıştır. Numune 2 için 2 paso atılmış parça çevrilmiş 2 paso atılmıştır. Numune 1 için paso sıralaması Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Numune 2 için paso sıralaması Şekil 6.7.’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Numune 1 kaynak öncesi.



Şekil 6.5. Numune 2 kaynak öncesi.



Şekil 6.6. Numune 1 paso sıralaması



Şekil 6.7. Numune 2 için paso sıralaması

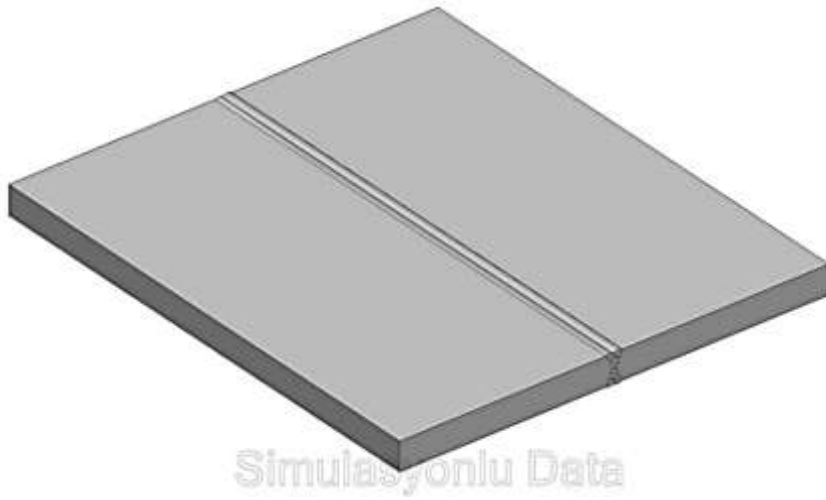
Parçaların kaynak işlemi tamamlandıktan sonra serbest şekilde soğumaya bırakılmıştır. Parçalar soğuduktan sonra başlangıç ve bitiş noktalarındaki plakalar kesilmiştir. Test parçalarının kaynak sonrası durumları Şekil 6.8’de görülebilir.



Şekil 6.8. Numune 1 ve Numune 2 kaynak sonrası

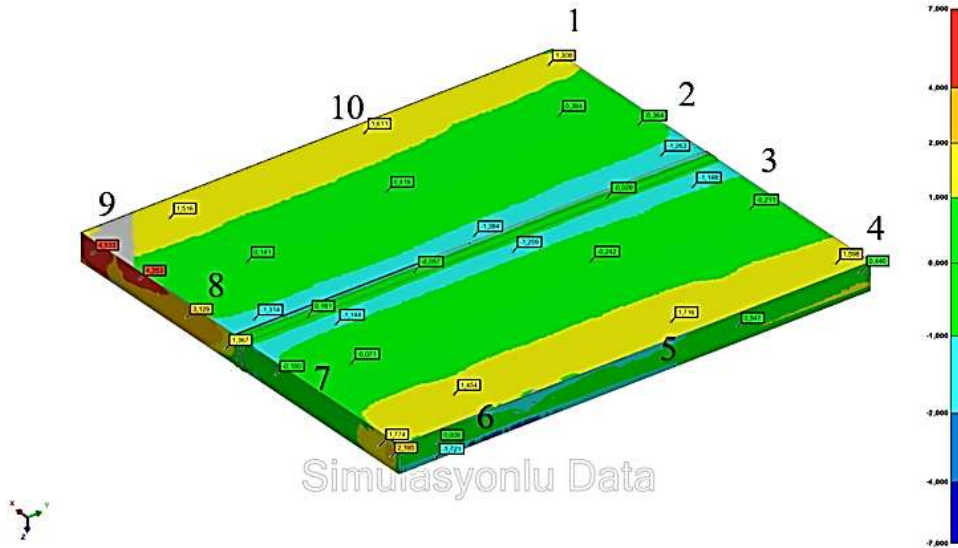
6.5. Numune 1 ve Numune 2 Ölçüm İşlemi

Alın kaynak işlemi sonrası parçalar soğuduktan sonra 3D ölçüm cihazı ile parçalar taranmıştır. Parçaların ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve çarpılma miktarının ölçülebilmesi için parçaların Şekil 6.9.'da görülen katı modeli hazırlanmıştır.



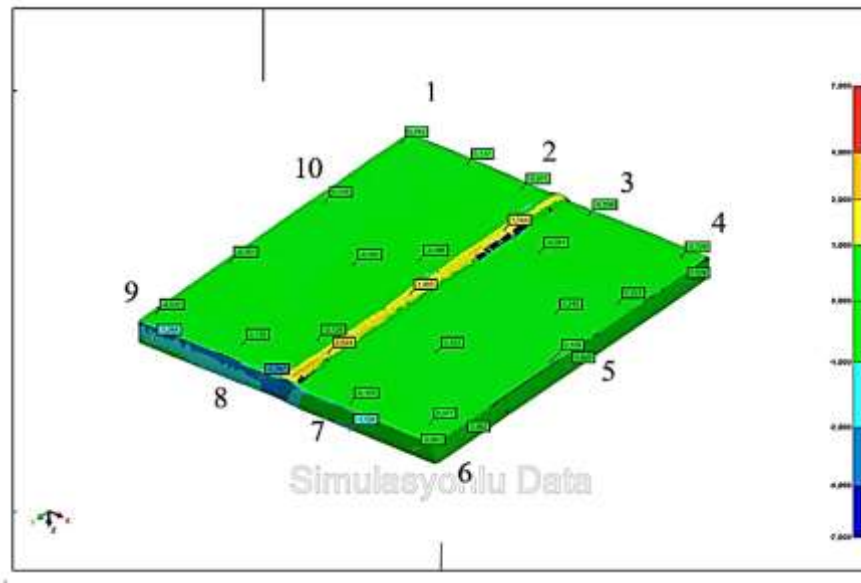
Şekil 6.9. Numune 1 ve 2 için oluşturulan katı model

Tarama sonuçları hazırlanan katı model ile karşılaştırılmış ve çarpılma değerleri ölçülmüştür. Parçalar üzerinden yaklaşık olarak benzer 10 noktadan ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Numune 1 için kaydedilen ölçüm noktaları ve çarpılma davranışı Şekil 6.10.'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Numune 1 için 3D için ölçüm sonuçları

Numune 2 için kaydedilen ölçüm noktaları ve çarpılma davranışı Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11. Numune 2 için 3D için ölçüm sonuçları.

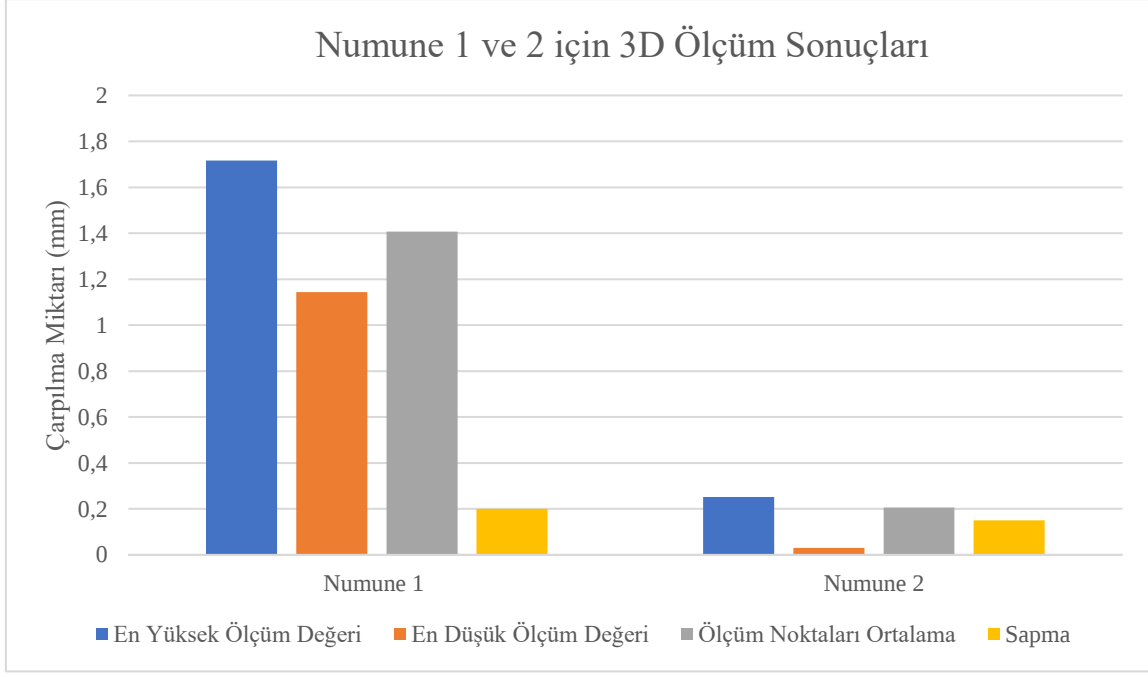
6.6. Numune 1 ve Numune 2 Ölçüm Sonuçları

Her iki numune içinde yapılan kaynak işlemi sonrası parçalar 3D tarama cihazı ile taranmıştır. Tarama sonrası elde edilen veri aynı parçaları hazırlanan katı modeli ile karşılaştırılmıştır. Çakıştırma sonrası en çok çarpılma beklenen 10 noktadan ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Numune 1 ve numune 2 için kaydedilen ölçüm sonuçları Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Numune 1 ve 2 için noktasal 3D ölçüm sonuçları

3D Ölçüm Sonuçları	Numune 1	Numune 2
Ölçüm Noktası 1	1,308	0,252
Ölçüm Noktası 2	-1,263	-0,4
Ölçüm Noktası 3	-1,148	-0,5
Ölçüm Noktası 4	1,598	-0,22
Ölçüm Noktası 5	1,716	0,245
Ölçüm Noktası 6	1,454	0,077
Ölçüm Noktası 7	-1,144	-0,10
Ölçüm Noktası 8	-1,314	0,126
Ölçüm Noktası 9	1,516	-0,03
Ölçüm Noktası 10	1,611	0,11

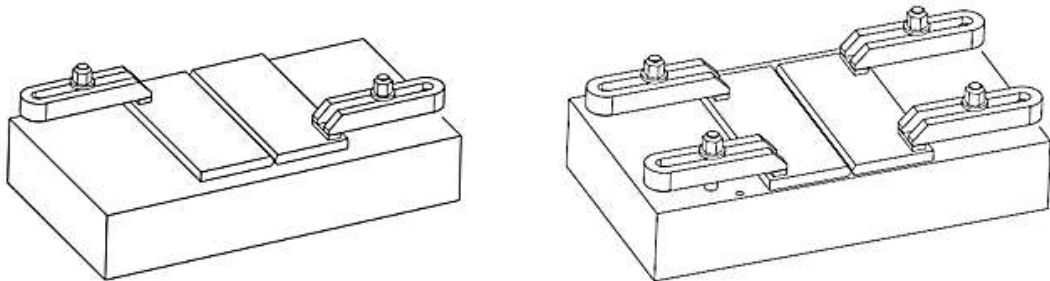
Parçaların üzerinden yaklaşık olarak, çarpılma davranışının en yüksek olması öngörülen 10 noktadan ölçümler Tablo 6.3'te alınmıştır. Alınan ölçümlerin en yüksek, en düşük ve sapma değeri Şekil 6.12'de verilmiştir. 3D ölçüm sonuçlarına göre Paso sıralamalarının çarpılma üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Ölçüm noktaları karşılaştırıldığında çarpılma davranışının aynı olduğu fakat farklı değerler olduğu gözlemlenmiştir. Açılan X kaynak ağzının bir tarafının sırayla tamamen doldurulması ve diğer tarafın doldurulması sonucunda en fazla çarpılma miktarı 1,716 mm değeri kaydedilmiştir. 2 paso atılıp diğer tarafa 2 paso atılması ve kalan pasoları sırayla doldurulması ile kaynak işlemi gerçekleştirilen numune 2 de ise en yüksek çarpılma miktarı 0,5 mm olarak kaydedilmiştir.



Şekil 6.12. Numune 1 ve 2 için 3D ölçüm sonuçları

6.7. Numune 3 ve Numune 4 Kaynak İşlemi

Numune 3 ve numune 4 için numune 1 ve 2 ile aynı ölçülerde plakalar kesilmiş ve Şekil 6.3'te gösterilen kaynak ağzı hazırlığı yapılmıştır. Parçaların çarpılma davranışlarını görebilmek için numunelerden biri çapraz olacak şekilde 2 köşeden, diğer numune ise 4 köşeden kısıtlanmıştır. Şekil 6.14'te kısıtlama noktaları gösterilmiştir. Parçaların kaynak başlangıç ve bitişlerinde kaynak kalitesi için plakalar kaynatılmıştır. Parçalar puntalandıktan sonra paso sıralaması aynı olacak şekilde kaynak işlemi yapılmıştır. Şekil 6.15'te parçaların kaynak öncesi ve sonrası gösterilmiştir.



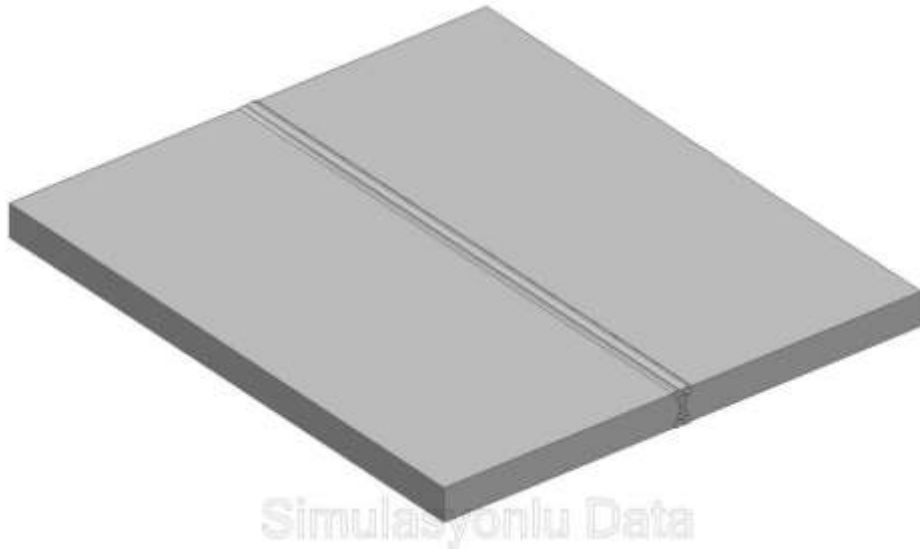
Şekil 6.14. Numune 3 ve 4 için kısıtlama gösterimleri



Şekil 6.15. Numune 3 ve 4 için kaynak öncesi ve kaynak sonrası

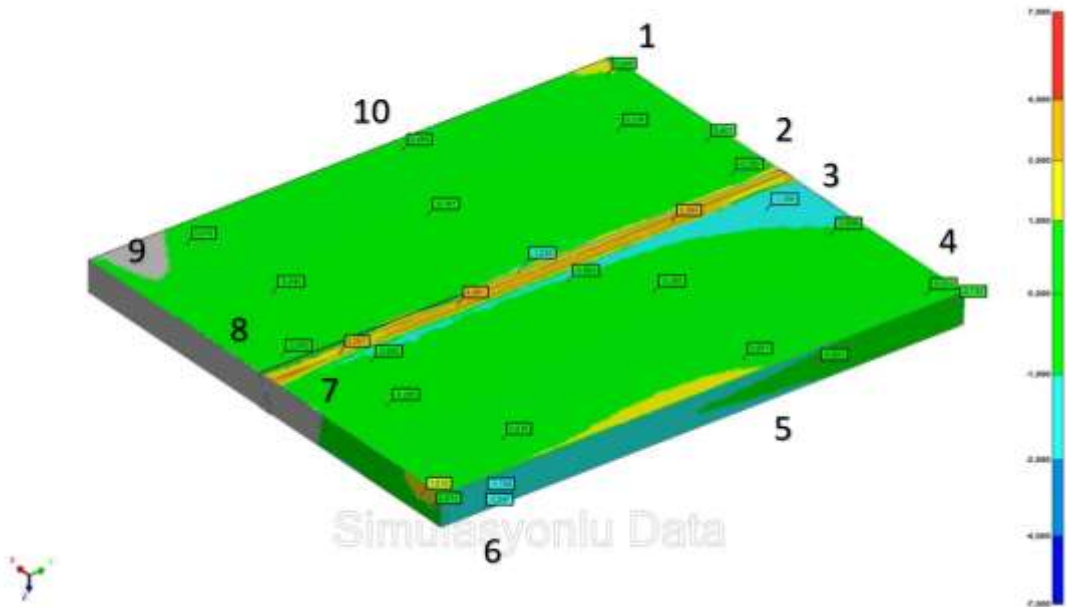
6.8. Numune 3 ve Numune 4 Ölçüm İşlemi

Alın kaynak işlemi sonrası parçalar soğuduktan sonra kulaklar kesilmiştir. 3D ölçüm cihazı ile parçalar taranmıştır. Parçaların ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve çarpılma miktarının ölçülebilmesi için parçaların Şekil 6.16'da görülen katı modeli hazırlanmıştır.

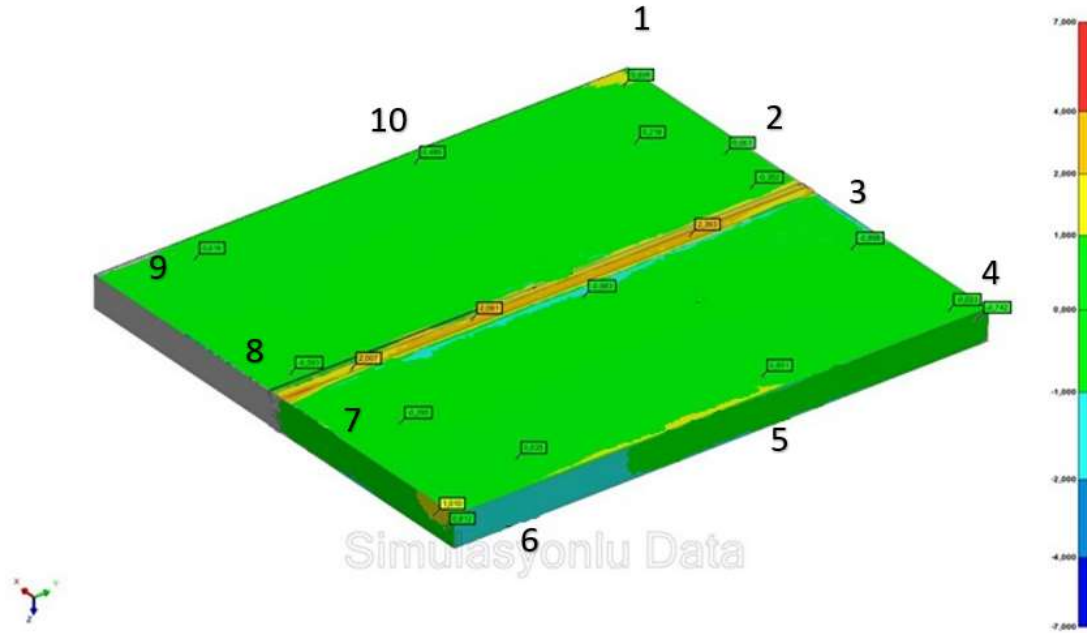


Şekil 6.16. Numune 3 ve 4 için oluşturulan katı model

Hazırlanan katı model ile tarama sonuçları karşılaştırılarak çarpılma miktarları ölçülecektir. Her iki numune için kaynak sonrası karşılaştırılan sonuçtan alınan 10 nokta numune 3 ve numune 4 olarak Şekil 6.17’de ve 6.18’de gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Numune 3 3D ölçüm sonuçları



Şekil 6.18. Numune 4 3D ölçüm sonuçları

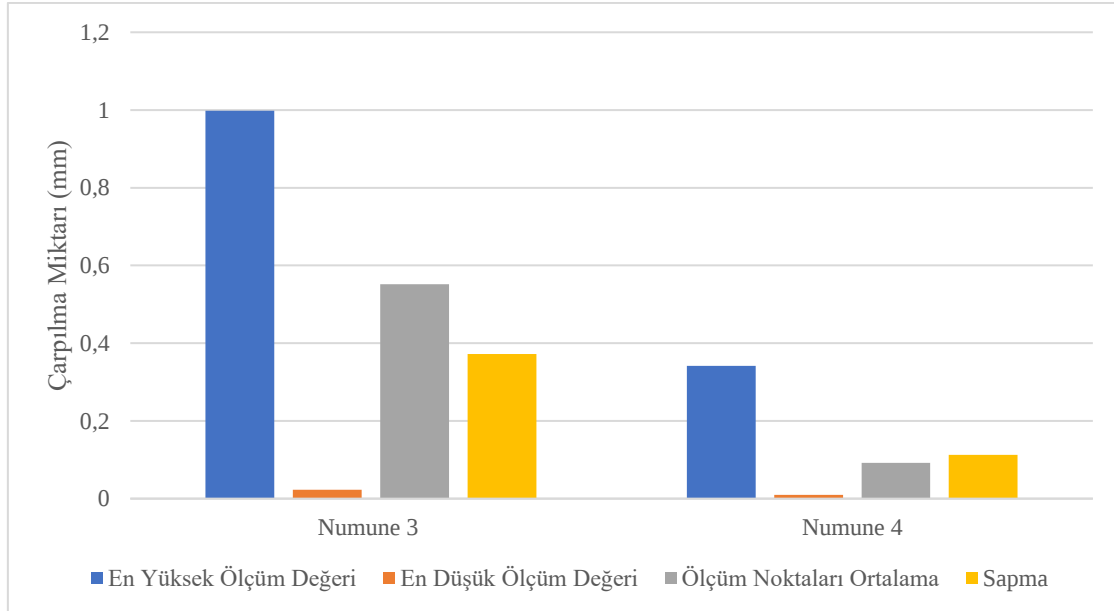
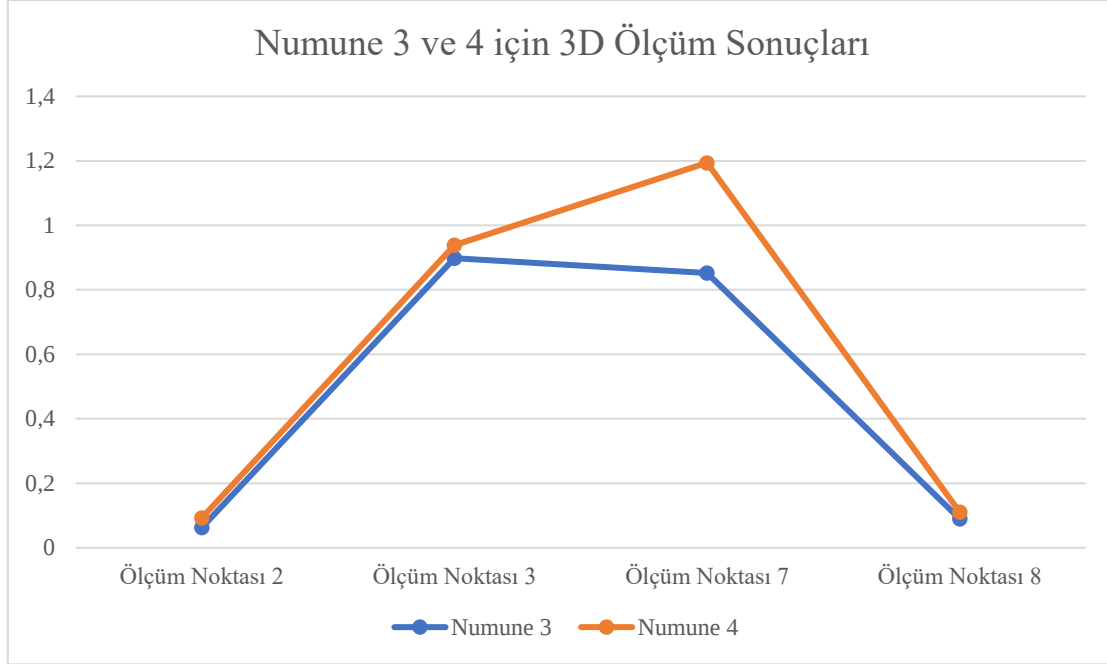
Tablo 6.4. Numune 3 ve 4 için noktasal ölçüm sonuçları

3D Ölçüm Sonuçları	Numune 3	Numune 4
Ölçüm Noktası 1	0,998	0,04
Ölçüm Noktası 2	0,063	-0,03
Ölçüm Noktası 3	-0,898	-0,04
Ölçüm Noktası 4	-0,023	-0,012
Ölçüm Noktası 5	0,851	0,146
Ölçüm Noktası 6	0,635	0,054
Ölçüm Noktası 7	-0,852	-0,342
Ölçüm Noktası 8	-0,090	0,02
Ölçüm Noktası 9	0,616	0,01
Ölçüm Noktası 10	0,489	0,23

İki numuneden benzer noktalardan alınan 10 noktanın ölçüm sonuçları Şekil 6.19’da verilmiştir. Şekil 6.19’da verilen 3D ölçüm sonuçlarına göre kısıtlama miktarının çarpılma üzerinde etkisi olduğu açıkça görülmüştür. Ölçüm noktaları karşılaştırıldığında çarpılma davranışının aynı olduğu fakat farklı değerler olduğu gözlemlenmiştir. 2 taraftan kısıtlanan parçadaki çarpılma değerleri 4 taraftan kısıtlanan parçaya göre daha yüksek çıkmıştır. En yüksek çarpılma değerleri kısıtlanmayan köşelerde gözlemlenmiştir. Numune 3 için

kaydedilen en yüksek değer 0,998 mm, en düşük değer 0,023 mm olarak gözlemlenmiştir. Numune 4 için kaydedilen en yüksek değer 0,342 mm, en düşük değer 0,01 mm olarak gözlemlenmiştir.

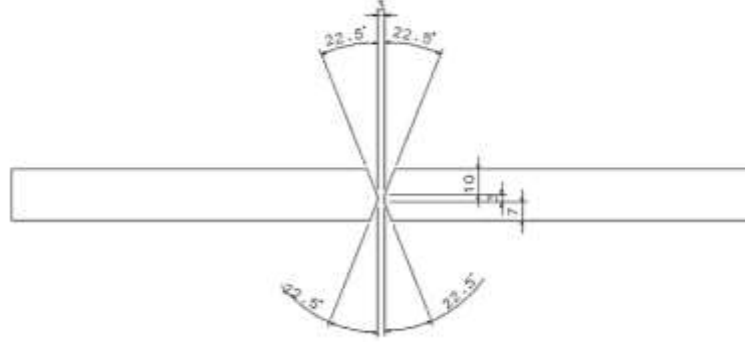
Numune 3 ve 4 için kısıtlanan yerlerde çarpılma beklenmemektedir. Bu sebeple 2,3,7 ve 8 numaralı ölçümler en yüksek çarpılma davranışını göstermektedir.



Şekil 6.19. Numune 3 ve 4 için ölçüm sonuçları

6.9. Numune 5 Kaynak İşlemi

Numune 5 için 20 mm kalınlığında 150mm x 300mm ölçülerinde 2 adet plakaya frezeleme yöntemiyle Şekil 6.20’de gösterilen kaynak ağzı açılmıştır. Daha önceki numunelerden farklı olarak 45 derece ve asimetrik kaynak ağzı açılmıştır. Parçalar puntalanırken aralarında 3 mm mesafe bırakılmıştır. Parçalarda kalınlık yönünde 10 mm ve 7 mm olarak asimetrik kaynak ağzı hazırlanmıştır.



Şekil 6.20. Numune 5 için kaynak ağzı

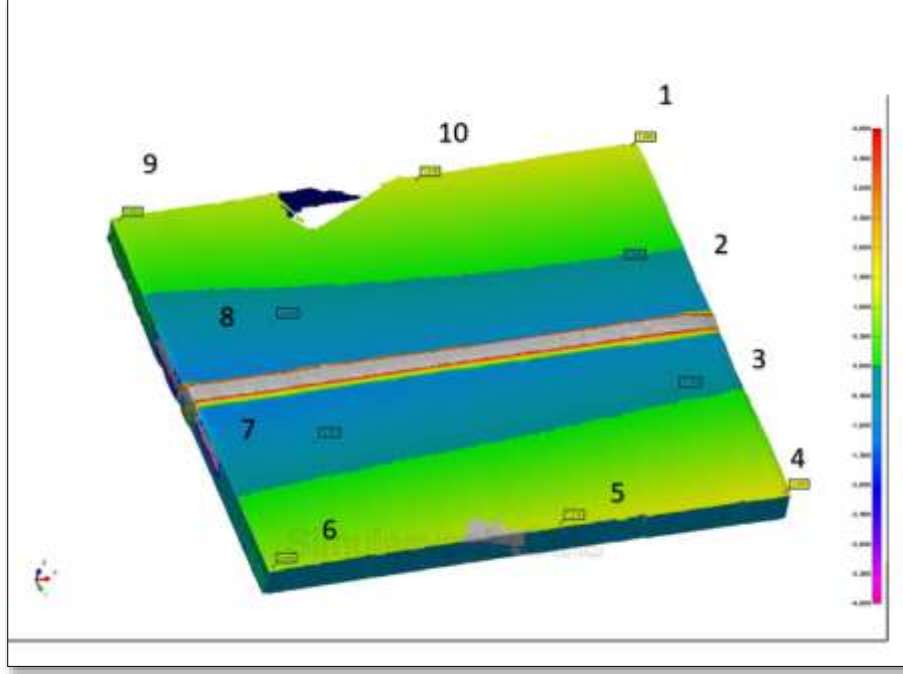
Açılan asimetrik kaynak ağzı için 10 mm açılan kaynak ağzı tarafına 4, diğer 7 mm tarafına 3, toplamda 7 paso kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Parçanın kaynak öncesi ve sonrası Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Numune 5 kaynak öncesi ve sonrası

6.10. Numune 5 Ölçüm İşlemi

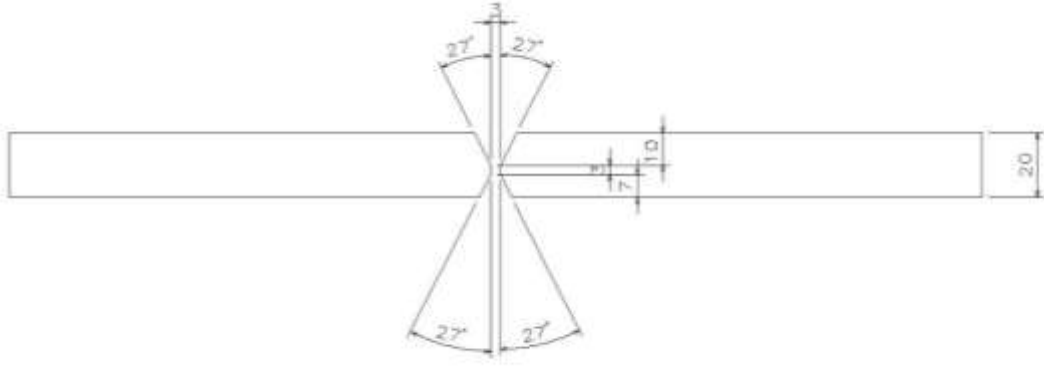
Hazırlanan katı model ile tarama sonucu karşılaştırılmış ve Şekil 6.19’da görülen 10 noktadan ölçüm sonuçları alınmıştır.



Şekil 6.22. Numune 5 3D ölçüm sonuçları

6.11. Numue 6 Kaynak İşlemi

Numune 6 için 20 mm kalınlığında 150mm x 300mm ölçülerinde 2 adet plakaya frezeleme yöntemiyle şekil 6.20 de gösterilen kaynak ağzı açılmıştır. Daha önceki numunelerden farklı olarak 54 derece ve asimetrik kaynak ağzı açılmıştır. Parçalar puntalanırken aralarında 3 mm mesafe bırakılmıştır. Parçalarda kalınlık yönünde 10 mm ve 7 mm olarak asimetrik kaynak ağzı hazırlanmıştır.



Şekil 6.23. Numune 6 kaynak ağız hazırlığı

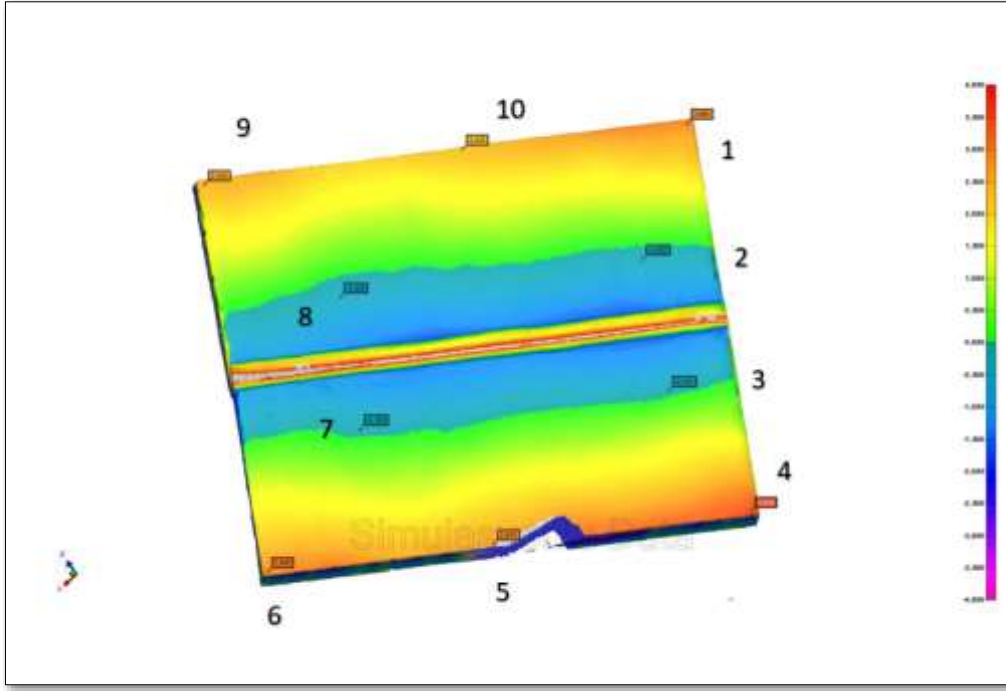
Açılan asimetrik kaynak ağızı için 10 mm açılan kaynak ağızı tarafına 5, diğer 7 mm tarafına 3, toplamda 8 paso kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Parçanın kaynak öncesi ve sonrası Şekil 6.24’te gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Numune 6 kaynak öncesi ve sonrası

6.12. Numune 6 Ölçüm İşlemi

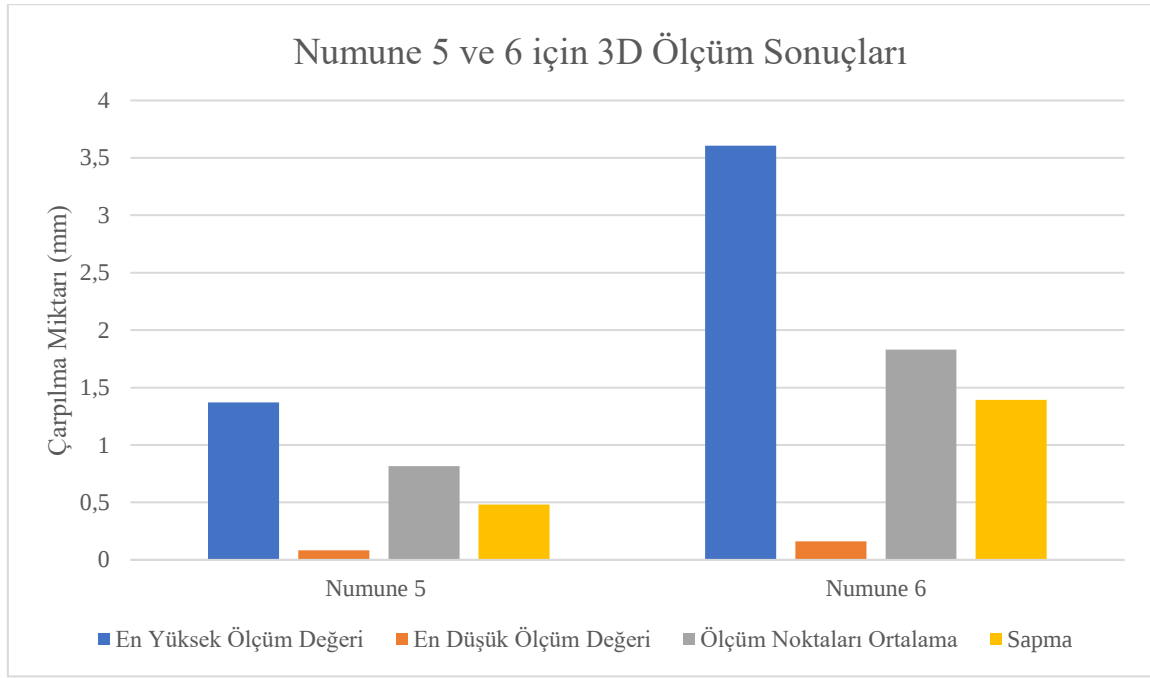
Hazırlanan katı model ile tarama sonucu karşılaştırılmış ve Şekil 6.25’te görülen 10 noktadan ölçüm sonuçları alınmıştır.



Şekil 6.25. Numune 6 3D ölçüm sonuçları

Tablo 6.5. Numune 5 ve 6 için noktasal ölçüm sonuçları

3D Ölçüm Sonuçları	Numune 5	Numune 6
Ölçüm Noktası 1	1,295	2,880
Ölçüm Noktası 2	-0,082	-0,282
Ölçüm Noktası 3	-0,154	-0,161
Ölçüm Noktası 4	1,370	3,605
Ölçüm Noktası 5	1,216	2,829
Ölçüm Noktası 6	0,949	2,995
Ölçüm Noktası 7	-0,522	-0,169
Ölçüm Noktası 8	-0,435	-0,408
Ölçüm Noktası 9	0,922	2,542
Ölçüm Noktası 10	1,218	2,432



Şekil 6.26. Numune 5 ve 6 için ölçüm sonuçları

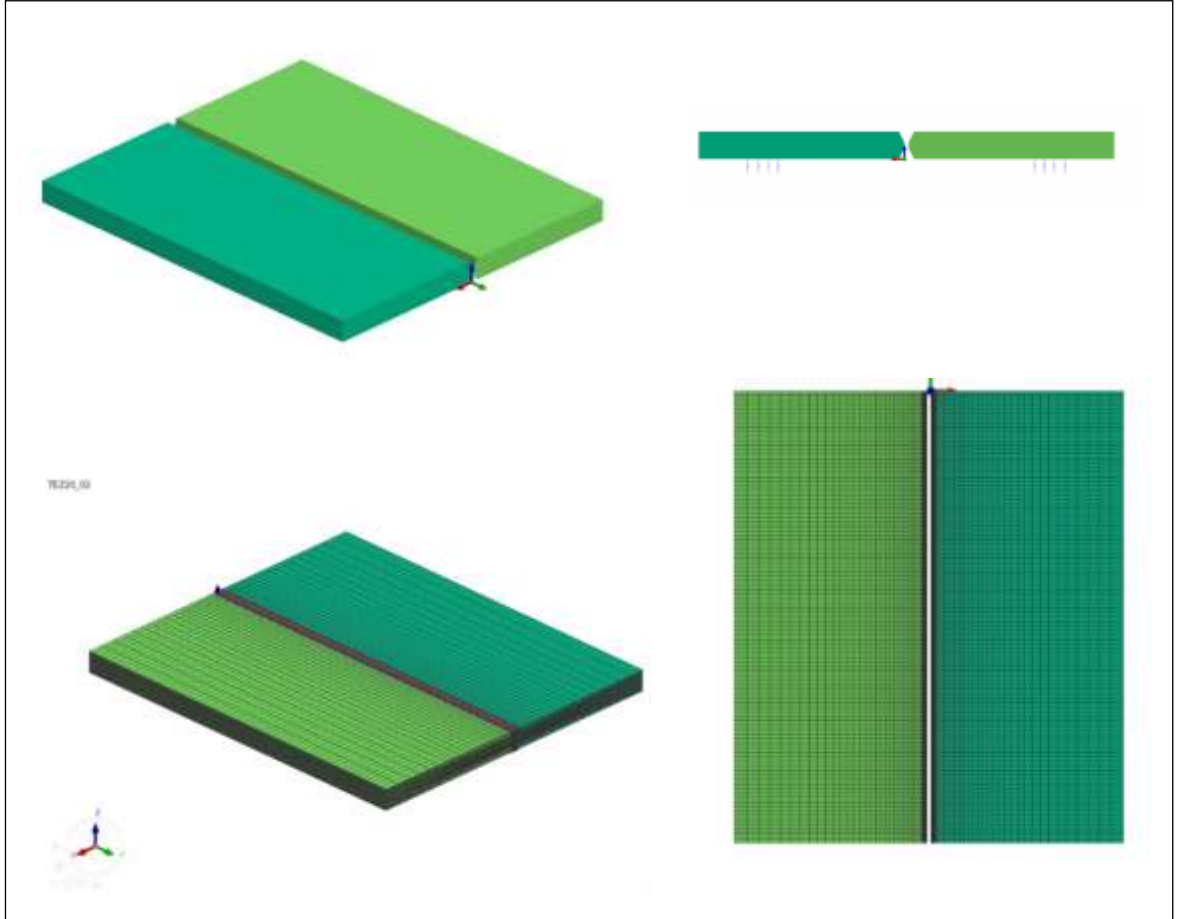
Numune 5 ve 6 için belirli noktalardan alınan ölçüm sonuçları Şekil 6.26’da verilmiştir. Kaynak ağzı açısı geniş olan numune 6’da en yüksek çarpılma değeri olarak 3,605 olarak ölçülmüştür. Dar kaynak ağzı olan numune 5 için ise en yüksek çarpılma değeri yine aynı noktada ölçülmüş olup 1,370 olarak elde edilmiştir. Şekil 6.26’da görüldüğü gibi her iki numunede de çarpılma davranışının aynı olduğu gözlemlenmiştir. Numune 5 için ölçülen en küçük değer 0,082 mm, numune 6 için ölçülen en küçük çarpılma değeri 0,161 mm olarak kaydedilmiştir.

7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE PARÇALARIN ANALİZİ

Deneyisel çalışmaları yapılan parçalar, aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan yazılım programları ile analizi gerçekleştirilmiştir. Deneyleri yapılan 6 adet numune Sysweld programı kullanılarak deneyler ile aynı koşullar altında analiz edilmiştir.

7.1. Numunelerin Mesh İşlemi

Parçaların gerçek ölçüleri ile CAD Data Visual Mesh programında hazırlandı. Parçaların katı modeli ve mesh ağı Kaynak dikişi, kaynak ısısına maruz kalan bölge ve diğer bölge olarak 3 sıklıkta mesh uygulaması yapılmıştır. Kaynak bölgesine yaklaştıkça artan gittikçe uzaklaşan mesh sistemi (çözüm ağı) uygulandı. Parçalara uygulanan çözüm ağı Şekil 7.1’de görülebilir.

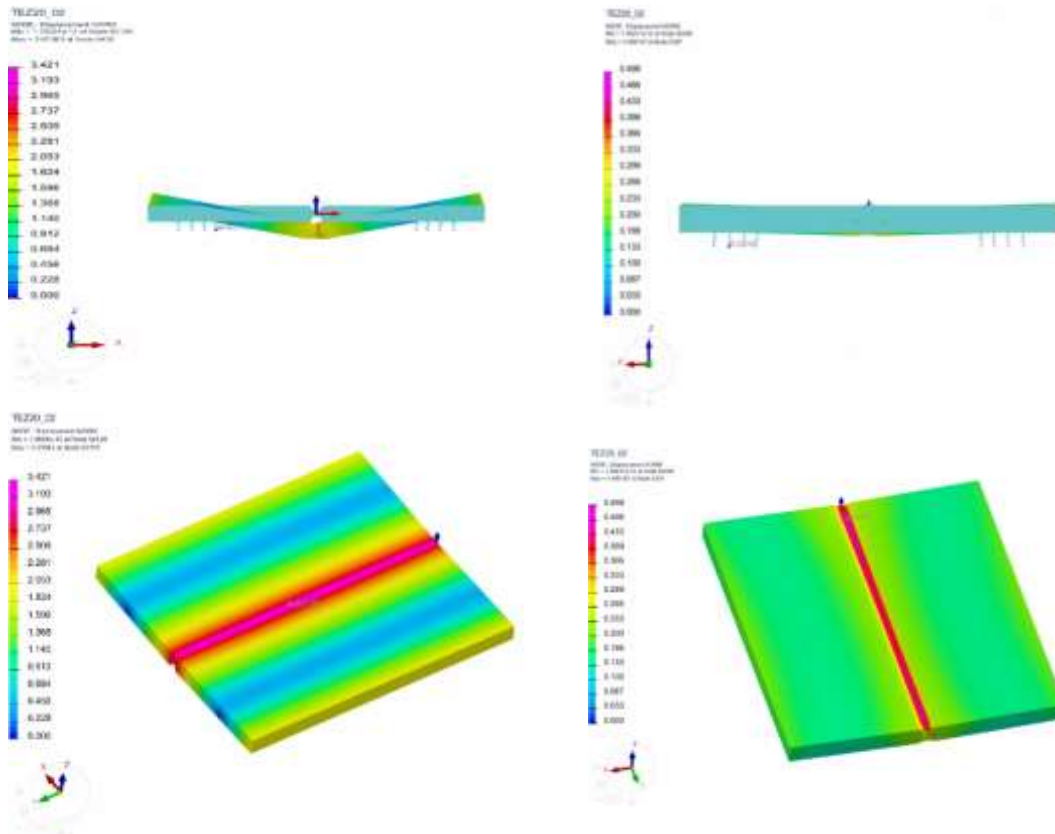


Şekil 7.1. Numunelerin mesh (çözüm ağı)

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra Visual Assembly kısmında malzeme bilgisi, kaynak dikişine ait başlangıç ve bitiş noktaları, verilen enerji miktarı (kJ/cm), kaynak hızı ve kaynak dikişinin tamamlanma süresi tanımlanmıştır. Bu parametreler toplamda uygulanan 10 paso için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Çözümde etkisi olan diğer bir parametre ise kaynak yapılan ortam sıcaklığı ve parçanın soğumasıdır. Kaynak yapılan ortam deneylerde olduğu gibi oda sıcaklığı olarak tanımlanmıştır ve kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Çözüm için 8 çekirdekli bir bilgisayar kullanılmış çözüm süresi ortalama her bir paso için 30 dk sürmüştür.

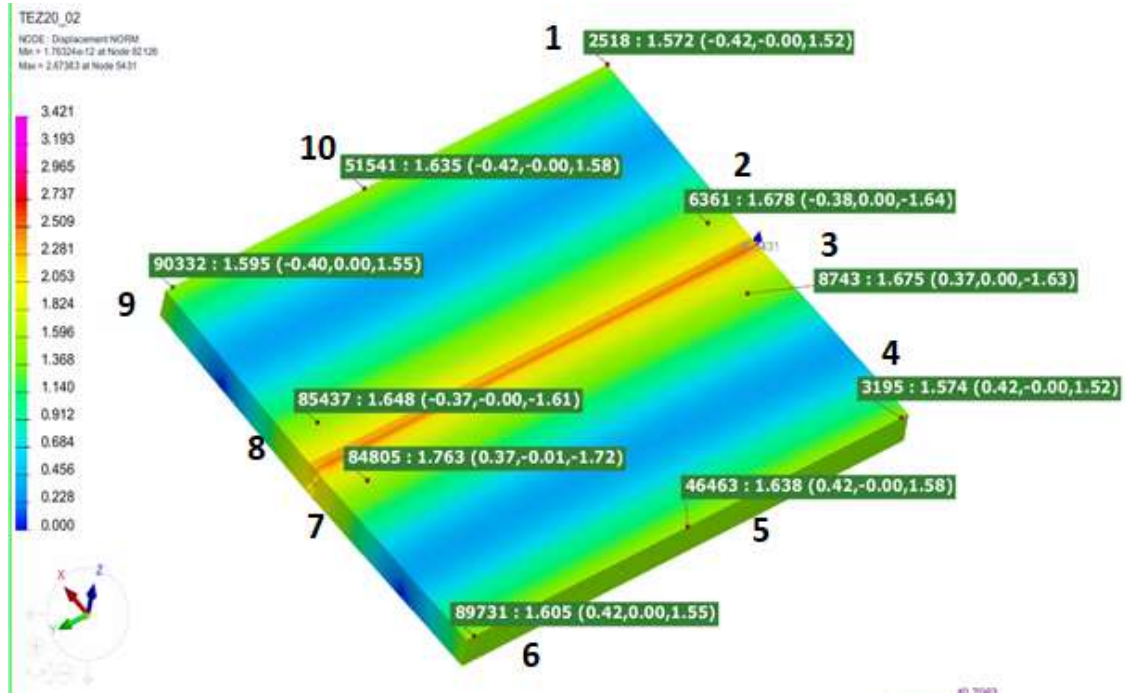
7.2. Numune 1 ve 2 için Simülasyon Sonuçları

Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra kaynak işlemi sonrası çarpılma miktarı ve davranışı incelenmiştir. Numune 1 ve 2 için kaynak işlemi tamamlandıktan sonraki çarpılma dağılımları Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre en yüksek çarpılma değerleri aynı noktalardan elde edilmiştir.

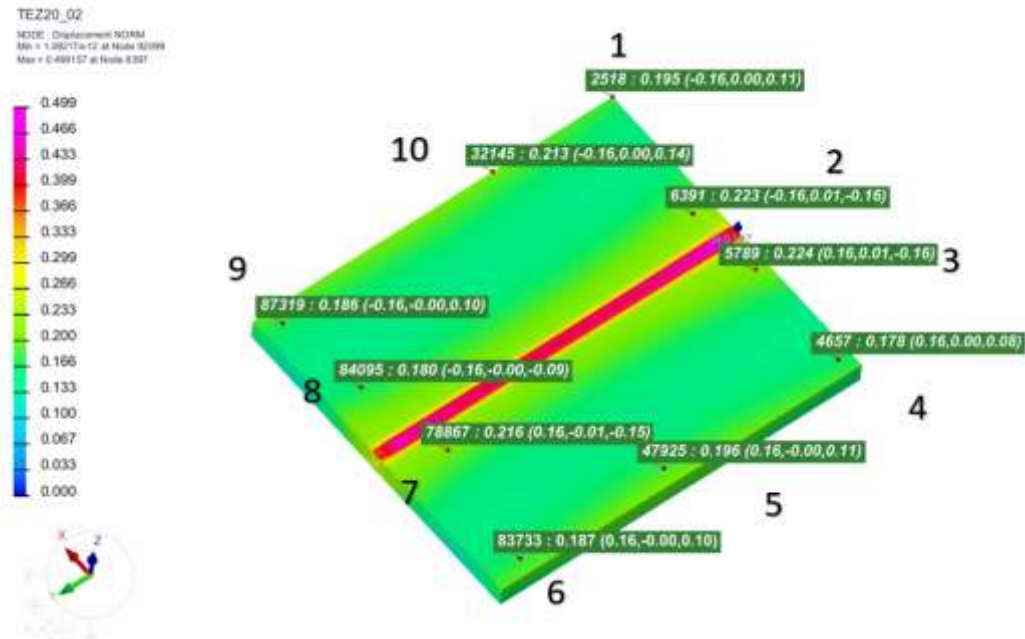


Şekil 7.2. Numune 1 ve 2 için simülasyon sonuçları.

Parçaların analizi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalarda yaptığımız 3D ölçüm ile karşılaştırmak için aynı noktalardan 10 adet ölçüm kaydedilmiştir. Şekil 7.3'te ve Şekil 7.4'te numune 1 ve numune 2 için analiz sonrası ölçüm noktaları gösterilmiştir.



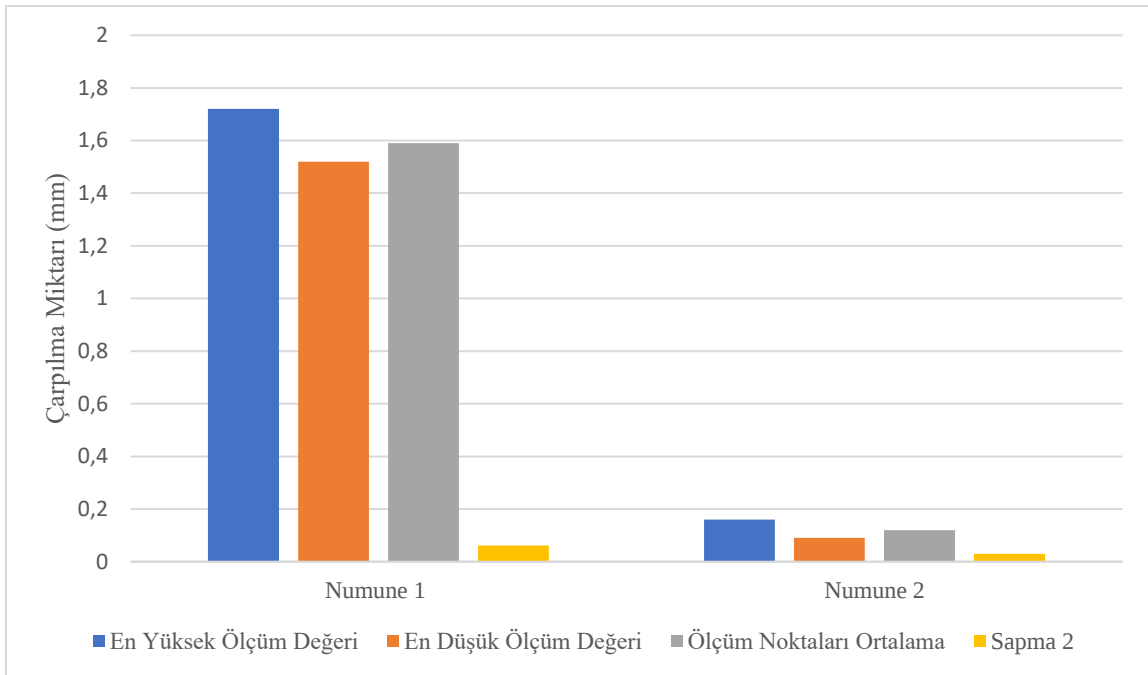
Şekil 7.3. Numune 1 için analiz sonuçları



Şekil 7.4. Numune 1 için analiz sonuçları

Tablo 7.1. Numune 1 ve 2 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları

Simülasyon Ölçüm Sonuçları	Numune 1	Numune 2
Ölçüm Noktası 1	1,52	0,11
Ölçüm Noktası 2	-1,64	-0,16
Ölçüm Noktası 3	-1,63	-0,16
Ölçüm Noktası 4	1,52	0,08
Ölçüm Noktası 5	1,58	0,11
Ölçüm Noktası 6	1,55	0,10
Ölçüm Noktası 7	-1,72	-0,15
Ölçüm Noktası 8	-1,61	-0,09
Ölçüm Noktası 9	1,55	0,10
Ölçüm Noktası 10	1,58	0,14



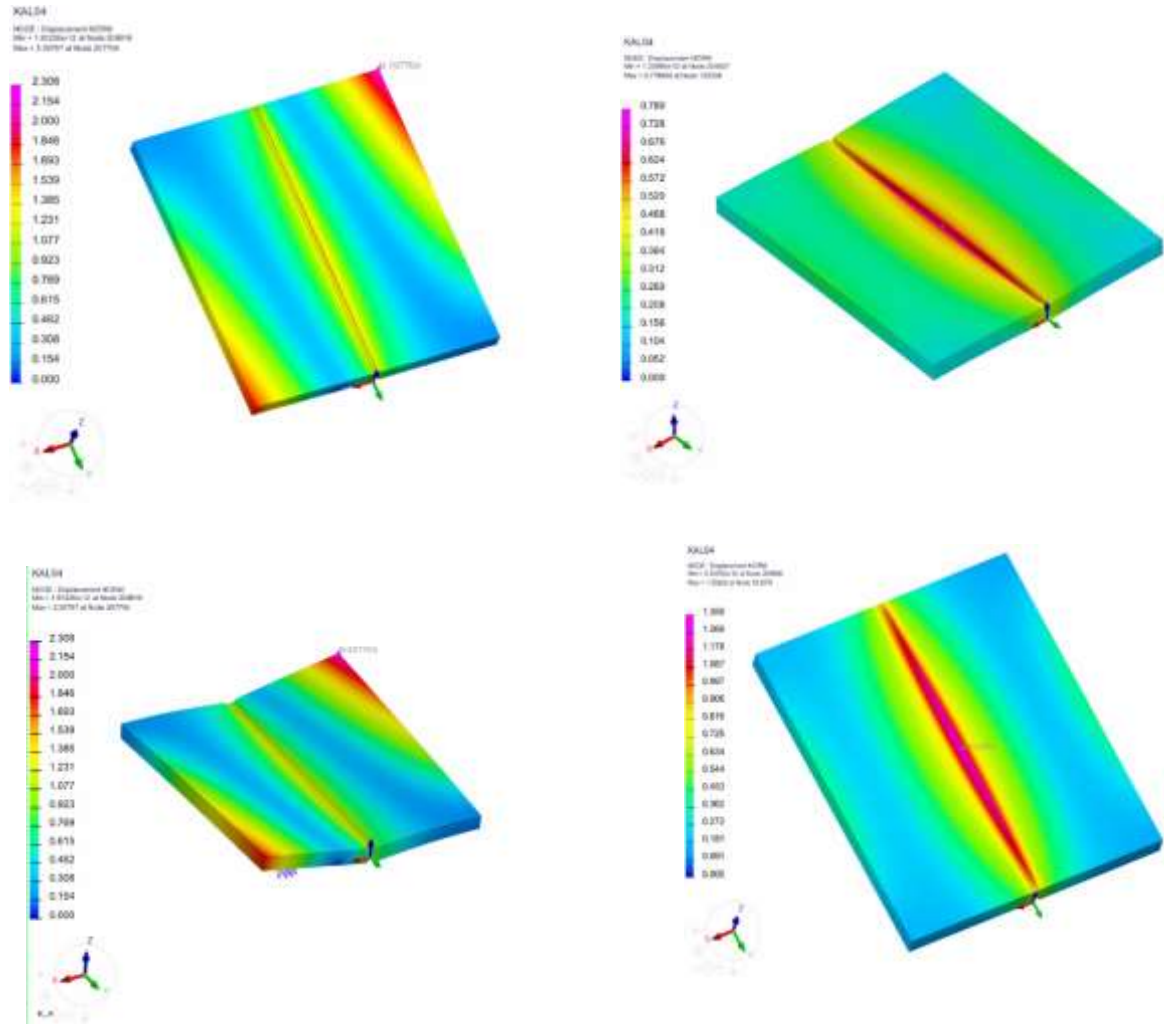
Şekil 7.5. Numune 1 ve 2 simülasyon için ölçüm sonuçları

Tablo 7.1.'de ve Şekil 7.5'te görüldüğü gibi Numune 1 çarpılma davranışı ve Numune 2 çarpılma davranışları aynı gözlemlenmiştir. Numune 1 ve numune 2 için deney sonuçları ile karşılaştırılması için benzer noktalardan 10 ölçüm kaydedilmiştir. Tablo 7.1.'de bu ölçüm sonuçlarının en yüksek ve en düşük değerleri karşılaştırılmıştır. Numune 1 için en yüksek çarpılma değeri 1,71 mm, en düşük çarpılma değeri 1,52 mm olarak kaydedilmiştir. Numune

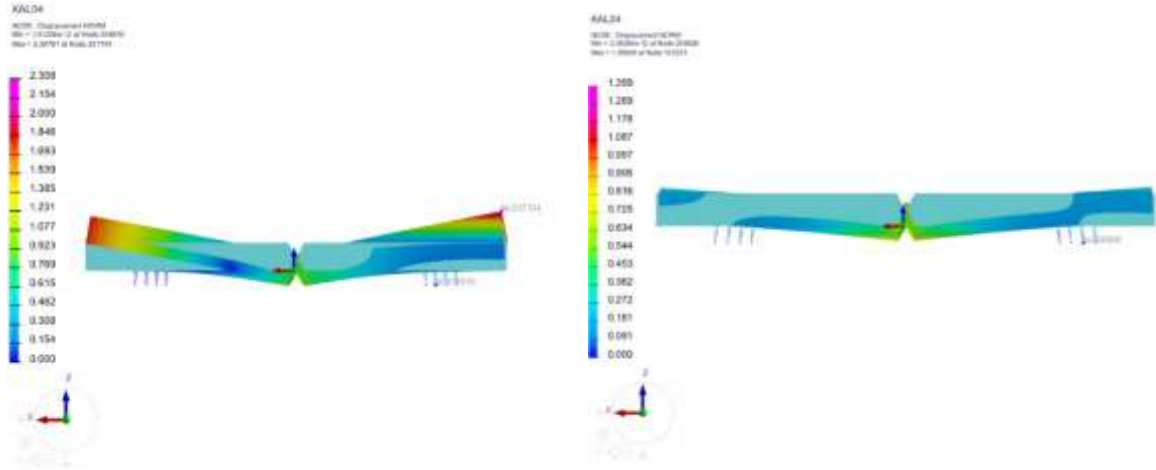
2 için en yüksek çarpılma değeri 0,16 mm, en düşük çarpılma değeri 0,09 mm olarak kaydedilmiştir.

7.3. Numune 3 ve 4 için Simülasyon Sonuçları

Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra kaynak işlemi sonrası çarpılma miktarı ve davranışı incelenmiştir. Numune 3 ve 4 için kaynak işlemi tamamlandıktan sonraki çarpılma dağılımları Şekil 7.6’da gösterilmiştir. Şekil 7.5’te verilen simülasyon sonuçlarında parçaların çarpılma davranışlarının daha iyi anlaşılması için davranışlar 10 kat büyütülmüştür.

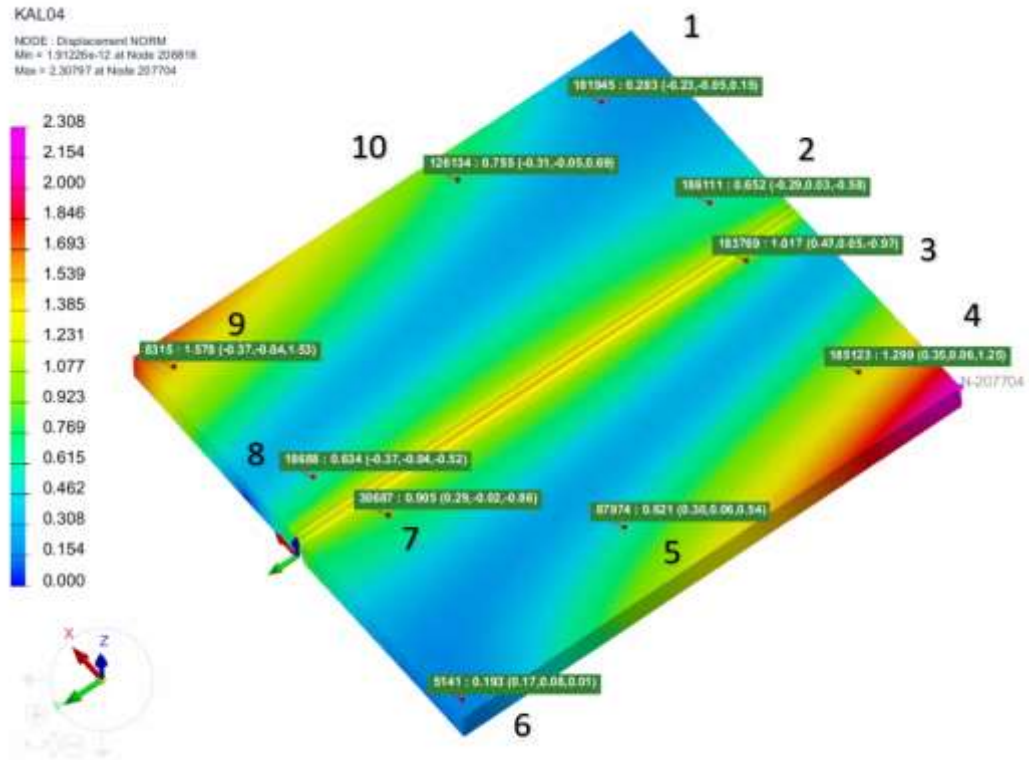


Şekil 7.6. Numune 3 ve Numune 4 için simülasyon sonuçları



Şekil 7.6. Numune 3 ve Numune 4 için simülasyon sonuçları (devam)

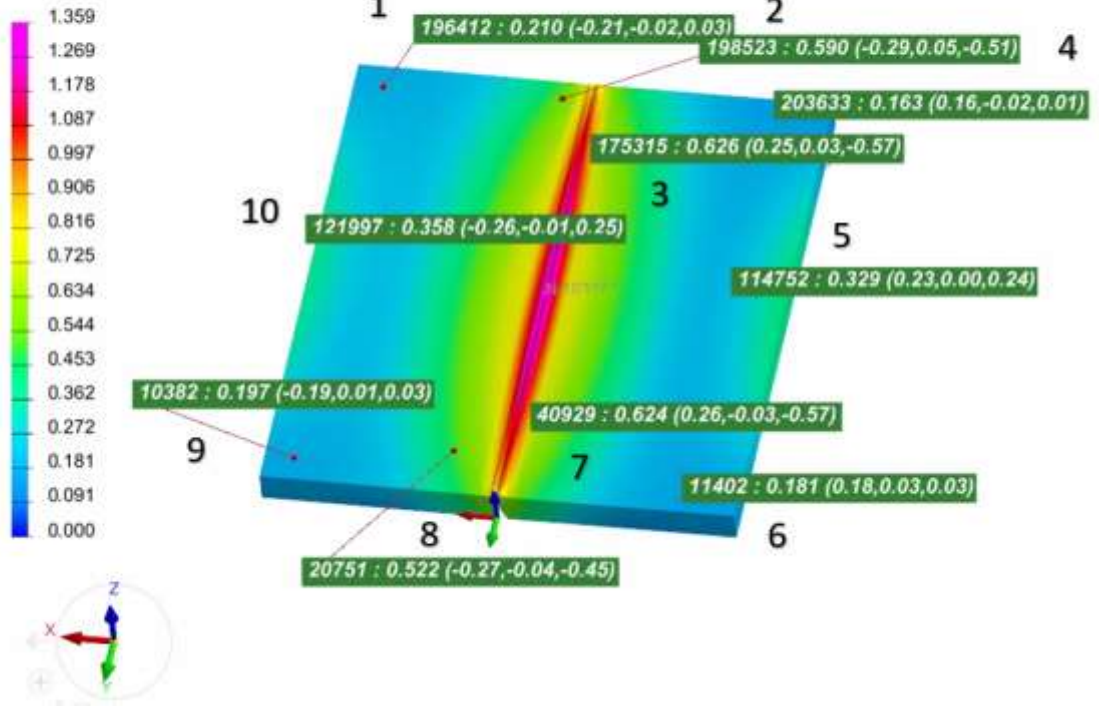
Parçaların analizi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalarda yaptığımız 3D ölçüm ile karşılaştırmak için aynı noktalardan 10 adet ölçüm kaydedilmiştir. Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de numune 3 ve numune 4 için analiz sonrası ölçüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Numune 3 simülasyon sonuçları

KAL04

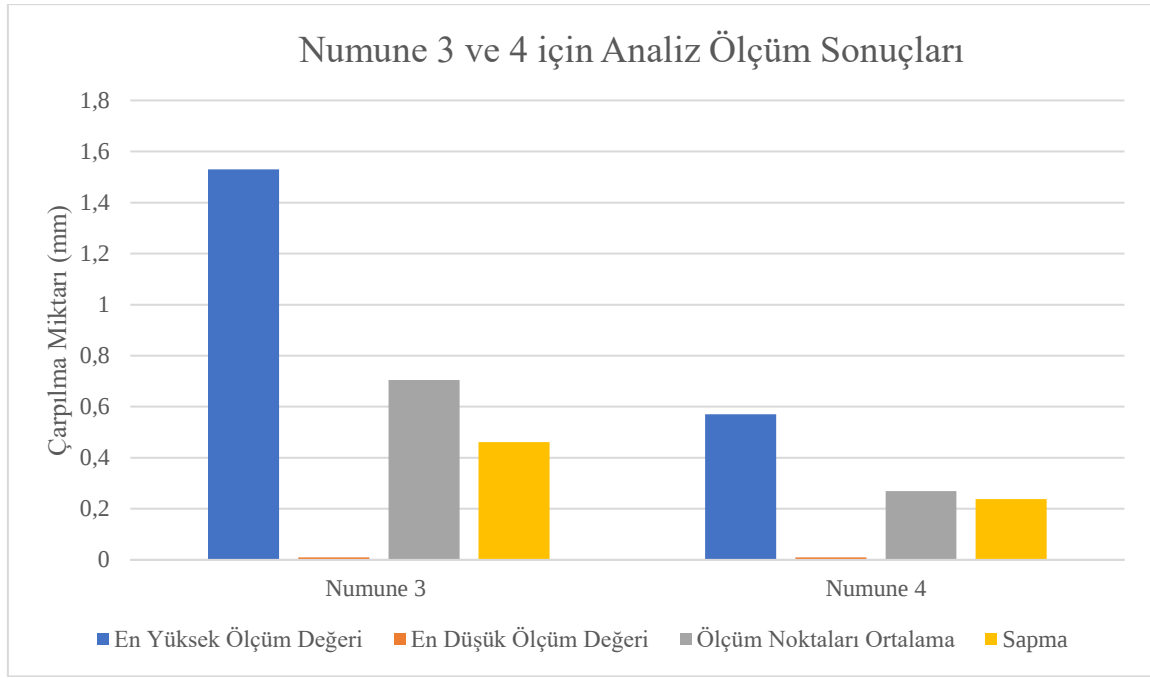
NODE : Displacement NORM
Min = 2.34295e-12 at Node 208826
Max = 1.35826 at Node 103073



Şekil 7.8. Numune 4 simülasyon sonuçları

Tablo 7.2. Numune 3 ve 4 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları

Simülasyon Ölçüm Sonuçları	Numune 1	Numune 2
Ölçüm Noktası 1	0,15	0,03
Ölçüm Noktası 2	-0,58	-0,51
Ölçüm Noktası 3	-0,92	-0,57
Ölçüm Noktası 4	1,25	0,01
Ölçüm Noktası 5	0,54	0,24
Ölçüm Noktası 6	0,01	0,03
Ölçüm Noktası 7	-0,86	-0,57
Ölçüm Noktası 8	-0,52	-0,45
Ölçüm Noktası 9	1,53	0,03
Ölçüm Noktası 10	0,69	0,25

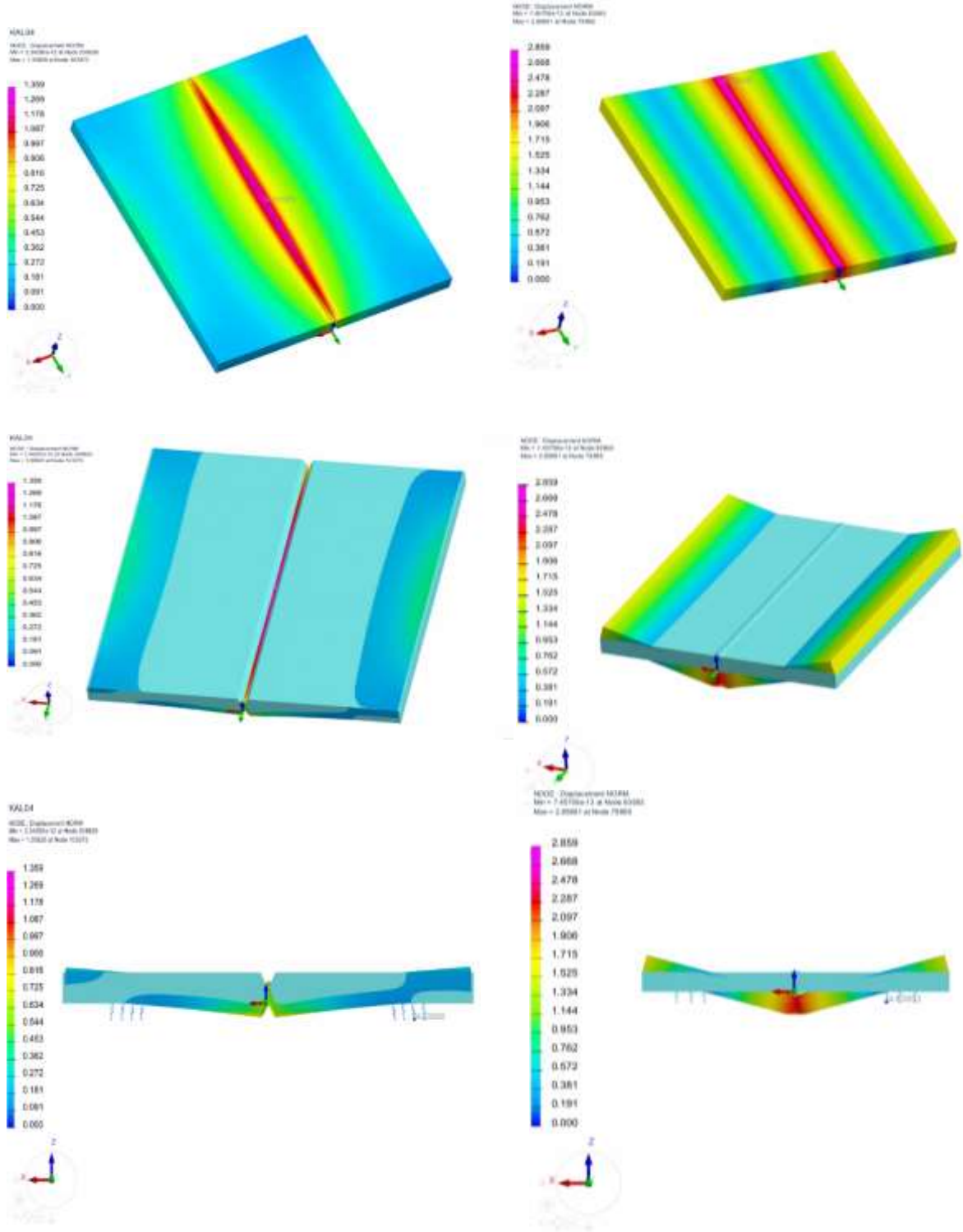


Şekil 7.9. Numune 3 ve 4 simülasyon için ölçüm sonuçları

Kaydedilen ölçüm değerleri Şekil 7.9’da verilmiştir. Numune 3 de kaynak işlemi sonrasında kaydedilen en büyük çarpılma değeri Şekil 7.9’da verildiği gibi 1,53 mm olarak ölçülürken numune 4 için kaynak işlemi sonrasında en büyük çarpılma değeri 0,57 mm olarak ölçülmüştür.

7.4 Numune 5 ve 6 için Simülasyon Sonuçları

Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra kaynak işlemi sonrası çarpılma miktarı ve davranışı incelenmiştir. Numune 5 ve 6 için kaynak işlemi tamamlandıktan sonraki çarpılma dağılımları Şekil 7.10’da gösterilmiştir.

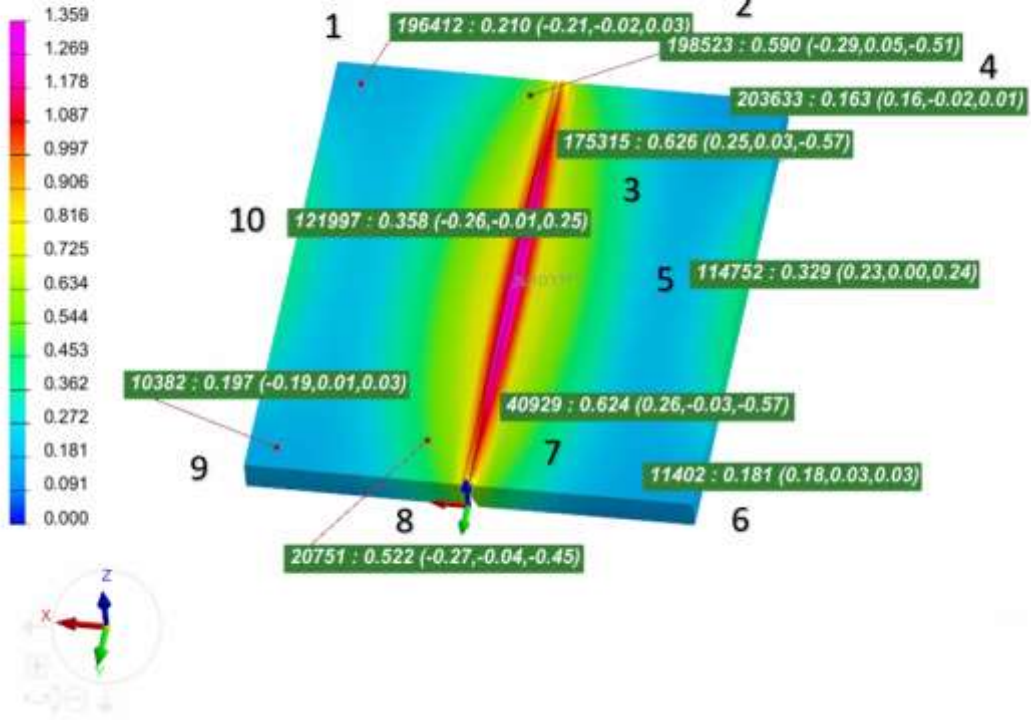


Şekil 7.10. Numune 5 ve 6 için simülasyon sonuçları

Şekil 7.10’da görüldüğü gibi parçaların analizi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalarda yaptığımız 3D ölçüm ile karşılaştırmak için aynı noktalardan 10 adet ölçüm kaydedilmiştir. Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de numune 5 ve numune 6 için analiz sonrası ölçüm noktaları gösterilmiştir.

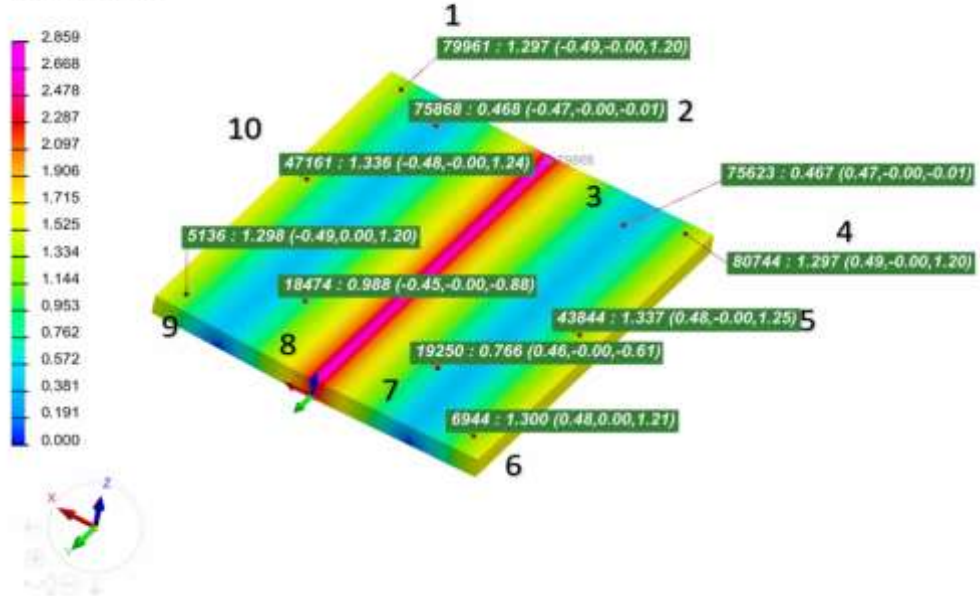
KAL04

NODE : Displacement NORM
Min = 2.34216e-12 at Node 208826
Max = 1.35926 at Node 103373



Şekil 7.11. Numune 5 simülasyon sonuçları

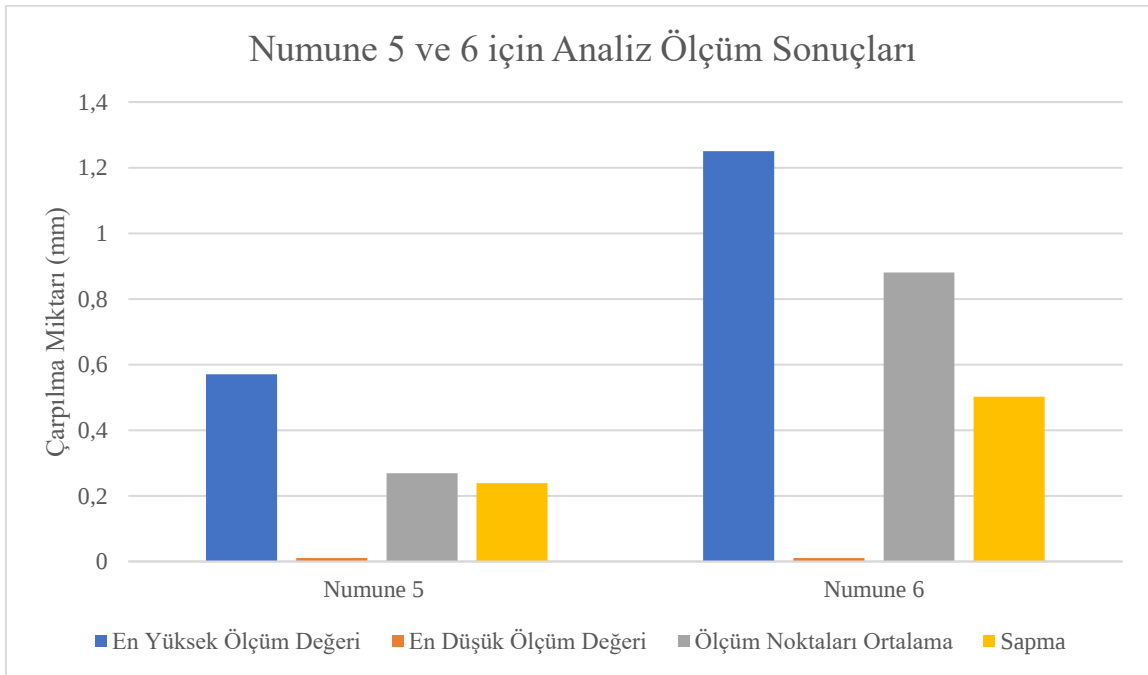
NODE : Displacement NORM
Min = 7.45709e-13 at Node 803603
Max = 2.85911 at Node 79961



Şekil 7.12. Numune 6 simülasyon sonuçları

Tablo 7.3. Numune 5 ve 6 simülasyon noktasal ölçüm sonuçları

Simülasyon Ölçüm Sonuçları	Numune 5	Numune 6
Ölçüm Noktası 1	0,03	1,20
Ölçüm Noktası 2	-0,51	-0,01
Ölçüm Noktası 3	-0,57	-0,01
Ölçüm Noktası 4	0,01	1,20
Ölçüm Noktası 5	0,24	1,25
Ölçüm Noktası 6	0,03	1,21
Ölçüm Noktası 7	-0,57	-0,61
Ölçüm Noktası 8	-0,45	-0,88
Ölçüm Noktası 9	0,03	1,20
Ölçüm Noktası 10	0,25	1,24



Şekil 7.13. Numune 5 ve 6 simülasyon için ölçüm sonuçları

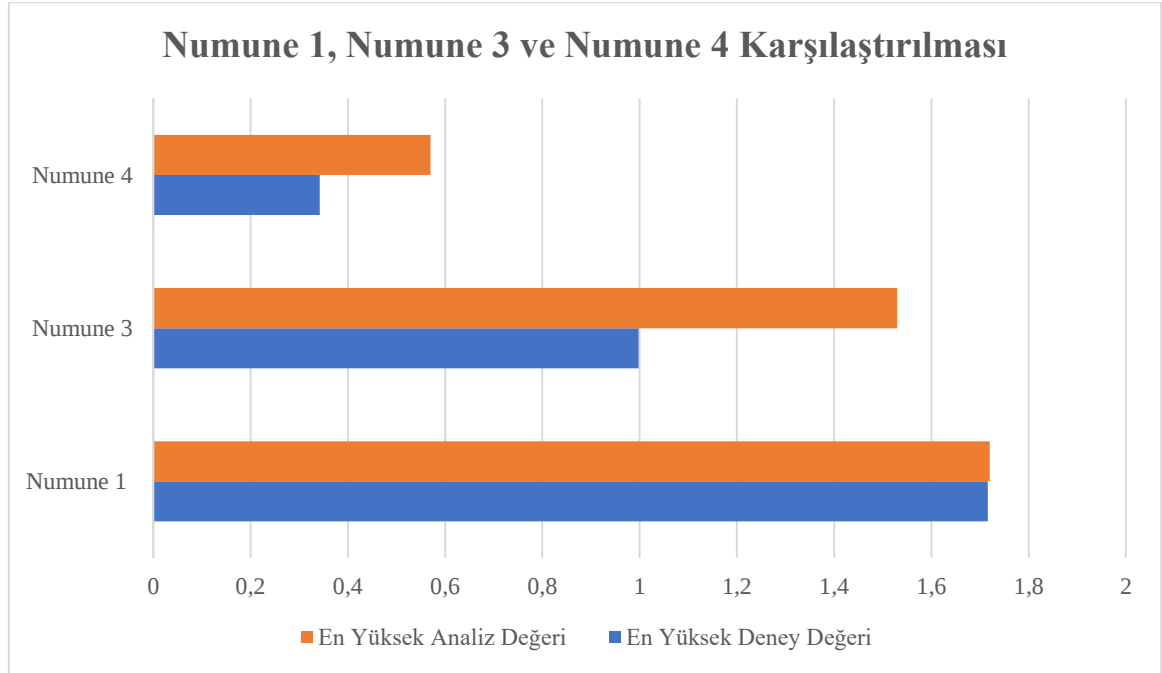
Numune 5 de analiz işlemi sonucunda alınan 10 noktadan kaydedilen en büyük çarpılma değeri Tablo 7.3'te görüldüğü üzere 0,57 mm olarak ölçülürken, numune 6 için analiz işlemi sonrasında en büyük çarpılma değeri 1,24 mm olarak ölçülmüştür. Her iki numune için kaydedilen en düşük çarpılma miktarı 0,01 mm olarak kaydedilmiştir.

7.5. Sonuçların Üçlü Kombinasyonlar ile Karşılaştırılması

Yapılan deneyler sonucu kullanılan parametrelere göre üçlü karşılaştırmaları mümkün kılmaktadır. Bir ve iki parametre değişimine göre test parçaları üçlü olarak karşılaştırılmıştır.

7.5.1. Numune 1, Numune 2 ve Numune 4 karşılaştırılması

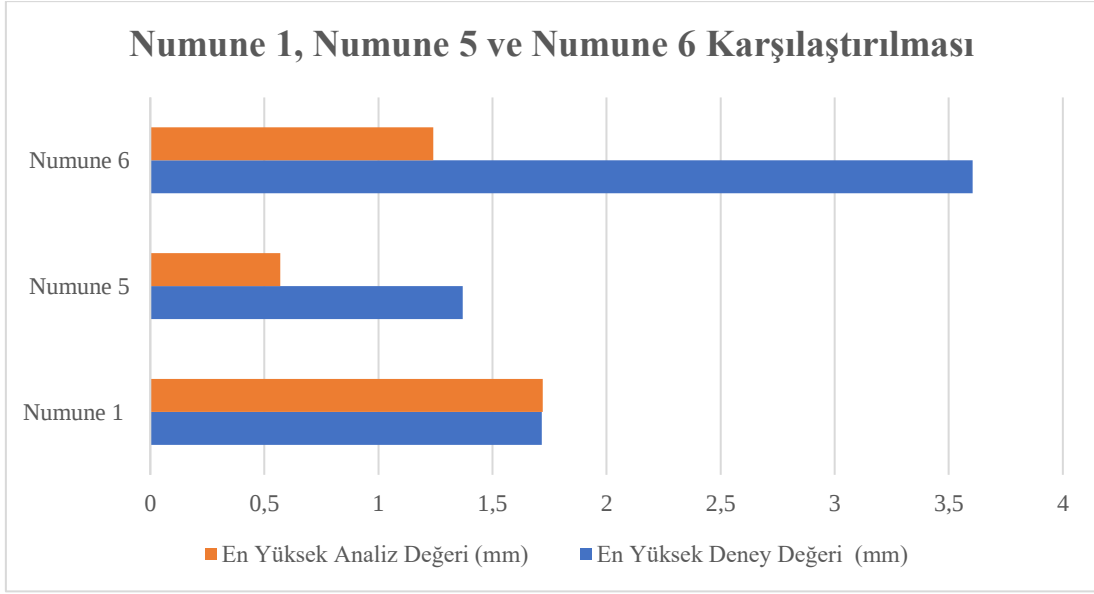
Yapılan deneyler ve analizler sonucunda 1,2 ve 4 numaralı numunelerin karşılaştırıldığı grafik Şekil 7.14'te verilmiştir. Kısıtlama olmayan, 2 taraftan kısıtlanan ve 4 taraftan kısıtlanan bu parçalarda elde edilen verilere göre kısıtlanma miktarı arttıkça mekanik çarpılma davranışı azalmıştır. Hem deneysel veriler hem de analiz verileri doğrultusunda aynı mekanik davranış gözlemlenmiştir. En çok kısıtlanan parçada en az çarpılma kaydedilmiştir.



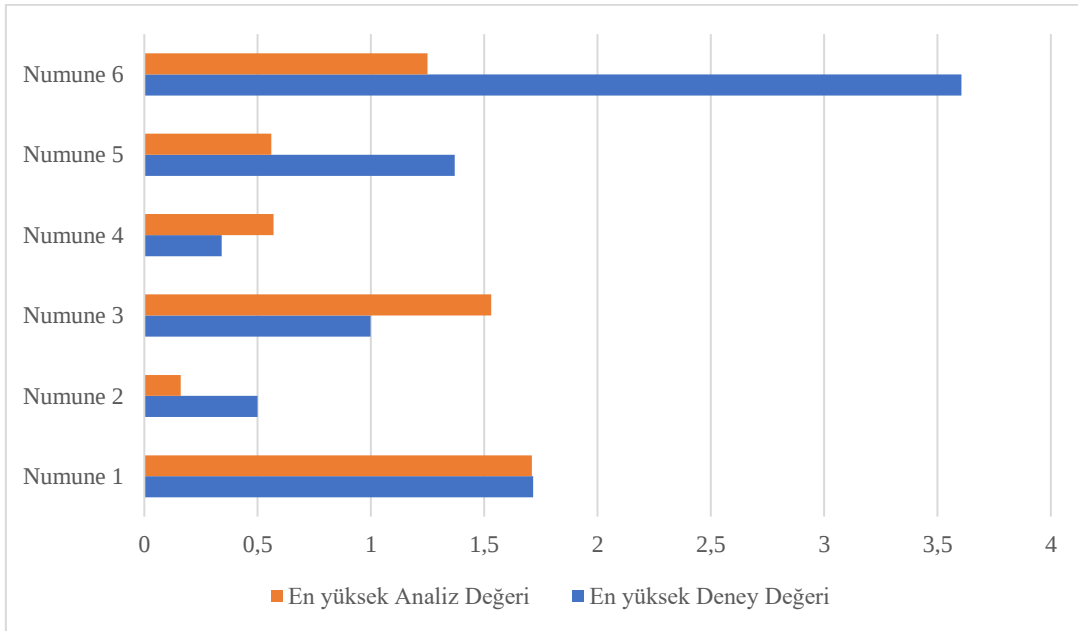
Şekil 7.14. Numune 1, Numune 3 ve Numune 4 analiz ve deneysel karşılaştırma

7.5.2 Numune 1, Numune 5 ve Numune 6 karşılaştırılması

Yapılan çalışmada kazanılan verilerin 3 numune için elde edilen grafiği Şekil 7.15'te gösterilmiştir. 45 derece kaynak ağzı açısına sahip numunelerde asimetric kaynak ağzı tasarımında mekanik çarpılma davranışı daha az gözlemlenmiştir. 54 derece asimetric kaynak ağzı açısında, 54 derece simetrik kaynak ağzına göre daha fazla mekanik çarpılma gözlemlenmiştir. Böylece simetrik kaynak ağzı tasarımında açılal değerler arasında bağlantı kurulmuştur.



Şekil 7.15. Numune 1, Numune 5 ve Numune 6 grafiği



Şekil 7.16. Bütün numunelerin grafiği

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Kaynak işlemleri sırasında paso sıralamasının değiştirilmesinin çarpılma üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.
- Kaynak işlemi sırasında parçaların hareketinin kısıtlanmasının kaynak sonucunda görülen çarpılmaya olumlu etki ettiği görülmüştür.

- Kaynak ağızı tasarımında kaynak ağızı açısının daralmasının kaynak sonucu oluşan çarpılmaya olumlu etki ettiği görülmüştür.
- Simetrik kaynak ağızı tasarımının çarpılma üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

8. SONUÇLAR

Kaynak işlemi esnasında oluşan ısı girdisi sebebiyle malzemelerde oluşturduğu çarpılmalar malzemenin mekanik ve metalurjik özelliklerine zarar verir. Bu çalışmada kaynaklı imalatlarda çarpılma miktarları, çarpılma davranışları deneyler ve simülasyon programıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Özellikle savunma sanayinde kullanılan tedarik süreci uzun ve maliyetli, kaynak işlemleri zorlu olan malzemelerde çarpılma sonuçları öngörülemeyen her koşul ve durum için kaynak işlemi gerçekleştirilemeyebilir. Bu durumlarda optimum kaynak işlemlerini belirlemek için sonlu elemanlar analizi uygulamaları büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada zırh çelikleri için farklı tasarım parametreleriyle deneyler ve aynı koşullara ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda çalışmada geçen bütün koşullarda deneyler ve simülasyon sonuçları aynı davranışı göstermiştir.

Malzemenin türüne, kalınlığına, kaynak tipine ve uygulanacak kaynak prosedürüne bağlı olarak uygun paso sıralaması kaynak işlemi öncesinde belirlenmelidir. Paso sıralaması, malzeme üzerinde oluşabilecek termal etkileri minimize ederek, malzeme özelliklerinin korunmasına yardımcı olur. Özellikle ısıya duyarlı malzemelerde doğru paso sıralaması, deformasyonu ve malzeme hasarını en aza indirebilir. Doğru paso sıralaması, kaynak dikişinin kalitesini artırabilir ve daha dayanıklı bir sonuç elde etmeye yardımcı olabilir. Uygun paso sıralaması, kaynak bölgesinde kusurları ve zayıf noktaları minimize eder. Yapılan çalışmada ilk deney grubunda kaynak işlemi sırasında paso sırasının kaynak sonrası çarpılmaları hakkında çalışılmıştır. Farklı paso sıralaması ile yapılan kaynak işlemlerinde ısı girdisi kontrol edilerek çarpılma miktarının azaltılabileceği tespit edilmiştir.

Kaynaklı imalat süresince fikstürler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada aynı kaynak işlemi 2 farklı kısıtlama ve serbest halde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney ve analiz sonuçlarına göre kaynak işleminde kısıtlama yönteminin parçanın çarpılmasında etkisi olduğu görülmüştür. Fikstür kullanımında çarpılmalar ile doğrudan alakalı olan kalıntı gerilmeler dikkate alınmalıdır. Parça içinde kalan kalıntı gerilmeler uzun vadede parçanın deformasyona uğramasına sebep olabilir. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, kalıntı gerilmelerin kontrol altında tutulması önemlidir. Doğru tasarlanmış fikstürler, iş parçalarının kaynak işlemi sırasında doğru konumda sabitlenmesini sağlayarak çarpılmanın kontrol altına alınmasına yardımcı olabilir.

Yapılan çalışmada kaynak işlemi öncesi uygun kaynak ağzı tasarımı ile çarpılma miktarının değiştirilmesinin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Kaynak ağzı açılarının azalması ve artmasının kaynak ağzı tasarımının etkisi gösterilmiştir.

Daha dar kaynak ağzı işlemlerinde paso sayısının azalması ve bu doğrultuda ısı girdisinin azalması ile çarpılma miktarının azaldığı görülmüştür. Yapılarda kaynak işlemleri sonucunda oluşan mekanik çarpılmanın ve yer değiştirmenin en az değerlerde tutulabilmesi için mühendislik hesaplarında kaynak ağzının dolayısıyla ısı girdisinin minimum değerlerde tutulması önerilmiştir.

Aynı kaynak ağzı açılarında X kaynak tiplerinde mevcut ısı girdisinin dağılımının düzensiz olmasının çarpılmayı arttırdığı görülmüştür. Asimetrik kaynak ağzında çarpılma seviyesi daha fazla kaydedilmiştir.

Simülasyon ve deneylerin sonuçları değer farklılıkları olmasına rağmen bütün karşılaştırmalarda benzer davranışları göstermiştir. Kaynak işleminin insan faktöründen gerçekleşebilecek hataları da düşünülmelidir. Analiz ve deney sonuçları arasındaki değer farklılıklarının ayrıca simülasyon programındaki ısı girdisi hesaplanan adımlardaki değerlerden de olabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda deneysel çalışmalarda kaynaklı parçaların puntalanırken gerçekleşen insan hataları minimuma indirilerek sonuçlar arasındaki farklar minimuma indirilebilir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda deney çalışmalarında numune sayıları arttırılabilir ve parametreler çeşitlendirilebilir.

Çalışmanın sonunda bütün deneysel ve analiz sonuçları paralel davranışı göstererek prototip çalışmalarında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Böylece tasarım aşamasında oluşabilecek hataların önüne geçilmesi ve imalat sonrası parçaların hurdaya çıkmasının ve büyük maddi ve zaman kayıplarının önüne geçilmesini mümkün kılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. İ. Yılmaz, “Ostenitik Paslanmaz (en DIN 1.3964) T Bağlantı Kaynağında İlave Isı Girdisi Uygulamasının Meydana Gelen Distorsiyona Etkisinin İncelenmesi,” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [2] Y. Çelik, “Kaynak İşleminde Meydana Gelen Kalıcı Gerilmelerin ve Çarpılmaların Bilgisayarla Simülasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2011.
- [3] R. Erol, “Gaz Altı Ark Kaynağı Yönteminde Proses Parametrelerinin Yapıdaki Çarpılmaya Etkisinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye, 2017.
- [4] U. Ç. Tapıcı, “Robotla Kaynak Uygulaması İçin Fikstür Tasarımı ve Kaynak Distorsiyonlarının Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [5] H. İ. Çeliker, “Kaynaklı Malzemelerde Distorsiyon Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Türkiye, 2018.
- [6] M. E. Ramos, S. M. O. Tavares ve P. M. S. T. de Castro, "Numerical modelling of welded T-joint configurations using SYSWELD," *Sci. Technol. Mater.*, vol. 30, no. 1, pp. 6-15, 2018.
- [7] M. Zubairuddin et al., "Thermal analysis of thin P91 steel using FlexPDE and SYSWELD," vol. 72, no. 3, pp. 1550-1555, 2023.
- [8] S. K. Bate, R. Charles, and A. Warren, "Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD," *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 86, no. 1, pp. 73-78, 2009.
- [9] Zubairuddin, et al., “Finite Element Analysis of Butt Joint of 316Ln Steel Thin Plate Welded by Laser Welding Process,” <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.224>. (Accessed: Jun. 9, 2024).
- [10] N. Moslemi et al., "Influence of welding sequences on induced residual stress and distortion in pipes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 342, pt. A, p. 127995, 2022.
- [11] P. Ferro, F. Berto, and R. Meneghello, "Setup of a numerical model for Post Welding Heat Treatment simulation of steel joints," *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 198-206, 2021.

- [12] M. Fulford, D. Sima, A. Doig, J. Painter, “In Defence of Rome: A Metallographic Investigation of Roman Ferrous Armour from Northern Britain,” *Journal of Archaeological Science*, vol. 32, pp. 241–250, 2005.
- [13] Soykan, H. Ş., Aslanoğlu, Z., Karakaş, Y. “Zırh çeliklerinin metalurjisi”, *Makina Mühendisleri Odası*, sayı. 427, ss. 838-869, 2005.
- [14] Ş. Karagöz, Ş. H. Atapek, A. Yılmaz, “Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fraktografik Etüt,” *Metal Dünyası*, 2008.
- [15] V. Yakut, “Zırh Çeliklerinin Ferritik ve Östenitik Dolgu Malzemeleri ile Kaynağının İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2015.
- [16] MIL-A-12560H, Military Specification: Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous (For Use in Combat Vehicles and for Ammunition Testing), Watertown, MA, USA: U.S. Military, 2007.
- [17] MIL-A-46100E, Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, U.S. Military Specification, 2008.
- [18] S. Benli, “Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2004.
- [19] S. K. Sindo, “Welding Metallurgy,” 2. Baskı, USA: Wiley, 2003.
- [20] İ. B. Akbulut, “Düşük Karbonlu Saçların Gaz Altı Kaynağında Termal Çarpılma Etkilerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [21] M.S. Güler, S.Şen, “Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler”, *Ordu Üniversitesi Bilim Teknoloji Dergisi*, cilt.5, sayı.1, 2015.
- [22] F. Ertuğ, “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Analiz ve Optimizasyon,” Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [23] N. Ö. Özdemir, “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Mekaniği ve Uygulamaları,” Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [24] U. Vural, “Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonları Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [25] N. Yavuz, vd., “Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal ve Mekanik Analizi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt. 10, sayı. 2, ss. 9-19, 2005.

- [26] COMSOL, “Meshing Considerations for Linear Static Problems,” <http://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems> (Accessed: Jun. 8, 2024).