LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN RAMOR600 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MEHMET NUR KARAŞİN

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN RAMOR600 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MEHMET NUR KARAŞİN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN RAMOR600 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Nur KARAŞİN tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Dr. Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI
Danışman, **Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi**

Sınav Jürisi:

Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ (*)
Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI (**)
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 20/ 06/ 2022

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Mehmet Nur KARAŞİN

İmza: …….……..

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince sahip olduğu, bilgi ve tecrübeleri ile her anlamda bana yol gösteren ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim, değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Haluk Kejanlı'ya saygı ve en içten şükranlarımı sunarım. Yüksek lisans çalışmalarımın yanı sıra, mesleğimi icra ederken ve dahi hayata dair her konuda, akıl danıştığım, bilgi ve tecrübelerine başvurduğum, desteklerini esirgemeyen hocam Sayın Öğr. Gör. Selçuk Keskin'e sonsuz teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Eğitim hayatımın başından bugünlere ve hayatımın her noktasında, desteklerini sonuna kadar hissettiğim başta, anne ve babam, Rakiye ve Abdurrahim Karaşin olmak üzere, kıymetli aileme, sonsuz minnettar olduğumu belirtir, teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xi
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
3. ZIRH ÇELİKLERİ 10
3.1 Zırh Teknolojisi 11
3.2 Zırh Çeliklerinin Özellikleri 13
3.3 Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi 15
3.3.1 Zırh çeliklerinde alaşımlama 15
3.3.2 Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyeti 17
3.4 Balistik Malzemelerin Kısa Tarihi 18
3.6 Balistik Biliminde Enerji Emme Kapasitesi 19
3.7 Ramor Zırh Çelikleri 19
3.8 Ramor 600 Çeliği Kullanım Alanları 20
4. MATERYAL VE METOD 22
4.1 Lazer Kaynak Metodu 22
4.1.1 Lazer kaynak metodu dezavantajları 26
4.2 Taguchi Metodu Kullanılarak Deney Tasarımı ve Modellemenin Yapılması 27
4.3 Deneyde Kullanılan Malzeme 28
4.4 Numunelerin Hazırlanışı 29

4.4.1 Çekme deneyi 30
4.4.2 Çentik darbe deneyi 31
4.4.3 Mikro sertlik deneyi 33
5. ARAŞTIRMA BULGULARI 36
5.1 Çekme Testi Sonuçları 36
5.1 Deneylerin Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile İrdelenmesi 38
5.2 Sinyal / görüntü (S/ N) Oranlarının Elde Edilmesi 39
5.3 ANOVA Çalışmaları 42
6. TARTIŞMA VE SONUÇ 48
KAYNAKLAR 50
ÖZGEÇMİŞ 54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Balistik biliminde kullanılan mermi iç yapısı 16
Şekil 3.2 Enerji emme kapasitesi 17
Şekil 3.3 Çekme deneyi öncesi ve sonrası numune sembolik gösterimi 18
Şekil 4.1 İletim kaynağı görüntüsü 19
Şekil 4.2 Anahtar deliği kaynağı görüntüsü 29
Şekil 4.3 Lazer kaynağı uygulaması 31
Şekil 4.4 Lazer kaynak makinesi 32
Şekil 4.5 Lazer kaynak makinesi tel besleme sistemi 33
Şekil 4.6 Lazer kaynak makinesi tel besleme sistemi fonksiyonu 33
Şekil 4.7 Lazer kaynağı yapılmış 3'er adet çekme deney numunesi ve mikrosertlik numunesi temin edilmiştir 37
Şekil 4.8 Lazer kaynağı için hazırlanmış olan deney numune ölçüsü 38
Şekil 4.9 Lazer kaynapı yapılmış olan 9 adet çekme deney numunesi 38
Şekil 4.10 Instron BS8801 Çekme test cihazı 39
Şekil 4.11 Çentik darbe test cihazı 40
Şekil 4.12 a) Çentik darbe test numunesi ölçüleri…….. 41
Şekil 4.13 b) Çentik darbe test cihazı 41
Şekil 4.14 Kesme cihazı 41
Şekil 4.15 AOB marka metalografik zımparalama cihazı 42
Şekil 4.16 Numune bakalit cihazı 42
Şekil 4.17 Kaynaklı numunelerin mikrosertlik alınan noktaların şematik görüntüsü 43
Şekil 4.18 Dijital mikrosertlik ölçüm cihazı 43
Şekil 5.1 Farklı parametlerle lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çekme deney numunesi 45
Şekil 5.2 Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çekme deney numunesi ve çekme sonrası kopma bölgesinin görüntüsü 46
Şekil 5.3 Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çentik darbe deney numunelerinin kopma bölgesinin görüntüsü 46
Şekil 5.4 Çekme mukavemeti için Taguchi deney dizaynında Sinyal/Gürültü S/N performans grafiği 49

Şekil 5.5 Çentik darbe mukavemeti için Taguchi deney dizaynında Sinyal/Gürültü S/N performans grafiği 49
Şekil 5.6 Taguchi deney dizaynında çekme mukavemeti için varyans analizi ekran görüntüsü 50
Şekil 5.7 Taguchi deney dizaynında çentik darbe için varyans analizi ekran görüntüsü 50
Şekil 5.8 Çekme mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekran görüntüsü ... 52
Şekil 5.9 Çekme mukavemeti için olasılık grafiği 53
Şekil 5.10 Çentik darbe mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekran görüntüsü 53
Şekil 5.11 Çentik darbe mukavemeti için olasılık grafiği 54

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Ramor çeliğinin mekanik özellikleri 18
Tablo 3.2 Zırh malzemelerinin özellikleri 20
Tablo 3.3 Zırh çeliklerinde imalat işlemleri doğrultusunda istenen özellikler 22
Tablo 3.4 Zırh çelik türleri ve sertlik, tokluk değerleri 23
Tablo 3.5 Zırh çeliklerinin kimyasal bileşenleri 24
Tablo 3.6 Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri 24
Tablo 3.7 Ramor çeliğinin mekanik özellikleri 28
Tablo 3.8 Ramor çeliğinin kimyasal özellikleri 28
Tablo 4.1 Lazer kaynak parametrelerinin Taguchi metoduyla çalışma tablosu 36
Tablo 4.2 Lazer kaynağı Taguchi L9 deneysel tasarım çalışma tablosu 36
Tablo 4.3 Deney faktörleri ve seviyelerinin gösterilmesi 37
Tablo 4.4 Ramor çeliğinin mekanik özellikleri 37
Tablo 4.5 Ramor çeliğinin kimyasal özellikleri 37
Tablo 5.1 Ramor600 zırh çeliği için kullanılan lazer kaynak parametrelerinin çekme ve çentik darbe deney sonuçları 47
Tablo 5.2 S/N Sinyal/Gürültü performans değerlerinin her bir parametre için gösterilmesi 48
Tablo 5.3 Çekme mukavemeti için Varyans Analizi sonuçları 51
Tablo 5.4 Çentik darbe mukavemeti için Varyans Analizi Sonuçları 52

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
^{0}C	Derece
J	Çentik darbe mukavemeti
C	Karbon
Si	Silisyum
Mn	Mangan
Cr	Krom
Ni	Nikel
Mo	Molibden
B	Bor
A_0	Birinci kalınlık
B_0	Birinci genişlik
L_c	Gövde uzunluğu
L_0	İlk ölçü uzunluğu
L_t	Toplam uzunluk
L_u	Kopma sonrası son ölçü uzunluğu
S_0	İlk bölüm alanı
L	Kavrama uçları
W/mm^2	Güç yoğunluğu
S/N	Sinyal/Gürültü

Kısaltma	Açıklama
HBW	Brinell Sertlik (Kontrol bilye:volframkarpit)
mm	Milimetre
ITAB	Isının tesiri altında kalan bölge
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDX	Enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi
HSQTS	Yüksek mukavemetli su verilmiş ve Temperlenmiş çelik
HAZ	Isıdan etkilenen bölge
HLAW	Hibrit lazer ark kaynağı
PTA	Plazma transferli ark kaynağı
MAG	Metal aktif gaz kaynağı
DHA	Çift Sertlik Zırhı
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh
CHA	Döküm Homojen Zırh
HHA	Yüksek Sertlik Çelik Zırhı
MPa	Megapaskal
EB	Elektron ışını
W	Watt
Sec	Second

ÖZET

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN RAMOR600 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Karaşin, Mehmet Nur
Yüksek lisans, Makina Mühendisliği Bölümü
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haluk Kejanlı
Haziran 2022, 69 sayfa

Sağlamlıkları ve sertlikleri ile balistik özellikler anlamında ön plana çıkan Ramor zırh çelikleri, silahlı saldırılar veya patlamalardan korunmak için dünya çapında tercih edilen çeliklerdir. Ramor zırh çeliklerinin; HBW sertlik dereceleri üzerinden numaralandırılan Ramor500, Ramor550 ve Ramor600 şeklinde farklı modelleri. Bu zırh çelikleri, patlama sonucu oluşan basınç ve yüksek hız sonucu oluşan darbeleri absorbe etmek amacıyla üretilmektedir. Bu tez çalışmasına konu olan Ramor600, 3 ve 6 mm kalınlığında olabilen ve 600 HBW nominal sertlikte sunulan ekstra yüksek sertlikte bir balistik koruma çeliğidir. Patlamalara karşı dayanım, yüksek sertlik ve balistik değerlerinin, Ramor zırh çeliklerine; savunma sanayi, ağır sanayi, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde ihtiyaç doğurmaktadır. Zırh çeliğinde kaynak yöntemi olarak lazer kaynağı seçilmiştir. Lazer kaynağının, yüksek ısı yoğunluğuna sahip olması ve oluşturduğu ışının odaklanma çapının küçük olması bu seçimin başlıca sebebi olarak gösterilebilir. Kaynak bölgesinin içyapısının değişimi oldukça dar bölgede olduğu gözlenmektedir. Bunun yansıra, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) geniş olması neticesinde sert tane büyümesi ve metalürjik hasar bu kaynak yöntemiyle en aza inmektedir. Bu çalışmada; Ramor600 zırh çeliğini lazer kaynak yöntemi ile kaynak edip, kaynaklı bölgenin ve kaynaktan ötürü oluşan ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) deki değişim ve kaynaklı bölgenin mekanik özellikleri, mikro sertlik, çekme, basma ve çentik testi gibi testlerin sonucunda tespit edilmeye çalışılacaktır. Ayrıca deneyin doğruluğunu test etmek, parametrelerin etki oranını belirlemek, zaman ve maliyetten gelecek araştırmalar için tasarruf etmek amacıyla test sonuçları Taguchi optimizasyon yöntemi ile değerlendirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre çekme mukavemeti ve çentik darbe mukavemetinin varyasyon analizi tablosu oluşturulmuştur. Bu tablolarda etken parametrelerin yüzde etki değerleri verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ramor600, Lazer Kaynağı, Zırh Çelikleri, Anova, Taguchi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF RAMOR600 STEEL JOINT WITH LASER WELDING

Karaşin, Mehmet Nur
MSc in Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Haluk Kejanlı
June 2022, 69 pages

Ramor armor steels, which come to the forefront in terms of their strength and hardness and ballistic properties, are the steels preferred worldwide for protection from armed attacks or explosions. Ramor armor steels; Different models such as Ramor500, Ramor550 and Ramor600, which are numbered over HBW hardness degrees. These armor steels are produced to absorb the impacts caused by the explosion pressure and high speed. Ramor600, which is the subject of this thesis, is an extra-high hardness ballistic protection steel, which can be 3 and 6 mm thick and presented with a nominal hardness of 600 HBW. Explosion resistance, high hardness and ballistic values, Ramor armor steels; It creates a need in the defense industry, heavy industry, aviation, space and automotive industries. Laser welding was chosen as the welding method in armor steel. The main reason for this choice can be shown as the high heat density of the laser source and the small focusing diameter of the beam it creates. It is observed that the change in the internal structure of the weld zone is in a very narrow region. In addition, hard grain growth and metallurgical damage are minimized with this welding method, as the heat affected zone (ITAB) is large. In this study; By welding Ramor600 armor steel with laser welding method, the change in the welded region and the heat affected region (ITAB) due to welding and the mechanical properties of the welded region will be investigated as a result of tests such as microhardness, tensile, compression and notch tests. In addition, the test results were evaluated with the Taguchi optimization method in order to test the accuracy of the experiment, to determine the effect ratio of the parameters, and to save time and cost for future research. According to the results obtained, a variation analysis table of tensile strength and Charpy impact strength was created. In these tables, the percent effect values of the active parameters are given.

Keywords: Ramor600, Laser Welding, Armor Steel, Anova, Taguchi

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze tüm canlılar dürtüsel bir davranış biçimi olan korunma ihtiyacını hissetmiş ve bu davranış biçiminin sonucu olarak çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Örneğin kirpilerin derilerindeki dikenler, kokarcaların tehlike anında ağır bir koku yayması, balon balığının şişmesi, bukalemunların renk değiştirerek kamufle olması, kaplumbağaların sert kabuklarının altında gizlenebilmesi gibi yöntemler canlıları korumuş ve yaşamlarını sürdürmelerine yardımcı olmuştur.

İnsanlar için kullanılan savunma sanayisinin gelişmesinin bir sonucu olarak kılıçlar ve kalkanlar kalkmış yerlerini silahlar, füzeler ve bunlara uygun zırhlara bırakmıştır. Bu teknolojinin menzilleri genişleyip hasar oranı artarken zırh teknolojisi de yoğunluğunu düşürmüş ve dayanımını artırmıştır.

Zırh çeliklerinin kullanım alanları gittikçe yaygın ve önemli hale gelmiştir. Zırhların imalatında ve tamirinde uygulanacak bir işlemde zırhın özelliklerinin kaybolmaması istenmektedir. Özelliklerini en üst düzeyde koruyabilecek yöntemlerden ilki kaynak yöntemidir. Dolayısıyla zırh çeliklerinin kaynaktan sonra özelliklerinin kaybedilmemesi ve kaynaklarının hızlı, kolay şekillerde yapılabilmesi için kaynak türlerinin denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada uygulanacak yöntemlerle özel zırh çeliğinin kullanım alanının artması ve kullanım kolaylığı gibi diğer birçok etkileri gösterilecektir.

Kaynak yöntemi olarak seçilen lazer kaynağı; kaynaklı imalatın en yenisi ve en yüksek kaynaklanabilirlik oranı sağlayan yöntemidir. İlk olarak Albert Einstein tarafından temelleri atılan bu yöntem 1967 yılında geliştirilmiştir ve temel anlamda yüksek bir enerji ile en az iki malzemenin ergitilip birleştirilmesine dayanmaktadır. Lazer kaynağında bu enerji lazer ışınından gelmektedir. Bu ışınlar kirişlerin, kısa ve dar köşelerin, derin yerlerin kaynaklanabilmesinde kolaylık ve yüksek oranda kaynaklanabilirlik sağlar. Işının en büyük avantajı yönlendirilebilir olmasıdır. Deformasyon ve çapak gibi olumsuzluklar bu yüzden yok denecek kadar azdır. Lazer kaynak işlemi, yeni ürün tasarımı için büyük bir potansiyel sunuyor.

Diğer kaynak işlemleriyle (ark kaynağı, katı hal kaynağı, endüksiyon kaynağı, sürtünmeli karıştırma kaynağı, vb.) karşılaştırıldığında, lazer kaynağı iş parçasına daha az ısı yükler, bu da küçük bir ısıdan etkilenen bölge ve düşük panel distorsiyonu ile sonuçlanır.

Lazer kaynağı sırasında, malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlılığı faz geçişi (yani erime ve buharlaşma), lazer ışığının emilmesi ve plazmada yansıması gibi karmaşık olaylar çok kısa sürede meydana gelir. Kaynak deneylerine dayanan geleneksel deneme yanılma yaklaşımları, lazer kaynak sürecini optimize etmek için birçok zorlukla karşılaşmıştır. Lazer kaynağının endüstriyel uygulamalarını genişletmek ve işlemi daha güvenilir hale getirmek için uygun kontrol tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Elbette her kaynak yöntemi gibi çeşitli dezavantajları mevcuttur. Lazer kaynağının başlangıç maliyetinin yüksek olması, kaynak yapılacak yüzeylerin düz olması, kaynak yapılacak malzemenin yansıtıcı özelliğinin olmamasının istenmesi örnek olarak gösterilebilir.

Önerilen bu tez çalışmasının konusu; Ramor600 zırh çeliğinin lazer kaynağı ile kaynak edilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ile lazer kaynak yönteminin özel zırh çeliklerinden olan Ramor600 zırh çeliğine uygunluğunun tespit edilmesidir. Yapılacak çekme, mikro sertlik, eğme ve çentik testlerinden sonra ise lazer kaynağının Ramor600 çeliğinde uygunluğunun görülmesi planlanmaktadır. Bu aşamalar doğrultusunda kullanılan zırh çeliğinin kaynağının daha iyi, daha kaliteli ve daha hızlı şekillerde yapılabilmesi kullanıldığı savunma sanayinde büyük önem arz etmektedir.
Savunma sanayi başta olmak üzere diğer birçok alanda kullanılması kaçınılmaz olan zırh çeliklerinin lazer kaynağı gibi uygulanabilirliği yüksek bir kaynak türü ile denenmesi ve sonuçlarının incelenip buna uygunluğunun tespitinin yapılması literatüre katkı sağlamaktadır.

Özel zırh çeliklerinden olan Ramor600 zırh çeliğinin lazer kaynak yöntemi ile kaynak edilmesi ve kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerinin amacı, özel üretim olan ve savunma sanayi gibi önemli alanlarda kullanılan bu özel zırh çeliğinin kaynak

edildikten sonra kaynak bölgesinin, çeliğin kendi mekanik özelliklerine en yakın değerlerde tutabilen kaynak türünün bulunmasıdır. Uygulanabilirliği, uygulama hızı ve uygulama maliyeti gibi birçok parametrenin de değerlendirilmelerinin yapılması planlanmaktadır.

Savunma sanayi, ağır sanayi, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan Ramor600 zırh çelikleri birçok artı barındırmaktadır. Hafifliği ve inceliğine rağmen 570-620 HBW arasında nominal sertlik düzeyinde ekstra yüksek sertliğe sahip bir balistik zırh çeliğidir. Dolayısıyla bu özel zırh çeliğine yapılacak uygun bir kaynak tekniği birçok alanda Ramor600 çeliğinin kullanılmasını kolaylaştırıp yaygınlaştırabilecektir. Zırh çeliklerinin kaynaklarının hızlı, kolay şekillerde yapılabilmesi için kaynak türlerinin denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi gerekmektedir. Savunma sanayii başta olmak üzere diğer birçok alanda kullanılması kaçınılmaz olan zırh çeliklerinin lazer kaynağı gibi uygulanabilirliği yüksek bir kaynak türü ile denenmesi ve sonuçlarının incelenip buna uygunluğunun tespitinin yapılması gerekmektedir. İhtiyaç duyulan önemli bir zırh çeliği olarak, Lazer kaynağında deney parametrelerin kaynak üzerindeki etkileri, uygulanacak olan mekanik testler ile kaynaktan sonra değişen mekanik özellikleri incelenecek olup, mikro yapı özellikleri, analiz edilecektir.

Savunma sanayi, ağır sanayi, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan Ramor600 zırh çeliğinin lazer ile kaynak edilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Ramor600 hafiflik ve incelik bakımından endüstrinin birçok alanında kullanıma ihtiyaç olunan önemli bir zırh çeliği olarak, mekanik özelliklerinin negatif yönde değişmediği bir kaynak türü ile kaynak edilmeye ihtiyaç duymaktadır. Lazer kaynağında deney parametrelerin kaynak üzerindeki etkileri, uygulanacak olan mekanik testler ile kaynaktan sonra değişen mekanik özellikleri incelenecek olup, mikro yapı özellikleri, analiz edilecektir.

Temel olarak iki ana hedef Ramor600 zırh çeliklerinin temin edilerek lazer kaynak yöntemi ile kaynak edilmesi ve farklı lazer kaynak parametreleri belirlenerek ve lazer kaynak yöntemi ile kaynak edilmesi şeklinde sıralanabilir. Bu iki ana hedef çerçevesinde kaynak bölgesinin mekanik özellikleri ile kullanılan numunenin mekanik özelliklerine benzer gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Karagöz ve Atapek 2007 yılında yaptıkları çalışmada, mikro yapısal özellikleri ve Farklı ısıl işlem uygulandıktan sonra bor katkılı çeliklerin test sonuçları içinde ayrıca darbe testi sonrasında kırılma yüzeylerinin kopma özelliğini belirledi. Darbe testinden sonra, yeni tasarlanan mikro yapının sertleştiği fark edildi ve temperlenmiş çelik oldukça homojendir. Öte yandan, elde edilen test sonuçları tatmin ediciydi [1].

Bekçi vd., 2021 yılında yaptığı çalışmasında da görebildiğimiz gibi, Zırh çeliği gibi metaller maliyet etkinliği, güç ve üretim kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan anti-balistik malzemelerdir. Çelik metal levhalar olarak kullanılan RAMOR500 gibi balistik kalkanlar düşük alaşımlı veya orta alaşımlıdır su verilmiş ve temperlenmiş, sıcak haddelenmiş çelik levhalardır. Kimyasal bir sonuç olarak bileşim (çözelti güçlendirme ve çökeltme güçlendirme), termo-mekanik işlem ve ısıl işlemler uygulanarak yüksek mukavemetli sertlik ve tokluk ile çelikler elde edilir. Bu zırh çelikleri, esas olarak hastaneler, zırhlı araçlar, mobil ordu kurulumları gibi yüksek balistik direncin, çok büyük önem arz ettiği yerlerde, patlama koruması için geliştirildi [2].

Klenam 2021 yılında ki çalışmasında; Yüksek mukavemetli su verilmiş ve Temperlenmiş çelik (HSQTS), yaygın olarak, yüksek mukavemet ve sertlik gibi özelliklerinin kombinasyonu sonucu olduğunu belirtmiştir [3].

Gelişmiş kompozit koruyucu malzemeler süneklik ve düşük fiyat ile karşılaştırıldığında, su verilmiş ve temperlenmiş RAMOR500 çelik, daha fazla ısıl işlem uygulanarak, HAZ'da yüksek mekanik özellikleri (yumuşama) kaybetmeden ark füzyon kaynaklı bağlantılarla elde etmeyi zorlaştırdığı için, bu alanda kullanım için tasarlanmamıştır [3-5].

Savic ve Cabrilo 2021 yılında yaptıkları çalışmada, RAMOR500 çeliğine kaynak işlemlerinin, örneğin kiriş kaynak yöntemleri gibi nispeten düşük ısı girdisi ile kaynak yapılması beklendiğini ifade etmişlerdir [6].

Anahtar deliği tekniği ile lazer kaynağı gerektirir. Kenarları bir araya getirmek için hassas şekillendirme (örneğin taşlama ile) herhangi bir mesafe olmadan pratik olarak kaynak yapmadan önce, bu tür bir yaklaşım laboratuvar ortamı koşullarında zırhlı araçların kaynağı için yapısal elemanların hassas üretimi mümkün olmakta, ancak ekonomik olarak uygun değildir. Ayrıca zor uzun mesafeli kaynaklarda kaynak termal deformasyonları nedeniyle, hibrit lazer ark kaynağına (HLAW) rakip ve kesinlikle daha ucuz alternatif, PTA-MAG hibrit ark kaynağı olabilir [7, 8].

Skowrońska ve arkadaşları, 2022 yılında yaptıkları çalışmada, 6-7 mm kalınlığındaki RAMOR500 çelik levhaların kaynağı için PTA-MAG hibrit kaynağının kullanılması, diğerlerinin yanı sıra, kaynak dikişlerinin sayısının 3'ten (yalnızca MAG kaynağı için) 1 dikişle sınırlandırılmasına HAZ'da ve bu alanda yumuşamanın azaldığını göstermiştir. Bu nedenle, RAMOR500 zırh çeliğinin kaynağı sırasında HAZ'daki mikro yapının bozulmasını azaltmak için bir yöntem olarak Plazma-MAG hibrit seçilmiştir [9].

Liu ve arkadaşları, 2016 yılında yaptıkları çalışmada, şu anda plazma anahtar deliği kaynağı, modern çelik kalitelerinden karmaşık geometri kaynaklı yapıya sahip büyük boyutların üretildiği çeşitli endüstri türlerinde ilginç kaynak işlemi olduğunu ifade etmişlerdir [10].

Memiş, 2016 yılında yayınladığı çalışmasında, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte zırh çeliklerinin çeşitli kullanım alanlarına optimizasyonu yapılması halinde verimliliği arttıracağını ifade etmiştir. Örneğin, Otomotiv sektöründe de araç aydınlatması için kullanılmaktadır. Bir beton mikserine monte edilen ekipman, yapısal çelikten daha ince bir plaka ile Ramor500 çeliği kullanılarak üretilebilir. Bu, daha dinamik verimlilik ve yakıt tasarrufu sağlar [11].

You ve arkadaşları, 2013 yılında yayınladığı çalışmalarında, Lazer kaynak işlemi sırasında algılama üzerine araştırmaların, yirmi yıl kadar erken bir tarihte çok sayıda bilim insanı tarafından gerçekleştirildiğini ifade etmiştir. Bununla birlikte, önemli sensör maliyeti, düşük cihaz doğruluğu ve zayıf algılama verimliliği nedeniyle

deneysel bulgular endüstriyel üretime yakın tarihe kadar yaygın olarak uygulanmasını zorlaştıran faktörlerdir. Ürün işleme için çok az sayıda işletmenin lazer kullanması, lazer süreç izlemenin daha da geliştirilmesini kısıtlayan bir diğer önemli faktör olarak kabul edilir. Lazer cihazının fiyatı düştükçe lazer teknolojisi endüstriyel alanlarda geniş kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Seri üretim sırasında, kaynak işlemi üzerinde etkili gerçek zamanlı izleme, üretim maliyetini düşürmeye ve üretim kalitesini iyileştirmeye yardımcı olabilir [12].

Ramor zırh çeliklerinin öne çıkan mekanik özelliklerinden sertlik ve sağlamlıkları sayesinde balistik özellikler açısından dünya çapında tercih edilmektedirler. İsminde geçen zırh sözcüğünden anlaşılacağı üzere silahlı saldırlar yahut patlamalardan korunmak için üretilen özel çeliklerdir.

Bahsedilen bu özel çeliklerin, Ramor 400-450-500-550 gibi varyasyonları bulunmaktadır. 400-550 arasında numaralandırılan bu numaralar ilgili çeliğe ait HBW sertlik değerlerini ifade eder. Ramor400 ve Ramor450 zırh çelikleri daha çok patlama esnasında oluşan basınca dayanabilmeleri amacıyla üretilmekte olup, Ramor500 ve Ramor550 zırh çelikleri ise yüksek hızda oluşan darbeleri absorbe edebilmeleri amacıyla üretilmektedir [13]. Manganello 1972 yılında yaptığı çalışmasında, çeliğin balistik performansını en çok etkileyen faktörün sertlik olduğunu ortaya koymuştur [14]. Zengin 2010 yılında kaleme aldığı tez çalışmasında, Ramor500 zırh çeliği üzerinde elektrik ark kaynak yöntemi ve elektrotu ile dört farklı ön tav sıcaklığında kaynaklı birleştirme işlemi uygulamıştır. Bu işlem sırasında, oluşan birleştirme bölgesinin mikro yapısı ile mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapmış olduğu tüm bu deneyler neticesinde kaynaklı birleştirilen numunelerin hepsinde akma ve çekme dayanımlarının artan ön tav sıcaklığıyla birlikte azaldığı, sünekliğin ise arttığı sonucuna varmıştır [15].

Chandel ve arkadaşları, 1997 yılında yaptıkları çalışmalarında, tozaltı kaynağında; akım şiddeti, elektrot polarizasyonu ve çapı ile elektrot uzantısının; dikiş yüksekliği-genişliği ve nüfuziyet üzerindeki etkisini ön gören bir yazılım ortaya koymuşlardır. Bahsedilen bu yazılım, kaynak dikiş geometrisini ön görmek için kullandıkları algoritmaya dayanmaktadır [16].

Bugün genellikle kaynak işlemlerinde kullanılan ve çok güçlü bir yöntem olan CO2 yöntemi C. Kumar, N. Patel tarafından bulunmuştur [17]. Tez çalışmasının temel faktörlerinden olan lazer kaynağı işleminin en önemli noktalarından biri, bağlantısı yapılacak olan malzemelerin ve dolgu maddesinin özelliklerinin aynı yahut birbirine oldukça yakın olarak seçilmesidir [18]. Lazerle kaynak işleminin kalitesi, lazer parametreleri ve işlem şartlarına çok yakından bağlıdır. Bu parametreler kullanılacak lazerin tipini, iş parçası üzerine lazer demetinin odaklanma biçimini, güç dağılımını vb. ifade eder. Lazer parametreleri daha ayrıntılı olarak ifade edilirse; demet biçimleyici merceklerin odak uzaklığı, odak leke boyutu, odak derinliği, demet genişliği ve kararlılıklarını kapsarlar. İşlem parametrelerine gelince bunlar; kaynak hızını, malzeme seçimini, kaynatılacak malzemelerin sabitlenmesini, kaynak şeklini, kaynak bölgesinin temizliğini, koruyucu ve yardımcı gazların tipini ve saçılmaya karşı niteliklerini kapsar [19].

Bu çalışmada Ramor 600 zırh çeliği Lazer kaynağı kullanılarak kaynak ile birleştirilecektir. Deney numunelerin kaynak bölgesinin mikro görüntüsü, mikro sertlik, çekme testi, çentik testi, basma, testi ve eğme testi sonuçları incelenecek. Farklı parametrelerle lazer kaynağı yapılan Ramor600 zırh çeliğinin, gerçek mekanik değerleri ile kıyaslamak için Nümerik analiz sonuçları irdelenecektir.

Kenar, yüksek lisans tezinde Grade 5 titanyum malzemesini önce lazer kaynağı ile birleştirmiştir. Daha sonra 1'i işlem görmemiş numune olmak üzere birleştirilmiş numuneleri 4 farklı tavlama sıcaklığı (400, 500, 600, 900 ^{o}C), 2 farklı bekleme süresi (30 dk ve 60 dk.), hava ve su ortamında soğutulmuş şekilde deneysel parametreler uygulanarak 18 numune elde edilmiştir. Çekme ve sertlik testine tabi tutularak incelenen bu numunelerde lazer kaynak işleminin malzemenin yapısında bazı değişikliklere yol açarak malzemenin mekanik özelliklerini değiştirdiği saptanmıştır. Oluşan bu olumsuzluğu gidermek için malzemeye gerilim giderme tavlaması, su verme ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış ve çekme testinde olumlu yönde düzelmeler tespit edilmiştir.

Lazer kaynağın dezavantajı olarak; kaynak kalitesini belirleyici parametrelerin operatör tarafından seçilmesinin aynı kaynak bölgesi üzerinde farklı değerler oluşturacak kaynak nüfuziyetinin gözlenebileceği belirtilmiştir.
Çalışmasında kaynaktan sonra uygulanacak bu gibi ısıl işlemlerle mekanik özelliklerin iyileştirilebileceğini söylemiştir [20].

Yavuz, doktora tezinde galvanizli sac levhalar kullanmış ve bu levhaları lazer kaynak ve gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirmiştir. Bu iki kaynağı seçmesindeki temel etkenin gazaltı kaynağının yaygın olarak kullanılması, lazer kaynağının ise yeni ve geliştirilebilir bir kaynak yöntemi olmasının etkisi olduğunu belirtmiştir. Elde ettiği numuneleri radyografik tahribatsız muayene ve çekme testine tabii tutmuştur. Sonuç olarak galvanizli sac levhaların gazaltı kaynağı ile kaynaklandığında mekanik özelliklerindeki değişimin daha olumlu olduğu belirtilmiştir. Lazer kaynağının avantajı olarak, kaynağın nozulunda oluşan ısıyı küçük bir alana yaydığını belirtmiş bu şekilde galvaniz kaplamanın üzerinde oluşacak buharlaşmanın da küçüleceği korozyona karşı korunma düzeyini de destekleyeceğini belirtmiştir [21].

3. ZIRH ÇELİKLERİ

Ülkelerden, özellikle gelişmekte olan ülkeler çerçevesinde savunma sanayi çok büyük önem arz etmektedir. Bu sebepten ötürü savunma sanayisi alanında araştırma ve geliştirme çalışmaları her geçen gün artarak devam etmektedir. Dolayısı ile savunma sanayine ayrılan bütçe yükü artmakta ve mali kaynak yükünün artışı ile karşılaşılmaktır. Günümüz çağında teknoloji alanındaki gelişmeler ateşli silahların gelişmesini arttırmakta ve modernleştirmektedir. Teknoloji alanındaki gelişmeler diğer bir taraftan, koruyucu malzemelere olan ihtiyacı arttırmakta olup aynı zamanda bu koruyucu malzemelerin de üretimini kolaylaştırmaktadır [22].

Tablo 3,1'de ateşli silahlara karşı balistik koruma malzemelerini bulunmaktadır. Bu koruma malzemeleri sivil ve askeri alanlarda oluşan tehditlere karşı balistik koruma sağlamaktadır [23]. Silahlara bağlı olarak koruyucu malzeme seçimi değişmektedir. Silahlardan ateşlenen parçacığın türü, merminin türü, genetiği ve birleşme kinetiğine göre yapılır. Belirtilen koruyucu malzemeler arasında, haddelenmesinin homojen olarak gerçekleştirilmiş olması açısından (RHA, Rolled Homogeneous Armor) gibi zırh çelikleri savunma sanayinin birçok alanında, lojistik, alan koruma veya mühimmat sevkiyat gibi platformlarda koruyucu malzeme olarak tercih edilebilir [24].

Tablo 3.1 Delici mermilere karşı zırh çelikleri [23]

Zırh Malzemeleri	
Zırh Çelikleri -RHA (HB 380) -Yüksek sertlik (HB 550) -İlk defa sertleştirilmiş (HB 440-600)	**Cam Takviyeli** -E cam -S cam
Alüminyum -5083 alaşımı -7039 alaşımı -2519 alaşımı	**Seramik** -Alüminyum oksit -Alüminyum oksit + Al -Bor karbür -Bor karbür + Al -Titanyum diborür
Kompozit (Seramik Yüzeyli Çok Katmanlı) - Al + RHA - Çelik + RHA - E cam + RHA	

3.1 Zırh Teknolojisi

Savunma sistemleri düşünüldüğü zaman öne çıkan ana unsurun ‘zırh’ olduğu söylenebilir. Bu hususta aranan optimum parametler; Yüksek sertlik değeri ve kırılganlığı düşük malzemeler olduğu ifade edilebilir. Tasarımlarda Zırhların uygulanması gerçekleştirilirken, modern olması ve her anlamda modüler kullanım ön plana çıkmalıdır. Dolayısı ile kompozit malzemelerden seramik içeren zırhların günden güne yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Kullanılan malzemelere ek olarak zırh teknolojisini etkileyen parametreler aşağıda ifade edilmiştir. Bu parametrelerinde zırh malzemelerinde bir bütün içerisinde düşünülmesi zırh teknolojilerinden elde edilecek verim ve teknolojisinin doğru okunabilmesi açısından önem taşımaktadır.

• Dökümantasyon ve kapsamlı bilgi
• Modelleme, benzetim unsurları ve tasarım
• Test unsurları ve sonuçları
• Entegrasyon ve atışlı denemeler.

Savunma sistemi içerisindeki en önemli parametrenin ‘zırh’ koruması olduğu daha önce de ifade edildiği üzere; Savunma sistemi, farklı yüzeylere (Lojistikte motor koruması amacı ile araç motorunun etrafı, mühimmat sevkiyatı düşünülecekse aracın tümü, belirli alan savunması açısından kuleler vb.) savunulabilmesi amacı ile her tür mühimmatlara karşı elde edilmesi istenen yüksek koruma açısından büyük önem arz etmektedir. Bu hususta aranan optimum özelliklerinin; Yüksek sertlik değeri ve kırılganlığı düşük malzemeler olması beklenir. Belirtilen özelliklerinin yanı sıra sahip oldukları ağırlıkları da en önemli etmenlerden biridir. Oluşabilecek muhtemel tehditlerin, daimî olarak değişebileceği göz önünde bulundurulduğunda yüksek ilave ağırlık bir dezavantaj yaratmaktadır. Bu sebepten ötürü zırh koruması istenilen yerlerde (Özellikle araçlarda) yüzdelik olarak 15 ile 20 arasında ilave ağırlıkları beraberinde getirebildiği unutulmamalıdır. Örnek olarak M1 Abrams tankları 54 tondan 64 ton ağırlığa çıkmıştır. Örnekte de belirtildiği gibi bir ağırlık artışı; Araçların üretimi sürecinde; manevra kabiliyeti, maksimum hız, maksimum hızlanma, yakıt sarfiyatı, araç mekanik parçalar dayanımı gibi birçok değeri değiştireceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Savunma sisteminin önemli bir parçası olan lojistik alanında birçok etkeni değiştireceğinden ötürü zırh malzemeleri üzerinde hafifletme çalışmalarının öneminin arttığı ifade edilebilir. Gelişmiş zırh malzemelerini aşağıda ifade edildiği gibi üç ana başlıkta inceleyebiliriz:

(a) İleri metalik zırhlar,

(b) İleri seramik kompozit zırhlar,

(c) Polimer kompozit zırhlar,

Kompozit zırhlardan, seramik içeren kompozitler modüler kullanım uygunluğunun yüksek olması sebebiyle daha popüler bir konumda durmaktadır. Zırh çelikleri Cr, Mn, Ni, Mo içeren düşük alaşımlı ve kompleks termo mekanik işlemlerden sonra özel ısıl işlem görmüş çelikler olarak ifade edilmesinin (MIL-A-9 12560-Rolled Homogeneous Armor, RHA, haddelenmiş homojen zırh çeliği) yanı sıra zırh malzemeleri birçok farklı kapsamda incelemek mümkündür. Zırh çeliklerinin sertliğinin artmasına önemli etkide bulunan elementlerin başında Mangan gelmektedir.

Tablo 3.2. 7.62 ve 14.5 mm AP mermilerine karşı zırh malzemelerinin yoğunluk ve kütle verim değerleri gösterilmiştir [25].

Zırh Malzemesi	Yoğunluk, g/cm3	Alansal yoğunluk, kg/m2	Kütle Verimi, Em
Çelik *			
- RHA (Sertlik 380 BHN)	7.86	114	1.00
- Yüksek sertlik (550 BHN)	7.88	98	1.16
- İki defa sertleştirilmiş (440-600 BHN)	7.88	64	1.78
Alüminyum			
- 5083 alaşım	2.70	128	1.0-1.2
- 7039 alaşım	2.78	106	1.08
- 2519 alaşım	2.80	100	1.14
Cam Takviyeli *			
- E cam	2.08	115	0.74
- S cam	2.05	93	1.23
Seramik *			
- Alümina	3.56	-	-
- Alümina + Al	3.20	42	2.75
- Bor karbür	2.45	-	-
- Bor krabür + Al	2.56	35	3.26
- Titanyum diborür	4.45	-	-
Kompozit (seramik, katmanlı)			
- Al + RHA	-	137	2.63
- Çelik + RHA	-	131	2.75
- E cam + RHA	-	125	2.88

3.2 Zırh Çeliklerinin Özellikleri

Savunma çerçevesinde korumaya ihtiyaç duyan araçların zırh ile kaplanmasında, zırh çeliğinin aşağıda belirtilen özelliklerde olması aranır [26].
Patlayıcı ve mermi saldırılarına karşı yüksek dayanım, üretim kolaylığı ve uzun kullanım süresi aranan başlıca özelliklerdir. Balistik darbeye dayanım, yüksek tokluk dayanımı arttırmaktadır. İstenen diğer bir özellik ise zırh çeliklerinde darbe tokluğunun iyi olmasıdır [27].

Savunma sisteminde kullanılması istenen araca zırh kaplatılması düşünüldüğünde üretim zorlukları unutulmaması gereken bir unsurdur. Bu zorluğun asgari düzeye indirilebilmesi için gerekli metalürjik özelliklerin sağlanması gerekmektedir. Tablo 3.3 'de farklı üretim aşamaları için değişen metalürjik koşullar gösterilmiştir. Mukavemet ve sertlik şartları ise daha çok orta karbonlu çeliklerin tercihiyle sağlanabilmektedir. Daha iyi bir kaynak edilmesi amacı ile yapılmış olan tercihte 'C' değeri sınırlandırılmıştır. İşlemin son aşaması olarak uygulanan temperleme ve sertleştirme işlemleri ile tokluk ve mukavemetin dengelenmiş olmaktadır [26].

Zırh uygulamasının uygulanacağı araçların farklı ve zorlu alanlarda (arazi vb.) çalışılması düşünüldüğü zaman araçların ağırlığından, her türlü balistik performansları göz önünde bulundurulmalıdır. Maruz kalınacak bölgelerin yorulma direncinin yüksek olması beklenir. Gerilmeli korozyon problemi sert zırh çeliklerinde (> 500 HB) ortaya çıkabilir. Gerinimli bölgelerin korozif bir ortama maruz kalması sonrası korozyon oluşumu artar. Yapılan çalışmalar neticesinde, zırh çeliğinde erişilen sertlik 500HB-600HB olarak ölçülmüştür. Mukavemet ve sertliğin yükselmesi sonrasında, toklukta azalmalar görülmeye başlanmıştır. Zırh çeliklerinde tokluğun azalması sonrasında yeniden metalürjik işlemler uygulanıp fosfor ve kükürt' ün seviyeleri düşürülmüştür [28, 29]. Termo mekanik işleme ve hammadde kontrolü yöntemlerinin uygulanarak zırh çeliği üretiminde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanmıştır [28-30].

Tablo 3.3 Zırh Çeliklerinde imalat işlemleri doğrultusunda istenen özellikler [26].

	İmalat İşlemleri			
	Isıl kesme	Kaynak	Talaşlı İşlem	Şekillendirme
Gerekli Metalurjik Özellikler	-Düşük karbon eşdeğeri -Sınırlı segregasyon -Çok düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilmesi	-Düşük karbon eşdeğeri -Düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilmeleri	-Yüksek olmayan sertik	-Yüksek süneklik

Belirtilen zırh çeliklerinin ayrıca temperlenmiş ve su verilmiş düşük alaşımlı çeliklerdir. Sınıf I tipi olarak belirtilen çelikler çoğu araç uygulamalarında kullanılan neredeyse standart zırh çeliklerdir. Sınıf II tipi çeliklerin ise, Sınıf I'e benzer bir kimyasal birleşime sahip oldukları söylenebilir. Ancak Sınıf II tipi çeliklerin nüfuziyetten çok, şok darbeleri için kullanılmak üzere kullanıldığından ötürü daha yüksek seviyede temperlenir. Yüksek sertlik içeren çelikler ise genellikle ağırlığın azaltılması amacı ile kullanılır. Ek olarak nüfuziyet direncinin önem arz ettiği durumlarda kullanılır.

Belirli bir şekle sahip olmayan veya diğer bir şekilde standart biçimler ile ifade edilmesi güç olan parçalarda ise karmaşık şekle sahip olmaları sebebi ile döküm malzemeler kullanılır. Bir kıyaslama yapmak gerekirse, düşük sertlikli zırh çeliği (standart çelik) ile yüksek sertliğe sahip zırh çeliklerinin balistik performansı %20 daha yüksek çıkmıştır. Diğer bir taraftan yine düşük sertlikli zırh çeliği ile kıyaslandığı zaman döküm malzemesinin %13 daha düşük olduğu görülmüştür [31].

Tablo 3.4'te bazı zırh çeliklerinin balistik performansları verilmiştir. Ayrıca yine seçilen zırh çeliklerine ait mekanik özellikler verilmiştir [31].

Zırh çeliği türü	Sertlik (HRC)	Tokluk	Balistik Performans	Alaşım Kimyası	Karbon Eşdeğeri
Sınıf I (MIL-A-12560)	34-40	21,6	1,00	Mn-Mo-B	0,64
Sınıf II (MIL-A-12560)	29-34	28	Şok direnç	Mn-Mo-B	0,64
Yüksek Sertlikte Plaka (MIL-A-46100)	50-53	13,5	1,20	Cr-Ni-Mo	0,85
Döküm (MIL-A-113596)	32-38	16,3	0,87	Cr-Ni-Mo	0,78

3.3 Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi

3.3.1 Zırh çeliklerinde alaşımlama

Tablo 3.5' te bazı zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir [32, 33]. Tablo 3.5' deki çeliklere ait mekanik özellikler ise Tablo 3.6'da gösterilmiştir [32, 33]. Birçok alanda gerçekleştirilen uygulamalarda MILA-12560 çeliği kullanılmakta olan standart zırh çeliğidir. MIL-A-46100 çeliği ise daha yüksek sertliğe sahip olduğu için MIL-A-12560"a göre %20 daha etkili olan (14.5 mm AP) zırh çeliğidir. Tablo 3.5'te verilen alaşım elementleri ise görüldüğü üzere çelikler, alüminyum, titanyum, niyobyum, vanadyum, bor elementleri gibi mikro alaşım elementleri de içerebilir.

Tablo 3.5 Zırh çeliğinin kimyasal birleşimleri [32].

Kimyasal Bileşim (%)	MIL-A 12560 (Mars 190)	MIL-A 46100 (Mars 240)	MIL-A 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH 129	Armox 440 T
Karbon	< 0.30	< 0.30	0.37 maks.	0.45-0.55	0.26-0.32	0.21
Mangan	1.20	0.95	0.90	0.3-0.7	0.1-0.4	1.2
Kükürt	0.005	0.005	0.005	0.005	≥0.01	0.01
Fosfor	0.012	0.012	0.012	0.012	≥0.015	0.01
Silisyum	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.4	0.6-1.0	0.1-0.4	0.1-0.5
Nikel	1.80 maks.	1.85 maks.	3.00 min	4.5 maks.	-	2.5
Krom	1.00	1.6	1.90 maks.	0.4 maks.	1.0-1.5	1.00
Molibden	0.3-0.5	0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.1-0.5	0.7

Tablo 3.6 Zırh çeliğinin mekanik özellikleri [33].

Özellik	MIL A 12560 (Mars 190)	MIL A 46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH129*		Armox 440 T
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601	578-655	400-450	480-530	420-480
ζy (MPa)	1150	1100	≥1100	≥1300	1200	1300	≥1100
ζT (MPa)	1250	1600	≥1700	≥2000	1375	1600	1300-1500
Uzama (%)	≥10	≥9	≥8	≥6	10	9	≥10
Tokluk	20-30	30 - 40	30	15	16	14	30

Tablo 3.6'da gösterilmiş olan zırh çeliklerinden ilk üç sırada bulunan zırh çelikleri düşük karbonlu olan çeliklerdir. Tabloda bulunan zırh çeliklerinin kimyasal bileşimlerinde bulunan maksimum karbon miktarı %0.3'tür. Zırh çeliklerinin daha düşük seviyede karbon miktarı içermesi ile kaynaklanabilirlik, tokluk yönünden avantaj sağlamaktadır.

Zırh çeliklerinin kimyasal birleşimlerinde düşük karbon içermesi darbe dayanımı açısından büyük önem ifade etmektedir. Çeliklerin kimyasal birleşimlerinde bulunan karbon miktarı kaynak kabiliyetini etkilediği için, zırh çeliklerinin kimyasal birleşimlerinde bulunan karbon miktarı çok önemlidir. Zırh çeliklerinin içerdiği karbon miktarı artışı ile kaynak bölgelerinde çatlak oluşumunun arttığı görülmektedir. Zırh çeliklerinin kaynak bölgelerinde çatlak ve boşluk oluşumları, savunma veya korunma açısından performans negatifliği içermektedir. Bu tür kaynak performansını negatif unsurların etkilerini azaltmak için kaynak sonrası bazı işlemler yapılmasına ihtiyaç doğabilmektedir. Zırh çeliklerinin tokluk ve kaynak özellikleri açısından, karbon değerinin düşük olması önem arz etmektedir. Tokluk, sertlik veya kaynak kabiliyeti gibi bahsedilen özellikler zırh çeliklerinin kullanım alanlarını belirlemekte kullanılan ana özellikleridir. Zırh çeliklerinde yüksek akma dayanımı ve yüksek sertlik değeri içeren düşük karbonlu çeliklerin dışında yüksek karbonlu çelikler de yine kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse karbon miktarı, daha yüksek olan MIL-A-46173 (Mars 270) ve Mars 300 (%0.37-0.55) gibi çelik türleri de, zırhlı araçlarda kendilerine kullanım alanı bulmaktadır [34].

3.3.2 Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyeti

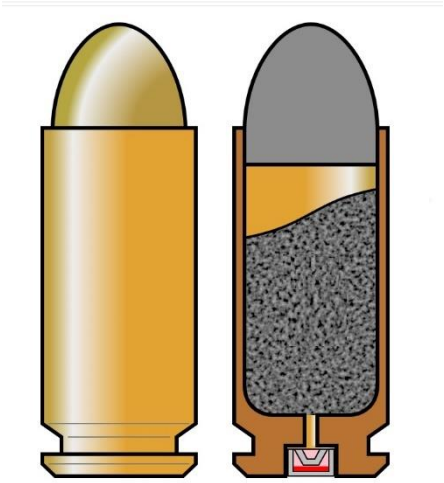
Anık 1991 yılında yaptığı çalışmasında, İmal usullerinde ana parçaların birleştirilirken çalışma koşullarında bozulmamasını ifade etmiştir. Ek olarak konstrüksiyondan istenen özellikleri karşılaması gerekir. Bu gibi beklenen koşulların gerçekleşme derecesi bir başka deyişle gerçekleştirilebilme kolaylığı, kaynaklanmış olan malzemenin "kaynak kabiliyeti" olarak adlandırılır. Uluslararası kaynak enstitüsü ise Kaynak kabiliyetini şu şekilde ifade etmiştir: "Metalik bir alaşım'' belirlenen bir yöntem ile bir amaç için bir dereceye kadar kaynak yapılabilir. Kullanılan kaynak yöntemi kullanılarak kaynaklı bağlantı elde edilmesi halinde, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkileri bakımından tayin edilmiş bulunan özellikleri ve şartları sağlamalıdır" şeklinde ifade etmiştir [35].

Anık yine aynı yılda yapmış olduğu çalışmasında, Metallerin kaynağında ve alaşımların kaynağında, istisnai bazı uygulamalar haricinde kaynak bölgesinin neredeyse erime sıcaklığı kadar bir sıcaklığa ulaşması gerekmekte olduğunu ifade eder. Bu sebepten ötürü kullanılan ısı kaynağı ve kaynak tekniği büyük önem arz etmektedir. Şöyle ifade edilebilir; Ergitme kaynaklarında kaynak bölgesi sıcaklığını erime noktasının üzerine çıkarmak kaynak bölgesinde anlık ve kısmi erime ile karışımı açısından gereklidir. Isı, alev, ark gibi elektrik direnci veya bir ışın olarak da üretilebilir. Bazı alanlarda ise patlama ile de üretilebilmektedir. Diğer taraftan, otojen kaynak (dolgu malzemesi kullanılmayan kaynak türü) kaynak uygulaması hariç, ilave dolgu kullanılması gerekmekte olup, kullanılacak dolgu maddesi ile metalin birleştirilecek malzeme cinsi mikro yapı ve mekanik özellikleri gibi parametrelere mümkün mertebe yakın olmalıdır. Çünkü kaynak dolgu malzemesi olarak kullanılan tel kaynak metali ve kaynak ısısının tesiri altında kalan bölgede (ITAB) ısı maruzu sebebiyle, kimyasal özellikleri değişime neden olmaktadır. Belirtilen sebeplerden ötürü kullanılacaksa dolgu malzemesi özellikleri, ana numune parçasına yakın olmalıdır [35].

3.4 Balistik Malzemelerin Kısa Tarihi

2. Dünya Savaşı sırasında muharebe sahasında asker zayiat açısından insan hayatı daha önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Yeni silah sistemlerinin geliştirilmesiyle, insan ve araç korumasını iyileştirmek için eski zırh teknolojisinin yenilenmesi gerekli idi. Bu kapsamda, Çift Sertlik Zırhı (DHA), Haddelenmiş Homojen Zırh (RHA), Döküm Homojen Zırh (CHA), Yüksek Sertlik çelik Zırhı icat etti. (HHA) ve sertleştirilmiş alüminyum alaşımlı zırh performansının iyileştirilmesi, penetrasyon mekanizmasının araştırılması konuları üzerinde yoğun mesai harcanmıştır. Terminal balistik kavramının gelişmesiyle birlikte mermilerin özellikleri ve parçalanmaları araştırılmaya başlanılmıştır.

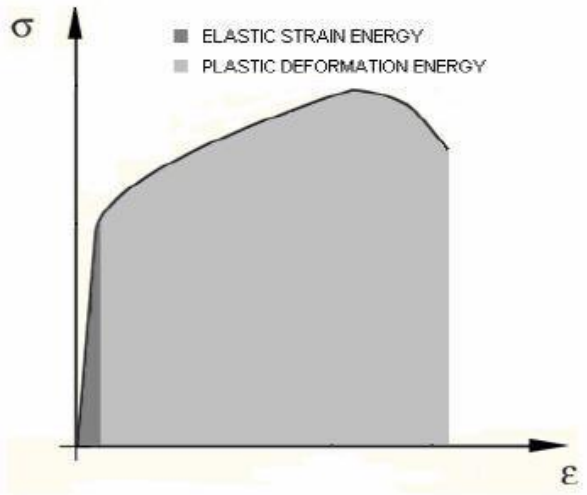
Zırh tasarımları pasif ve reaktif olarak ikiye ayrılabilmektedir. Reaktif zırh, balistik tehdide karşı koymak için kinetik kuvvet kullanmaktadır. Pasif zırh, darbe kinetik enerjisini dağıtmak için malzeme özelliklerini kullanır ve bozucular ve emiciler olarak sınıflandırılır. Yıkıcılar, mermiyi parçalara ayıran ve böylece enerjiyi kullanıcıdan uzaklaştıran zırh sistemlerinin ilk darbe katmanları olarak işlev görür. Mermiyi başarılı bir şekilde aşındırmak için, tehdide kıyasla yüksek mukavemet ve sertliğe sahip malzemelerden bozucular yapılır. Öte yandan, emiciler, plastik deformasyon modları yoluyla kinetik enerjiyi emerek çalışırlar. Balistik bilimi, İç balistik, orta balistik, dış balistik, terminal (hedef) balistik olmak üzere dört bölümde sınıflandırılabilir.



Şekil 3.1 Balistik biliminde kullanılan mermi iç yapısı

3.6 Balistik Biliminde Enerji Emme Kapasitesi

Balistik darbe teorisi, enerji emilimi ile doğrudan ilgilidir. Enerji emiliminin temel amacı, yapıların hasar görmesini önlemektir. Malzeme özellikleri, enerji emilim kapasitelerini yönetmede hayati bir rol oynar. Örneğin metal alaşımları, enerji emiliminde alüminyum alaşımlarından ve seramiklerden daha iyidir. Seramikler, yüksek basınç dayanımları ve düşük yoğunlukları nedeniyle balistik zırh uygulamalarında kullanılmıştır. Ancak, kırılgan davranışları nedeniyle kullanımları yalnızca belirli uygulamalarla sınırlıdır. Metal alaşımları imalat teknolojisi açısından daha kullanışlı olmuştur. Yüksek mukavemet ve düşük kırılganlık, enerji emiliminde metal alaşımları seramiklerden daha iyi hale getirmiştir.



Şekil 3.2 Enerji Emme Kapasitesi [35].

3.7 Ramor Zırh Çelikleri

Ramor zırh çelikleri her türlü patlamadan ve silahla saldırıdan korunmak için üretilmiştir. Ayrıca Ramor çelikleri, sertlikleri ve iyi mukavemetleri nedeniyle mükemmel balistik özelliklere sahiptir. Ramor çelikleri Ramor400, Ramor450, Ramor500, Ramor550 ve Ramor600 olmak üzere 5 farklı grupta üretilmektedir. Numaralandırmada kullanılan rakamlar HBW sertlik değerlerini gösterir. Ramor400 ve Ramor450 patlamadan oluşan basınca karşı üretilmektedir. Ramor500, Ramor550 ve Ramor600 ise yüksek hızlı çarpma için üretilmiştir.

Tablo 3.7'de Ramor çeliğinin mekanik özellikleri gösterilmiştir ve Tablo3.8'de ise Ramor zırh çeliklerinin kimyasal bileşimini gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Ramor Çeliğinin Mekanik Özellikleri [36].

Ramor	Akma Dayanımı (MPA)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %	Sertleşme (HBW)	(^{0}C)	J
Ramor400	1100	1300	8	410	-40	20
Ramor450	1100	1280	9	440	-40	35
Ramor500	1450	1700	7	520	-40	20
Ramor550	1550	1850	7	570	-40	16
Ramor600	1650	2000	7	600	-40	12

Tablo 3.8 Ramor Çeliğinin Kimyasal Birleşimi [36].

Ramor	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B
Ramor400	0.24	0.70	1.50	1.00	1.00	0.70	0.005
Ramor450	0.25	0.70	1.50	1.00	2.00	0.70	0.005
Ramor500	0.32	0.70	1.50	1.00	2.00	0.70	0.005
Ramor550	0.36	0.60	1.40	1.50	2.50	0.80	0.005
Ramor600	0.4	0.7	1.5	1.5	2.5	0.8	0.005

3.8 Ramor 600 Çeliği Kullanım Alanları

Ramor600 zırh çelikleri yüksek hızlı darbelere karşı üretilmektedir. Ayrıca otomotiv endüstrisinde aracı daha hafif hale getirmek için kullanılır. Örneğin, bir akaryakıt tankeri yerleşik ekipmanı, yapısal çelikten daha ince bir plaka ile Ramor600 çeliği kullanılarak üretilebilir. Böylece daha dinamik verimlilik ve yakıt ekonomisi sağlar.

Ramor600 tamamen bükülmeye uygun değildir. Bükülme kapasitesi kalınlıkla birlikte azalır. Örneğin 3mm levha maksimum 30^o bükülebilir. Bu değerler sıcaklığa bağlı olarak değişebilir.

Ramor600 lazer ve plazma kesim için uygundur. Ancak tercih edilen kesme yöntemi su jetidir çünkü kesici kenarın balistik özellikleri balistik özelliklerini kaybetmez.

Mekanik kesme işlemleri seçilirse bazı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Her şeyden önce, kesme bıçakları yeterince keskin olmalıdır. Giyotin kesim için kullanılacaksa, boşluk mesafesi ve kesim açısı dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır.

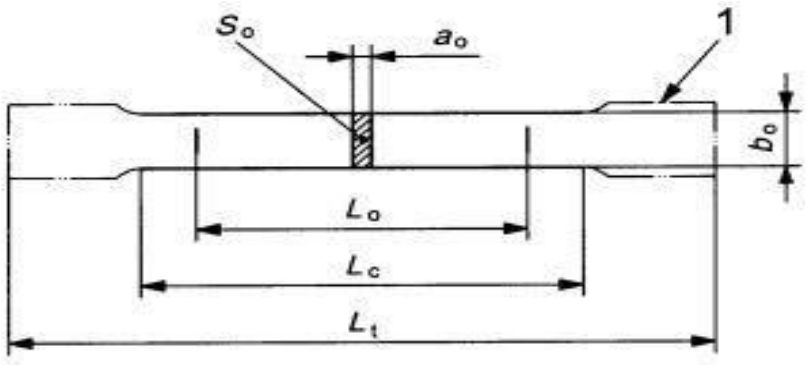
6 mm kalınlığındaki levhalar için levha kalınlığının %8-10'u kadar bir boşluk yeterli iken, 10 mm kalınlığındaki levhalar için %10-15'lik bir boşluk gereklidir.

Ramor çelikleri delme, diş açma, testereyle kesme, frezeleme ve tornalama gibi talaşlı imalat için uygundur ancak işçiler bazı yapılara dikkat etmelidir. Her şeyden önce makine rijit ve stabil olmalıdır. Kullanılan malzeme parçası rijit bir şekilde sıkıştırılmalıdır. Uzun takım tutucular ve mil kullanma mesafelerinden kaçınılmalıdır. Yeterli ilerleme ve kesme derinliği kullanılmalıdır. İşlem sırasında kesme sıvıları kullanılmalıdır. Kuru kesimde kesme hızı daha düşük olmalıdır. İşleme takımları, üreticinin veri sayfası kullanılarak seçilmelidir.

Kimyasal bileşimi ve ısıl işlemi nedeniyle Ramor500 yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Bu özellik, yüksek darbe dayanımının ana nedenidir. Öte yandan, Ramor600 yarı dayanıklı ve yarı kırılgandır. Düşük eğilme kapasitesi kırılganlığı desteklerken, darbe tepkisi ve patlama direnci tokluğu destekler.

Mekanik özellikler sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Çekme testinden önce numune oda sıcaklığında 24 saat bekletilmelidir.

Numunenin ölçümü çekme mukavemeti için çok önemlidir. Öncelikle TS EN ISO 6892-1 kullanılarak numunenin boyutları hesaplanmıştır. Şekil 3.3'te numunenin uzunluğunda gerçekleşen değişimler gösterilmektedir.



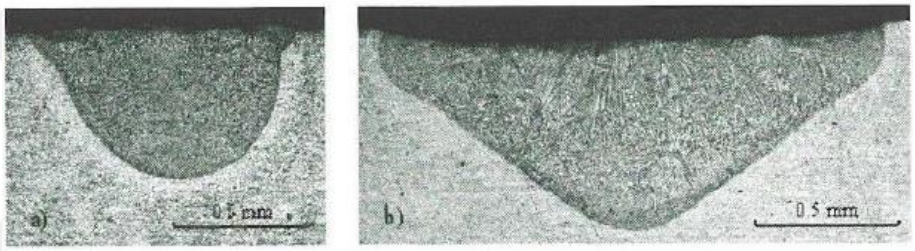
Şekil 3.3 Çekme deneyi öncesi ve sonrası numune sembolik gösterimi [37].

4. MATERYAL VE METOD

4.1 Lazer Kaynak Metodu

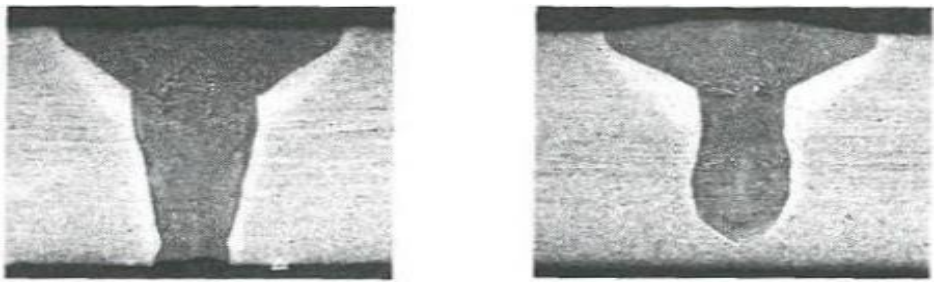
Raporun bu bölümünde çalışmalar daha çok, Lazer kaynağı ilgili toplanan çalışmalara, deneylere ve elde edilen sonuçlara dayanmaktadır; lazer seçiminin ve malzeme özelliklerinin kaynak boyutlarına etkisi açıklanmaktadır. Bu bölüme giriş olarak, metallerin lazerle kaynaklanması sırasında sunulan iki ana kesit şeklini tanımlamak gerekir [38].

- İletim kaynakları. Bu kaynaklar "yarı dairesel" Şekil 4.1 de görüldüğü gibi bir enine kesit şeklinde görünür.



Şekil 4.1 İletim Kaynağı Görüntüleri [38].

- Anahtar deliği kaynakları; İletim kaynaklarına göre daha büyük bir derinlik/genişlik oranı sunan ve Şekil 4.2 de gösterildiği gibi bir kesit şekli benimseyen kaynaklar



Şekil 4.2 Anahtar Deliği Kaynakları Görüntüleri [38].

Lazer kaynak işlemi genellikle karbon çeliklerini kaynaklamak için kullanılır, ancak paslanmaz çelik, nikel bazlı alaşımlar, bakır ve pirinç, alüminyum, refrakter metaller ve benzer olmayan metaller gibi metalürjik olarak uyumluysa farklı türdeki malzemeleri kaynaklamak için kullanılabilir [39].

Lazer kaynak işlemi verimi çeliklerin içerdiği karbon yüzdesine bağlı olarak değişebilmektedir. Düşük karbonlu çelikler. Bu tür malzeme, düşük karbon konsantrasyonuyla, özellikle karbon içeriğinin %0.25'inden daha düşük olduğunda kolayca kaynaklanabilir. Bu yüzde aşılırsa çatlama ve gevrek kaynaklar gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bunu önlemek için herhangi bir kaynak geometrisi yapılırken biraz ara verilerek darbeli kaynak yapılabilir. Kaynağın özelliklerini iyileştirmek için, malzemenin tokluğunu artıran nikel gibi bazı malzemeler eklenebilir [39].

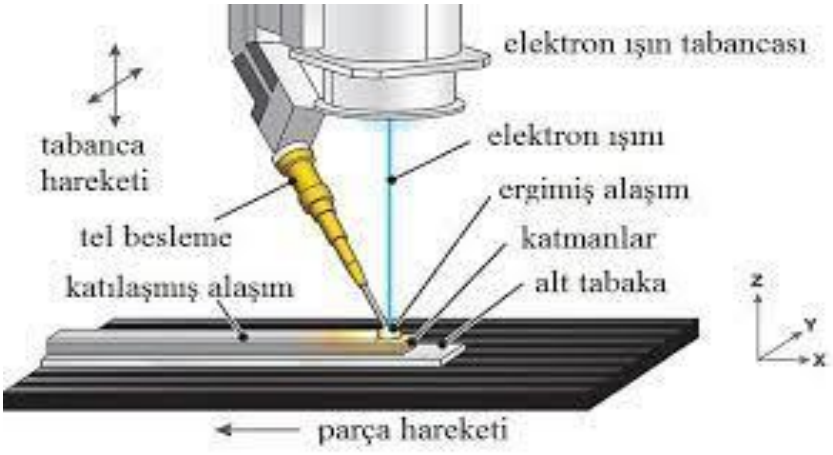
Paslanmaz çelikler, düşük ısı iletkenliği özelliği nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Bu özellik, genişliğini azaltarak ve karbon çeliklerine göre daha yüksek penetrasyona izin vererek daha iyi bir kaynak yapılmasını sağlar. Bu nedenle paslanmaz çelikler lazer kaynak yöntemi için uygun adaylar olarak kabul edilir. AISI 3XX serisi paslanmaz çeliklerin çoğu genel olarak kolaylıkla kaynaklanabilir. AISI 4XX serisi kırılgan davranışlar geliştirebilir ve bir tür son işlem gerektirebilir. Son olarak, nikel bazlı ve demir bazlı alaşımların lazer yöntemi kullanılarak da kaynaklanabileceğini söylenebilir [39].

Lazer kaynağı uygulaması genel olarak, bir lazer ışığı demetinin çok ince bir noktaya odaklanmasıyla elde edilen çok yüksek güç yoğunluğu ile elde edilen bir anahtar deliği füzyon kaynak tekniğidir. Elektron ışını (EB) kaynağında olduğu gibi, genellikle yüksek enerji yoğunluğu veya güç ışını tekniği olarak da adlandırılır. Bir lazer kaynağı oluşturmak için, lazer ışını birleştirilecek iş parçalarının yüzeyine veya çok yakınına odaklanmak üzere getirilir. İlk durumda, gelen ışının büyük bir yüzdesi, bir dakikalık süre boyunca çalışma yüzeyinden yansır; bunun nedeni çoğu metalin iyi yansıtıcı olmasıdır. Bununla birlikte, başlangıçta iş tarafından emilen az miktarda lazer ışını enerjisi, malzeme yüzeyini hızlı bir şekilde ısıtır ve daha önce yansıtılacak olan enerjinin çoğunun emilimini hızla hızlandıran enerji emici bir iyonize metal buharının üretilmesine neden olur.

10^4 W/mm^2 mertebesinde odaklanmış bir güç yoğunluğunda, metalin buharlaştırılarak hızlı bir şekilde uzaklaştırılması, iş parçasına küçük bir anahtar deliği (çok küçük çaplı silindirik bir şaft) başlatır. Anahtar deliği iş parçasının derinliklerine nüfuz ettikçe,

lazer ışığı tekrar tekrar içine dağılır, böylece lazer enerjisinin işe bağlanması artar. Lazer enerjisi uygulanırken, anahtar deliği, Şekil 4.2, erimiş duvarların çökmesini önleyen buhar basıncı ile açık tutturulur.

Yüksek tokluk ve sertliğe sahip olan zırh çeliğinin lazer kaynak ile kaynak edilme sebeplerinden biri lazer kaynak makinesinin yapısında mevcut olan, kaynak bölgesine doğru belirli basınçta gaz püskürtebilme yeteneğidir. Bu durum gazın, ortamda ki havanın kaynak bölgesine sirayet etmesini sağlamakta ayrıca nisbeten de olsa kaynak bölgesine gönderilen gazın hızlı soğutma yeteneğinden faydalanarak iri taneli yapının oluşmasına engel olmaktadır. İstenilen düzeyde olmasa da durum küçük taneli yapının oluşmasına yardımcı olmaktadır. Lazer darbeli bir enerji modunda çalıştırılırsa, erimiş metal anahtar deliğinin merkezine çöker ve darbenin tamamlanmasıyla katılaşır, bazen anahtar deliği ilk oluşturulduğunda buharlaşma yoluyla metal kaybı nedeniyle hafifçe kesilmiş bir kaynak boncuk bırakır. Lazer sürekli dalga modunda çalıştırıldığında, yani darbeli olmadığında ve ışın eklem çizgisi boyunca hareket ettirildiğinde veya tam tersi olduğunda, anahtar deliğinin ön kenarındaki erimiş malzeme, yüzey gerilimi ile desteklenen çok küçük bir dalga üretir.



Şekil 4.3 Lazer Kaynağı Uygulaması [37].

Işın ileriye doğru ilerledikçe, dalga kenar boyunca yeniden yönlendirilir ve arka kenardaki erimiş duvarlar bir araya gelip anahtar deliğinin derinliği boyunca katılaştıkça anahtar deliğinin arkasına doğru düşer. Bu eylem, yaprakları, yakın-uydurma eklemlere, hafif öne çıkık üst yüzeyi kaynak başlangıcı doğru işaret chevron desenli boncuk kaynaktır. Kaynak boncuk yüksekliğinin bir oranı, kaynak metalinin

kaynak yönüne enine yönde eksenel büzülmesiyle de üretilir. Üst kaynak boncukları genellikle temizdir ve geleneksel ark kaynaklarına kıyasla estetik bir görünüme sahiptir. Bu çalışmada kullanılan lazer kaynak makinasına ait görüntüler Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Lazer Kaynak Makinası



Şekil 4.5 Lazer Kaynak Makinası Tel Besleme Sistemi



Şekil 4.6 Lazer Kaynak Makinası Tel Besleme Fonksiyonu

4.1.1 Lazer kaynak metodu dezavantajları

Lazer kaynağı uygulama noktasının çok küçük bir alana sahip olması sebebiyle kaynak yapılacak bölgelerin birbirine iyi kenetlenmiş ve boşluksuz olması arzu edilir. Aksi takdirde:

• Bir lazer ışınının küçük odaklanmış nokta boyutu, özellikle ince tabakalar arasındaki dar boşluklardan geçecektir.

• Kötü oturan parçalar, dolgu teli kullanılmadığı sürece alttan kesilmiş kaynaklar üretir.

Kaynak bölgeleri için doğru kiriş / derz hizalaması gereklidir

• Dar kaynak, doğru yerleştirilmezse bağlantı hattını kolayca kaçırabilir.

• Işın odağının derinliği küçüktür ve gerekli güç yoğunluğunu elde etmek için çalışma yüzeyindeki konumu doğru bir şekilde muhafaza edilmelidir.

Enerji girişini kontrol etmek için hassas iş parçası veya kiriş manipülasyon ekipmanı gereklidir.

• Manipülasyon ekipmanının performansı da doğrudan yukarıdaki doğru kiriş/derz hizalaması ile ilgilidir

Makineler, genellikle atölye koşulları ile uyumlu atölye çalışmalarına daha uygundur.

• Operatörün güvenliği için lazer tabancasının çalışma kabuğunun etrafındaki güvenlik taraması esastır. Genel yerinde kaynak işlemleri için bu yönü elde etmek zordur.

• Lazer rezonatörünün ve lazer ışını işe ileten sistemin optik stabilitesi, güvenilir kaynak performansı için çok önemlidir. Bu nedenle, bu ekipmanların sabit bir temelde muhafaza edilmesi gerekir.

• Lazeri çalıştırmak için elektrik ve soğutmalı su hizmetleri gereklidir. Özellikle yüksek güçlü bir CO_2 lazer, kolayca taşınabilir değildir.

Toplam ekipman ve işletme maliyetleri yüksektir

• Ark kaynak makineleri ile karşılaştırıldığında, lazerler, gerekli iş elleçleme ve yardımcı ekipmanlarla birlikte satın alınması ve çalıştırılması pahalıdır ve maliyet etkin olması için yüksek kullanım gerektirir.

• Ekipmanın yüksek çalışma sürelerini sağlamak için bakım programlarına dikkatli bir şekilde uyulması gereklidir [40].

Tablo 4.1 Lazer kaynak parametrelerinin Taguchi metoduyla çalışma tablosu

Deney No	Malzeme	Lazer Kaynak Parametreleri		
		Lazer atşı Hızı (mm/Sn)	Lazer Hızı (mm/min)	Odaklama mesafesi(mm)
1	Ramor 600	1000	2	5
2	Ramor 600	1000	3	10
3	Ramor 600	1000	4	15
4	Ramor 600	1200	2	10
5	Ramor 600	1200	3	15
6	Ramor 600	1200	4	5
7	Ramor 600	1400	2	15
8	Ramor 600	1400	3	5
9	Ramor 600	1400	4	10

4.2 Taguchi Metodu Kullanılarak Deney Tasarımı ve Modellemenin Yapılması

Ramor 600 zırh çeliği GWEIKE Fiber lazer kaynak makinası kullanarak yapılacak olan Lazer kaynaklı birleştirmede ilk yapılacak olan faktörler ve bu faktörlerin bağlı olduğu seviyelerin belirlenmesidir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan en önemli deney parametreleri Lazer kaynak gücü, Lazer kaynak atış hızı ve odaklama mesafesidir. Her deney parametresine bağlı 3 seviye vardır. Bu deneysel çalışmada optimum Lazer kaynak parametrelerinin belirlenmesi için 3^3=27 deney yapılması gerekir. Fakat Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak 27 deney sayısı yerine 9 deney yapılarak istenen hedefe zamanda ve düşük maliyet oranda tasarruf edilmiş olunacaktır.

3 seviye ve 3 faktör den oluşan en uygun deney tasarım yöntemi olarak Taguchi yöntemi ile Lazer kaynaklı belirlenme işlemi yapılmış olup Tablo 3.3'de kullanılacak olan Lazer kaynak parametre seviyeleri L9 deney tasarım yöntemiyle sembolize edilip gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Lazer kaynağı Taguchi L9 deneysel tasarım çalışma tablosu

Deney no	Lazer kaynak gücü	Lazer kaynak atış hızı	Odaklama mesafesi
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Bu çalışmada kullanılan Lazer kaynak parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Parametre seviyeleri Taguchi L9 deneysel tasarım oluşturulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan Çekme mukavemeti ve çentik darbe deney sonuçları Minitab 18 programında Varyans analiz (ANOVA) ve Sinyal/Gürültü oranları (S/N) çalışmaları yapılmıştır.

Tablo 4.3 Deney faktörleri ve seviyelerinin gösterilmesi

Faktörler	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
Lazer kaynak gücü (W)	1000	1200	1400
Lazer kaynak atış hızı(mm/s)	2	3	4
Odaklama mesafesi (mm)	5	10	15

4.3 Deneyde Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada kullanılacak olan Ramor 600 zırh çeliklerinin yüksek sertlik değerleri, yüksek hızlardaki darbeye karşı mukavemetli, patlamaya karşı dayanıklı ve mekanik değerlerin yüksek olmasından dolayı kullanım alanları gittikçe yaygın ve önemli hale gelmiştir. Lazer kaynak yönteminde kullanılmak üzere 3,5mm kalınlığında Ramor 600 zırh çelikleri temin edilmiştir. Bu çalışmada Ramor 600 zırh çeliklerinin farklı lazer

kaynak parametreleri ile kaynak edilerek mekanik özelliklerinin, Taguchi L9 deneysel tasarımı oluşturulup numerik olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Tablo 4.5 Ramor Çeliğinin Mekanik Özellikleri [21].

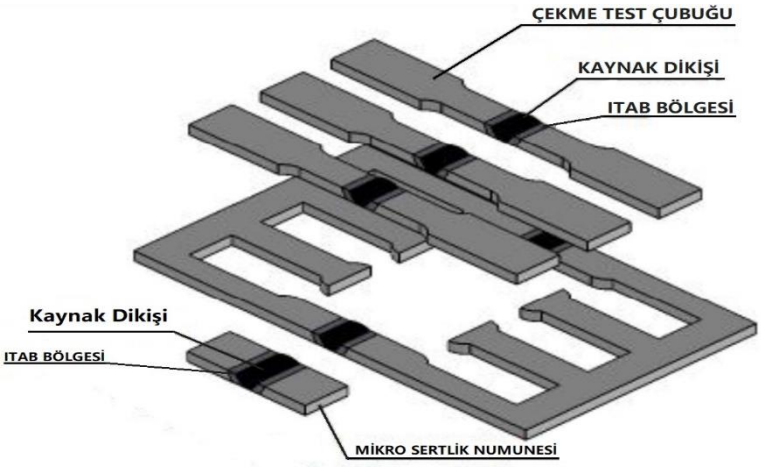
Ramor	Akma Dayanımı (MPA)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %	Sertleşme (HBW)	(C^0)	J
Ramor600	1650	2000	7	600	-40	12

Tablo 4.6 Ramor Çeliğinin Kimyasal Özellikleri [21].

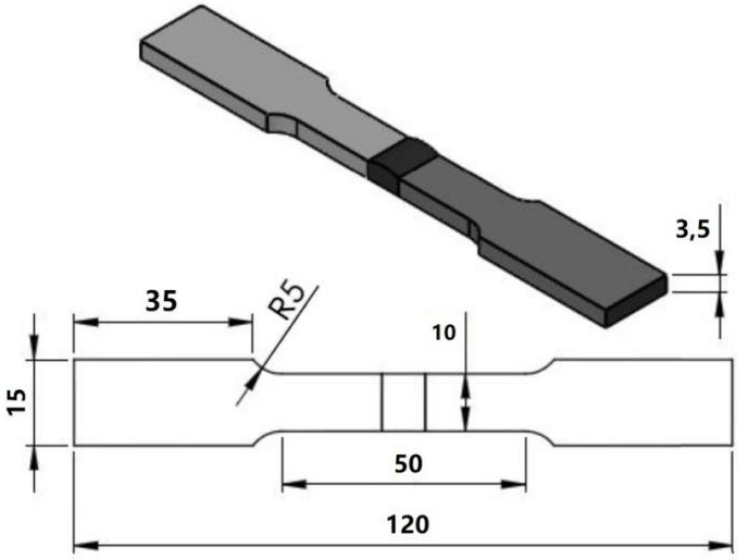
Ramor	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B
Ramor600	0.4	0.7	1.5	1.5	2.5	0.8	0.005

4.4 Numunelerin Hazırlanışı

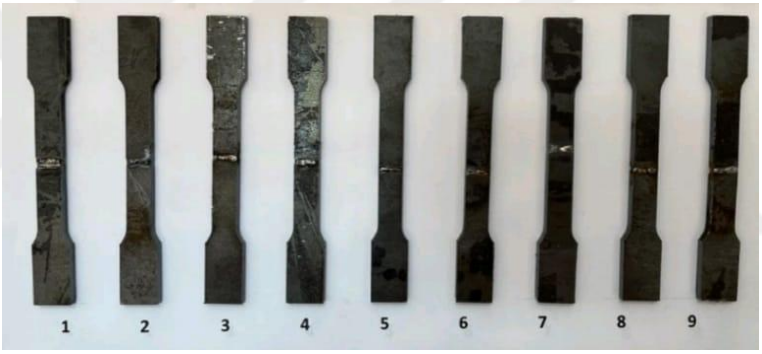
Lazer kaynağı ile birleştirilecek olan Ramor 600 zırh çeliğinin çarpılmaya meydan vermemek için Tel Erezyon yöntemiyle kesilmiş olan 120x60x3,5 mm ölçülerindeki Ramor 600 zırh çeliğinin sabitleyici kaynak aparatı ile sabitlenerek kaynak ünitelerine bağlanmıştır. 120x60x3,5 mm ölçülerindeki Ramor 600 zırh çeliği farklı parametreler kullanılarak Lazer kaynağı yapılmıştır. Lazer kaynaklı malzemelerde herhangi bir çarpılma durumu gözlemlenmemiştir. Çekme dayanım değerlerinin belirlenmesi için her parametreden 3'er adet çekme işlemi yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 4.7 Lazer kaynağı yapılmış 3'er adet çekme deney numunesi ve mikro sertlik numunesi temin edilmiştir.



Şekil 4.8 Lazer kaynağı için hazırlanmış olan çekme deney numune ölçüsü



Şekil 4.9 Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çekme deney numunesi

4.4.1 Çekme deneyi

Çekme deneyleri, Lazer kaynak yöntemi ile Taguchi L9 deneysel tasarımı oluşturulup numerik olarak 9 adet çekme deney numunesin numerik olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş, Ramor 600 zırh çeliğinin çekme kuvvetine karşı göstermiş olduğu mukavemeti tespit etmek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. Numuneler Instron BS 8801 çekme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Lazer kaynağı yapılan çekme test numunelerinin iki ucundan tutularak kopma hasarı olana kadar 2 mm/dakika hızla yük uygulanmış ve yük-uzama tespit edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Instron BS 8801 Çekme test cihazı

4.4.2 Çentik darbe deneyi

Darbe çentik deney numuneleri TS EN ISO 148-1 göre hazırlanmıştır. Lazer kaynağı yapılmış RAMOR 600 zırh çeliğinin çentik darbe deneyleri 24 ºC sıcaklık aralıklarında Schütz Licht marka cihazda gerçekleştirilmiştir.

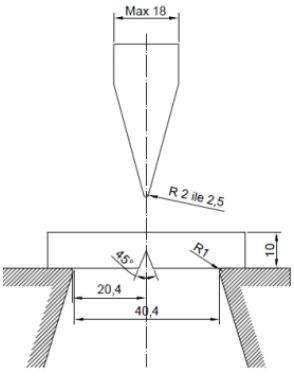
Charpy tarafından [41] 1908 yılında, Charpy V-çentik darbe testleri, ilk olarak bir asırdan daha uzun bir süre önce denenmiş olup, çeliklerin kırılma özelliklerini incelemek için hala yaygın olarak kullanılmaktadır [42]. Testin gerçekleştirilmesi basittir ve o zamandan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test modu başlangıçta Charpy kırılma enerjisi ve CVN gibi makroskopik özellikleri belirlemek için kullanıldı.



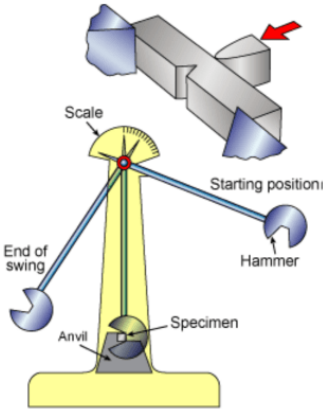
Şekil 4.11 Çentik darbe test cihazı

Günümüzde artık Charpy cihazları daha fazla kullanılmaktadır. Bu cihazlar ile daha fazla kuvvet-yer değiştirme eğrisi bilgisi elde edilmektedir. Ancak bu veriler malzemeyi ve numuneyi temsil eder, bu nedenle bu verileri büyük yapılarda gerçek duruma aktarmak zorlaşmaktadır.

Tvergaard ve Needleman 1988 yılında yaptıkları çalışmada, Aletli Charpy darbe testinin, endüstri uygulamalarında tercih edilme sebeplerinden birinin öncelikli olarak, uygulama kolaylığı olduğunu ifade etmiştir [43]. Olabildiğince az maliyetle, işlemler hızlı yürütülmekte ve sonuçlar hızlı bir şekilde elde edilmektedir. Bununla birlikte, Charpy etki enerjisi yalnızca kırılganlık anlamında bir nitel tanımlamaya izin verir. Ek uygulamalar ile daha derin bir kırılmaya yerel değerlendirmesi sağlanabilir [43-46].



(a)



(b)

Şekil 4.12 a) Çentik darbe test numune ölçüleri

b) Şekil 4.13 Çentik darbe test cihazı

4.4.3 Mikro sertlik deneyi

Mikro sertlik numunelerinin kesilme işlemi MICRACUT 151 metkon marka hassas kesme cihazında kesilmiştir.



Şekil 4.14 Kesme cihazı

Mikro sertlik için hazırlanan numuneler AOB marka zımparalama cihazı yardımıyla kademeli olarak 100, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600 ve 2000 mesh'lik zımpara ile yüzey zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi biten Ramor 600 malzemeler saf su ve saf alkolle temizlenerek, kuru hava makinesiyle yüzeylere zarar vermeyecek şekilde kurutulma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.15. AOB Marka Metalografik zımparalama cihazı

Zımparalama işlemi biten 9 adet numune ardından bakalite alma cihazı tarafından sağlanan 170 °C'lik sıcaklık ve basınç altında numuneler hazır hale gelir.

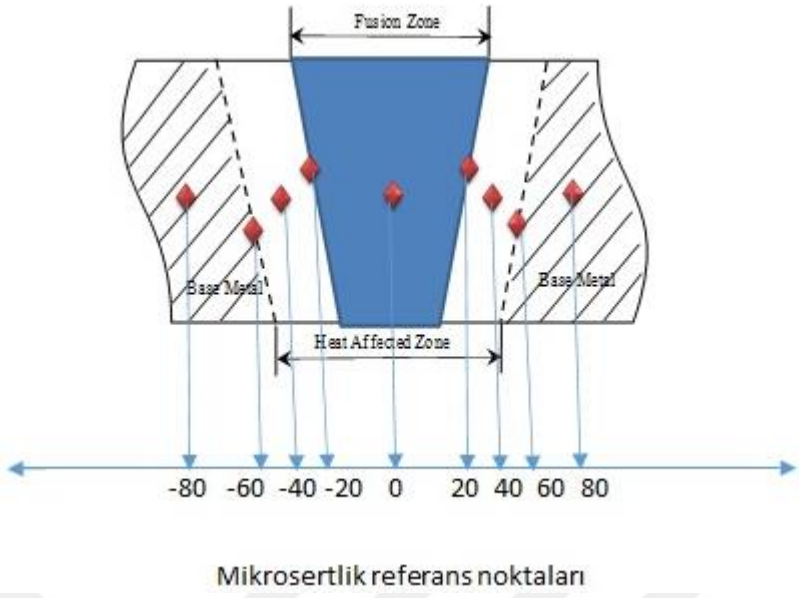


Şekil 4.16. Numune bakalit cihazı

Bakalite alınan numunelerin yüzeyleri kademeli olarak 60, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımparalar ile su altında zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler kadife çuha üzerine 3 μm elmas pasta ile numunelerin yüzeyleri parlatılmıştır.

Bu çalışmada AOB marka Vickers sertlik test cihazı kullanılmıştır. Mikro sertlik deneyleri TS EN ISO 9015-1 deneysel çalışma standartlarına göre yapılmıştır. Lazer kaynak bölgesi 9 farklı noktadan yapılan mikro sertlik taraması kaynak bölgesi, ITAB bölgesi ve ana malzeme bölgesinden üçer adet sertlik alınarak gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler AOB marka dijital mikro Vickers sertlik ölçme cihazı ile 10 g yük altında, yükün 10 sn uygulanmasıyla belirlenmiştir.



Şekil 4.17 Kaynaklı numunelerin mikrosertlik alınan noktaların şematik görünümü



Şekil 4.18 Dijital Mikrosertlik ölçüm cihazı

Ölçümler AOB marka dijital mikro Vickers sertlik ölçme cihazı ile 10 gr yük altında, yükün 10 sn uygulanmasıyla belirlenmiştir.

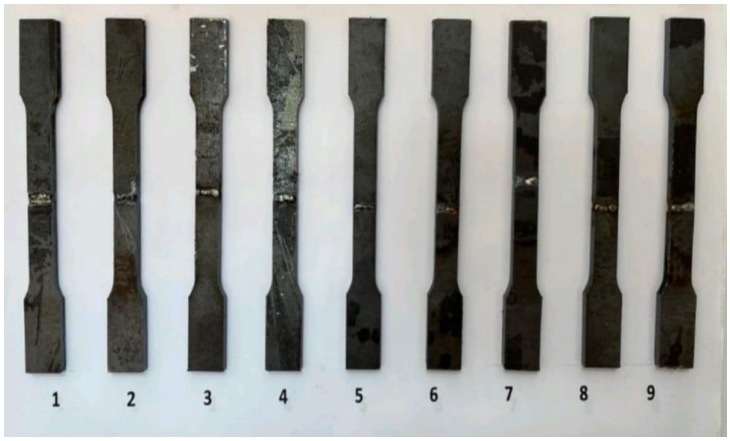
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada Lazer kaynağı ile yapılmış RAMOR 600 zırh çeliğinin farklı parametrelerdeki kaynak yardımıyla birleştirilmesi araştırılmıştır. Bu doğrultuda kaynaklı numunenin çekme dayanımı, çentik darbe mukavemeti ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

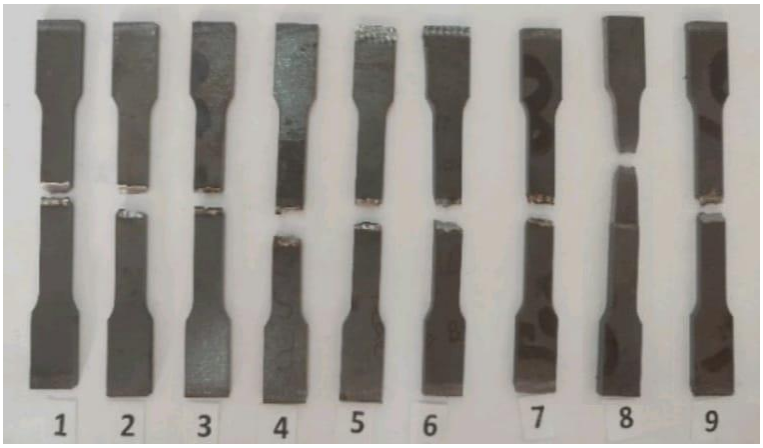
Bu çalışmada, optimizasyon olarak kaynak mukavemetinin artırılması için Taguchi deneysel metodu kullanılarak (S/N) oranlarının belirlenmesi ve (ANOVA) çalışmaları ile en uygun parametre değerlerine ulaşılmak amaçlanmıştır.

5.1 Çekme Testi Sonuçları

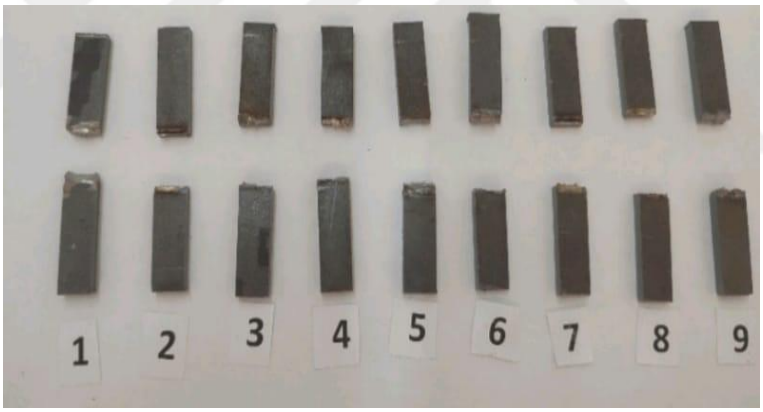
Kaynaklı birleştirme sonucunda işlemsiz numune ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen Lazer kaynaklı numuneler çekme dayanım değerleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Çekme dayanım değerlerinin belirlenmesi için her parametreden 3'er adet çekme işlemi yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 5.1 Farklı parametrelerle Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çekme deney numuneleri



Şekil 5.2 Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çekme deney numunesi ve çekme sonrası kopma bölgesinin görüntüsü.



Şekil 5.3 Lazer kaynağı yapılmış olan 9 adet çentik darbe deney numunelerin kopma bölgesinin görüntüsü.

Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numuneler Dicle Üniversitesi Merkez laboratuvarında Numuneler Instron BS 8801 çekme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çekme mukavemeti testi için kesme hızı 2 mm/dk olarak seçilmiştir. Lazer kaynak parametrelerinin çekme deney sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Ramor 600 zırh çeliği için kullanılan Lazer kaynak parametrelerinin çekme ve çentik darbe deney sonuçları.

Deney No	Malzeme	Lazer Kaynak Parametreleri			Çekme Mukavemeti (MPa)	Çentik darbe Mukavemeti (J)
		Lazer Gücü (W)	Lazer atış hızı (mm/sn)	Odaklama Mesafesi (mm)		
1	Ramor 600	1000	2	5	1161,85	13,3
2	Ramor 600	1000	3	10	808,11	10,9
3	Ramor 600	1000	4	15	625	11,5
4	Ramor 600	1200	2	10	1336,375	18,8
5	Ramor 600	1200	3	15	1248,815	12,2
6	Ramor 600	1200	4	5	1050	13,6
7	Ramor 600	1400	2	15	1330	14,65
8	Ramor 600	1400	3	5	1401,25	12,1
9	Ramor 600	1400	4	10	997,5	18,9

5.1 Deneylerin Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile İrdelenmesi

Bu çalışmada Ramor 600 zırh çeliği GWEIKE Fiber lazer kaynak makinası kullanarak yapılacak olan Lazer kaynaklı birleştirmede ilk yapılacak olan faktörler ve bu faktörlerin bağlı olduğu seviyelerin belirlenmesidir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan en önemli deney parametreleri Lazer kaynak gücü, Lazer kaynak atış hızı ve odaklama mesafesidir. Her deney parametresine bağlı 3 seviye vardır. Bu deneysel çalışmada optimum Lazer kaynak parametrelerinin belirlenmesi için $3^3 = 27$ deney yapılması gerekir. Fakat Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak 27 deney sayısı yerine 9 deney yapılarak istenen hedefe zamanda ve düşük maliyet oranda tasarruf edilmiş olunacaktır. Yapılan deneysel tasarım çalışmalarında çekme mukavemeti ve çentik darbe mukavemet sonuçlarının elde edilmesiyle Tablo 5.2'de Minitab 18 programıyla S/N ve ANOVA analiz sonuçları verilmiştir.

5.2 Sinyal / görüntü (S/ N) Oranlarının Elde Edilmesi

Taguchi yöntemiyle istenen değerlerden farklı elde edilen kalite karakterlerini ölçmek için Sinyal/Gürültü (S/N) oranı kullanılır. Sinyal faktörleri Lazer kaynağı yapılmış numunelerin arzu edilen işlevlerinden yararlanarak ürün operatörü tarafından kontrol edilebilir ve ayarlanabilen faktörlerdir.

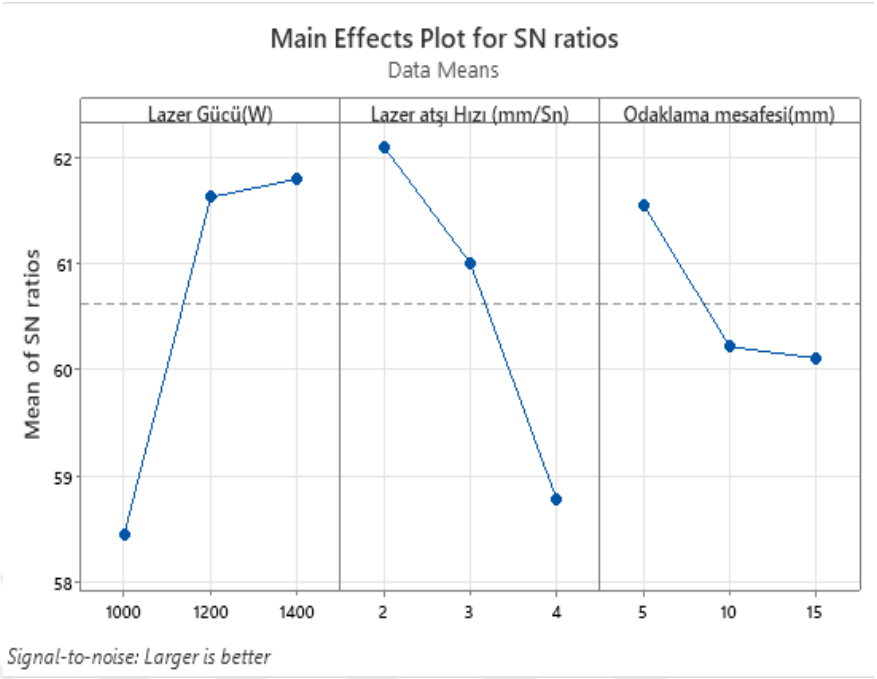
Bu çalışmada her bir deney numunesine ait çekme mukavemet ve Çentik darbe mukavemeti değeri elde edildikten sonra Minitab 18 programıyla Tablo 5.2 oluşturulmuştur. Oluşturulan bu tablo sayesinde Sinyal/Gürültü oranlarının elde edilmesi ve Varyans analiz çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır.

S/N Sinyal/Gürültü oranı 3 farklı şekilde elde edilir. Bu durumlarda hedef S/N oranını maksimize etmektir. Bu yapılan çalışmada optimum proses parametrelerini elde etme amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Taguchi metodunda kullanılan, üç farklı türde sınıflandırılan S/N Sinyal/Gürültü oranlarından, en yüksek olan en iyi durumdur, yani "larger is better" durumu kullanılmıştır.

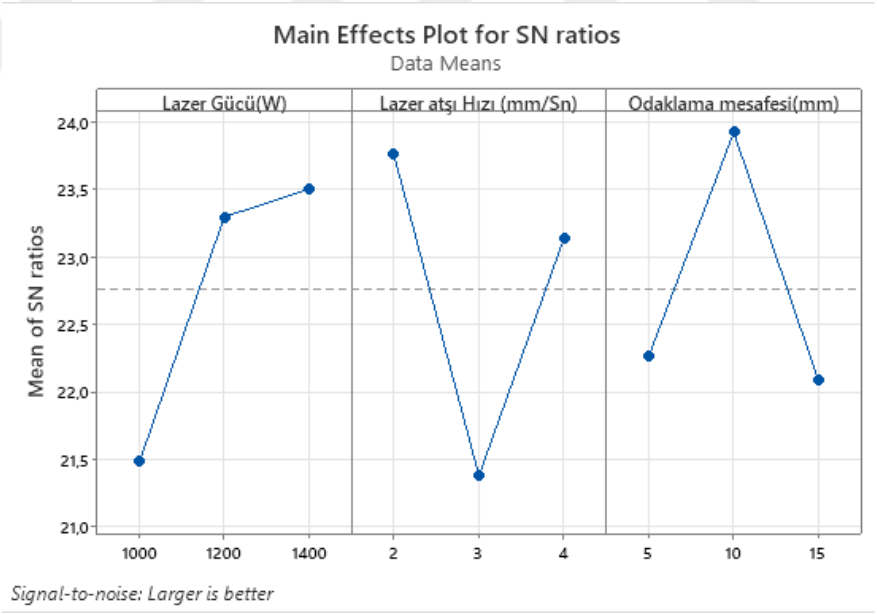
Tablo 5.2. S/N Sinyal/Gürültü performans değerlerinin her bir parametre için gösterilmesi

Seviye	Lazer Gücü (W)	Lazer atış Hızı (mm/sn)	Odaklama mesafesi (mm)
1	58,46	62,10	61,55
2	61,62	61,00	60,22
3	61,80	58,77	60,11

Tüm parametreler irdelendiğinde, en iyi değerin S/N Sinyal/Gürültü oranının en yüksek olduğu değere göre (larger is better) yapılan çalışmalarda, Tablo 5.2'de bulunan değerler. Tablo 5.3'de sayısal değer olarak belirtilmiştir. Bu sayısal değerlere göre optimum Sinyal/Gürültü S/N oranlarının Lazer Güç parametresi için 61.80 olduğu, Lazer atış hızı parametresi için 62.10 olduğu ve Odaklama mesafesi parametresi için ise 61.55 olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda en iyi Lazer kaynağı parametreleri, Lazer gücü 1400W Lazer atış hızı 3mm/sn ve odaklama mesafesi 5mm olan değerlerdir. Yapılan Taguchi deneyinde bu değerlere en yakın parametre değeri 8. Deney numunesidir.

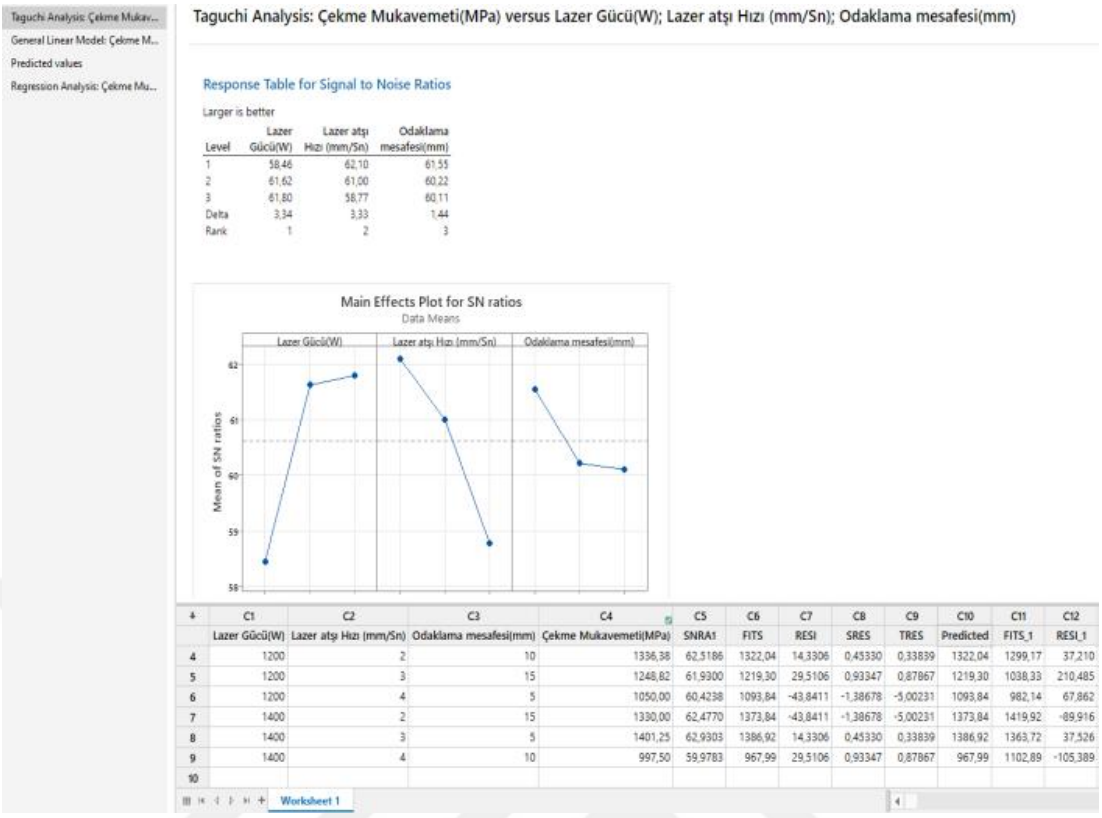


Şekil 5.4 Çekme Mukavemeti için Taguchi deney dizaynında Sinyal/Gürültü S/N performans grafiği



Şekil 5.5 Çentik darbe Mukavemeti için Taguchi deney dizaynında Sinyal/Gürültü S/N performans grafiği

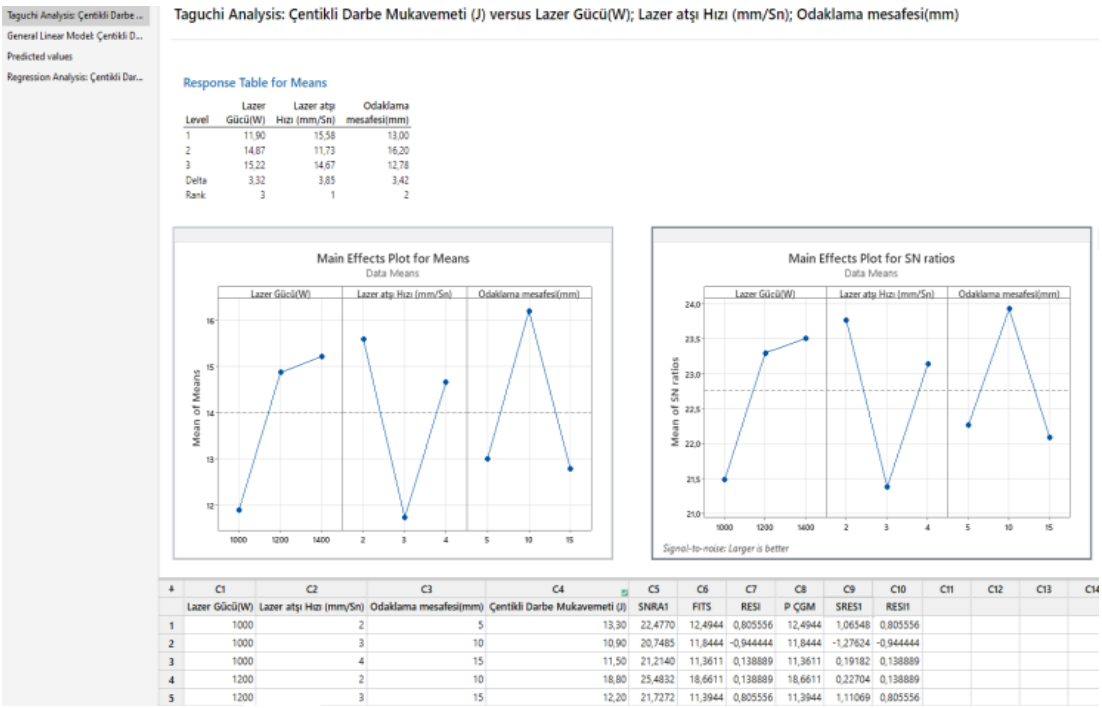
Çekme Mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekranı ortamındaki analiz çalışmasının en son halini içeren ekran görüntüsü (Şekil 5.6).



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	Lazer Gücü(W)	Lazer atşı Hızı (mm/Sn)	Odaklama mesafesi(mm)	Çekme Mukavemeti(MPa)	SNRA1	FITS	RESI	SRES	TRES	Predicted	FITS_1	RESI_1
4	1200	2	10	1336,38	62,5186	1322,04	14,3306	0,45330	0,33839	1322,04	1299,17	37,210
5	1200	3	15	1248,82	61,9300	1219,30	29,5106	0,93347	0,87867	1219,30	1038,33	210,485
6	1200	4	5	1050,00	60,4238	1093,84	-43,8411	-1,38678	-5,00231	1093,84	982,14	67,862
7	1400	2	15	1330,00	62,4770	1373,84	-43,8411	-1,38678	-5,00231	1373,84	1419,92	-89,916
8	1400	3	5	1401,25	62,9303	1386,92	14,3306	0,45330	0,33839	1386,92	1363,72	37,526
9	1400	4	10	997,50	59,9783	967,99	29,5106	0,93347	0,87867	967,99	1102,89	-105,389
10												

Şekil 5.6 Taguchi deney dizaynında Çekme Mukavemeti için varyans analizi ekran görüntüsü

Çentik darbe Mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekranı ortamındaki analiz çalışmasının en son halini içeren ekran görüntüsü (Şekil 5.7).



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	Lazer Gücü(W)	Lazer atşı Hızı (mm/Sn)	Odaklama mesafesi(mm)	Çentikli Darbe Mukavemeti (J)	SNRA1	FITS	RESI	P ÇGM	SRES1	RESI1				
1	1000	2	5	13,30	22,4770	12,4944	0,805556	12,4944	1,06548	0,805556				
2	1000	3	10	10,90	20,7485	11,8444	-0,944444	11,8444	-1,27624	-0,944444				
3	1000	4	15	11,50	21,2140	11,3611	0,138889	11,3611	0,19182	0,138889				
4	1200	2	10	18,80	25,4832	18,6611	0,138889	18,6611	0,22704	0,138889				
5	1200	3	15	12,20	21,7272	11,3944	0,805556	11,3944	1,11069	0,805556				

Şekil 5.7 Taguchi deney dizaynında çentik darbe Mukavemeti için varyans analizi ekran görüntüsü

5.3 ANOVA Çalışmaları

Deneysel çalışmada ANOVA' kullanmanın ana amacı, kaynak kalitesini yoğun bir şekilde etkileyen kaynak işlemi parametrelerini incelemektir. Bu S/N oranının toplam ortalamasından, kare sapmaların toplamı ile değerlendirilen S/N oranlarının toplam değişkenliğini, her bir kaynak işlem parametresinin katkılarına ayırarak gerçekleştirilir. Varyans analizi deneysel çalışmalarda matematiksel bir yöntem olup, deneysel verileri doğru yorumlamak ve deneysel çalışmada hangi parametre seviyesinin daha fazla etkiye sahip olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Aşağıda Tablo 5.3'de yer alan Taguchi yöntemiyle yapılan Varyans analiz çalışmalarının sonuçlarını içermektedir.

Tablo 5.3 Çekme mukavemeti için Varyans Analiz Sonuçları

Parametreler	**Serbestlik derecesi**	**Kareler toplamı**	**Ortalama kareler toplamı**	**% Etki oranı**	**P Değeri**
Lazer Gücü(W)	2	264035	132017	48,10%	0,033
Lazer atış Hızı (mm/Sn)	2	232214	116107	42,30%	0,037
Odaklama mesafesi(mm)	2	43699	21849	7,96%	0,171
Hata	2	8995	4497	1,64%	
Toplam	8	548942			
R-Sq= 98,36 %			R-Sq(adj) = 98,13 %		

Çekme mukavemeti için Regresyon analizi: Belirtilen seviyedeki parametreler dahilinde Çekme Mukavemeti tahmin etmek için ikinci bir sıra polinom denklemi aşağıda verildiği gibi geliştirilmiştir,

Çekme Mukavemeti (MPa)	=	1106,5- 241,6 Lazer Gücü (W)_1000
		+ 105,2 Lazer Gücü (W)_1200
		+ 136,4 Lazer Gücü (W)_1400
		+ 169,5 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_2
		+ 46,2 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_3 -
		215,7 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_4
		+ 97,8 Odaklama mesafesi (mm)_5 -
		59,2 Odaklama mesafesi (mm)_10
		- 38,6 Odaklama mesafesi (mm)_15

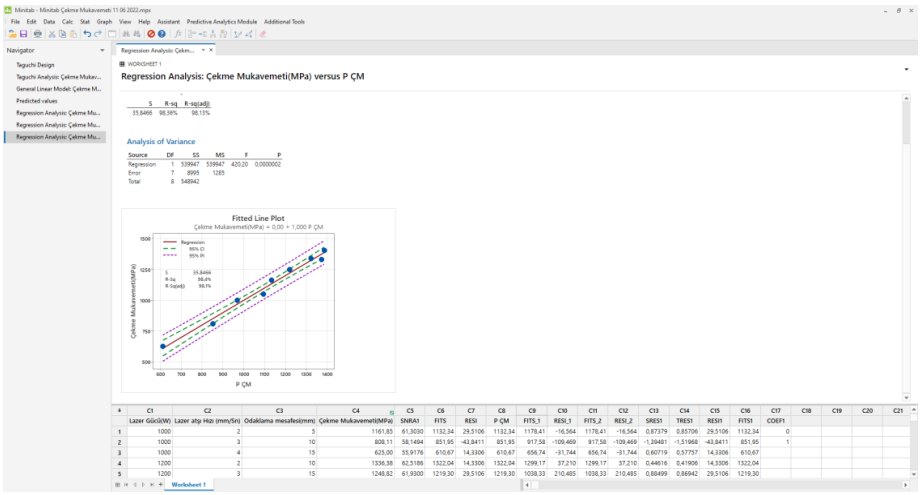
Tablo 5.4. Çentik darbe mukavemeti için Varyans Analizi sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Ortalama kareler toplamı	% Etki oranı	P Değeri
Lazer Gücü (W)	2	19,924	9,962	28,13%	0,190
Lazer atış Hızı (mm/Sn)	2	24,267	12,134	34,26%	0,162
Odaklama mesafesi(mm)	2	21,961	10,980	31,00%	0,176
Hata	2	4,681	2,340	6,61%	
Toplam	8	19,924		100,00%	
R-Sq= 93,39 %			R-Sq(adj) = 92,45 %		

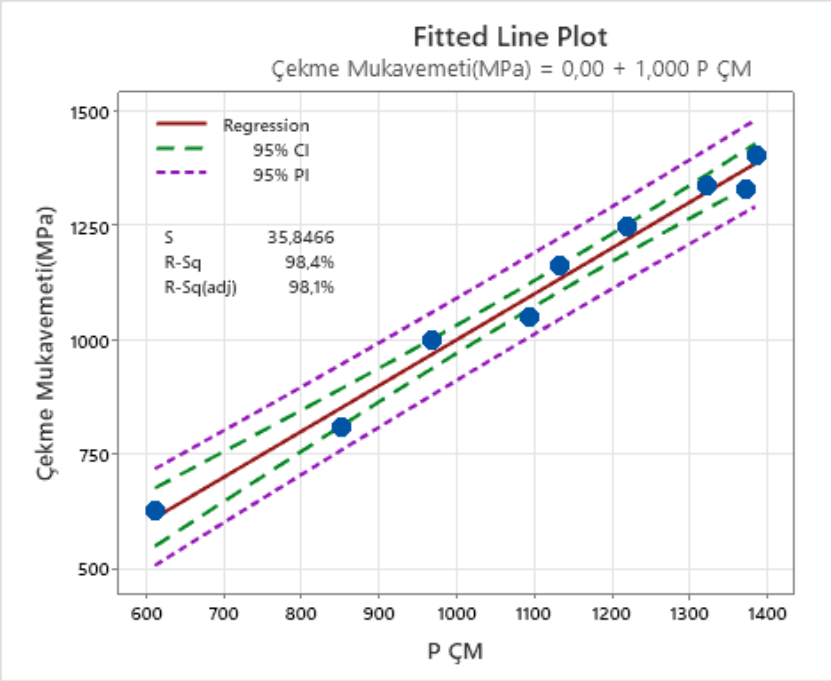
Çentik darbe mukavemeti için Regresyon analizi: Belirtilen seviyedeki parametreler dahilinde Çekme Mukavemeti tahmin etmek için ikinci bir sıra polinom denklemi aşağıda verildiği gibi geliştirilmiştir,

Çentikli Darbe Mukavemeti (J)	=	13,994- 2,094 Lazer Gücü (W)_1000
		+ 0,872 Lazer Gücü (W)_1200
		+ 1,222 Lazer Gücü (W)_1400
		+ 1,589 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_2
		- 2,261 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_3
		+ 0,672 Lazer atış Hızı (mm/Sn)_4
		- 0,994 Odaklama mesafesi (mm)_5
		+ 2,206 Odaklama mesafesi (mm)_10
		- 1,211 Odaklama mesafesi (mm)_15

Çekme Mukavemeti (MPa): Lazer Gücü (W), Lazer atış Hızı (mm/Sn) ve Odaklama mesafesi (mm) Şekil 5.9'daki olasılık grafiği düz çizgi boyunca dağılmış ve %95 güven seviyesinde çalışılmış olup %98.36'luk bir oran elde edilmiştir.

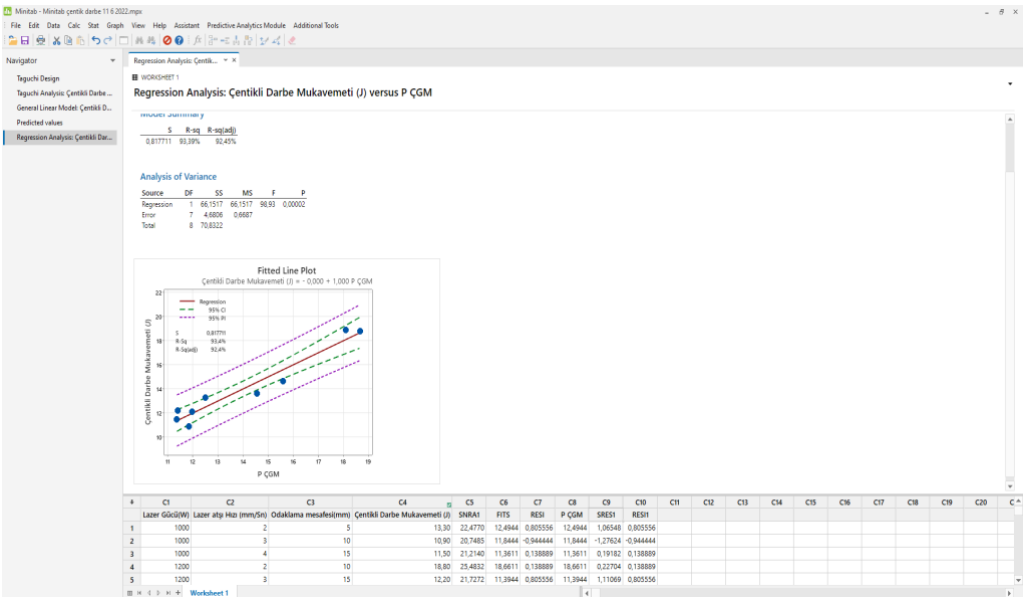


Şekil 5.8 Çekme Mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekran görüntüsü.

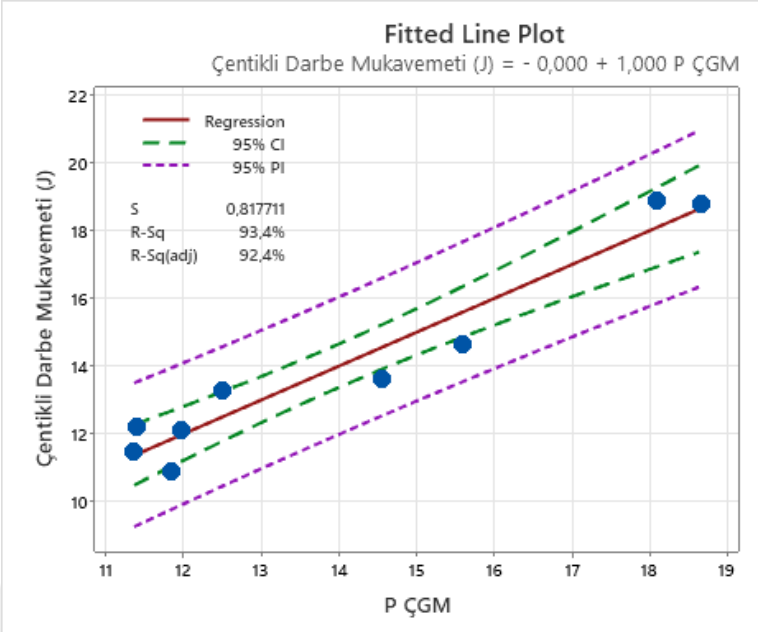


Şekil. 5.9 Çekme mukavemeti için olasılık grafiği

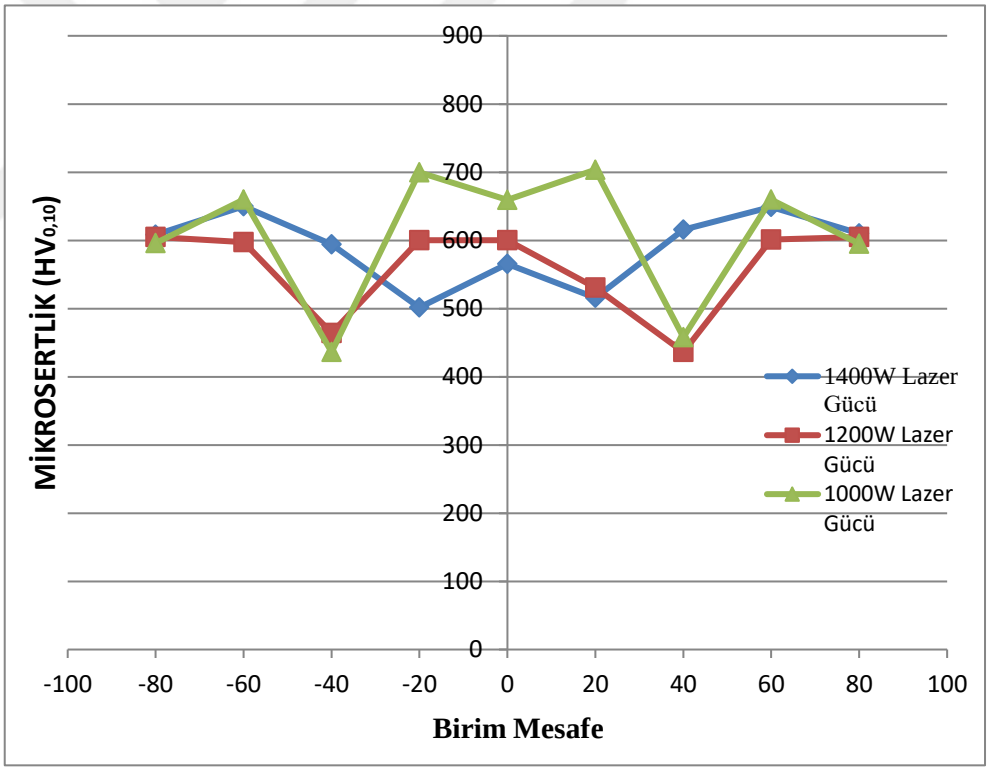
Çentik darbe Mukavemeti (MPa): Lazer Gücü (W), Lazer atış Hızı (mm/Sn) ve Odaklama mesafesi (mm) Şekil 5.11'daki olasılık grafiği düz çizgi boyunca dağılmış ve %95 güven seviyesinde çalışılmış olup %93.39'luk bir oran elde edilmiştir.



Şekil 5.10 Çentik darbe Mukavemeti için Minitab 18 programı çalışma ekran görüntüsü.



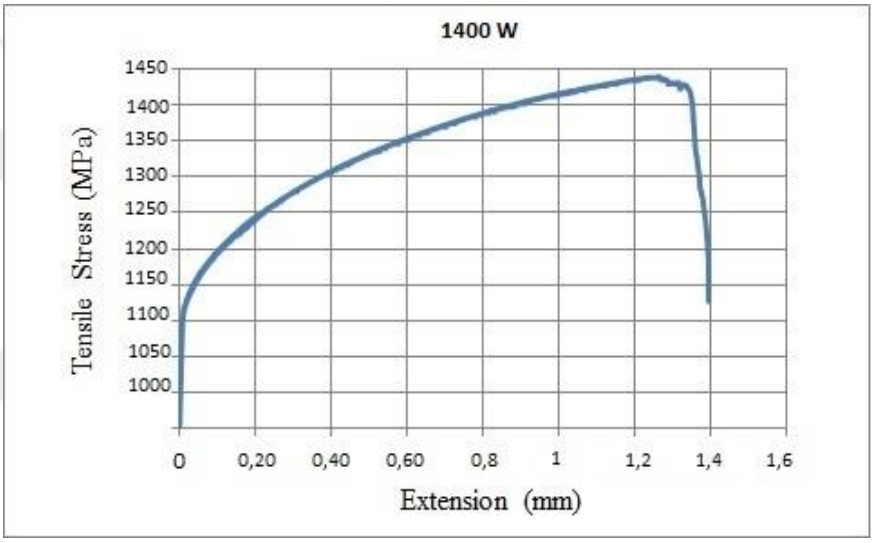
Şekil. 5.11 Çentik darbe mukavemeti için olasılık grafiği



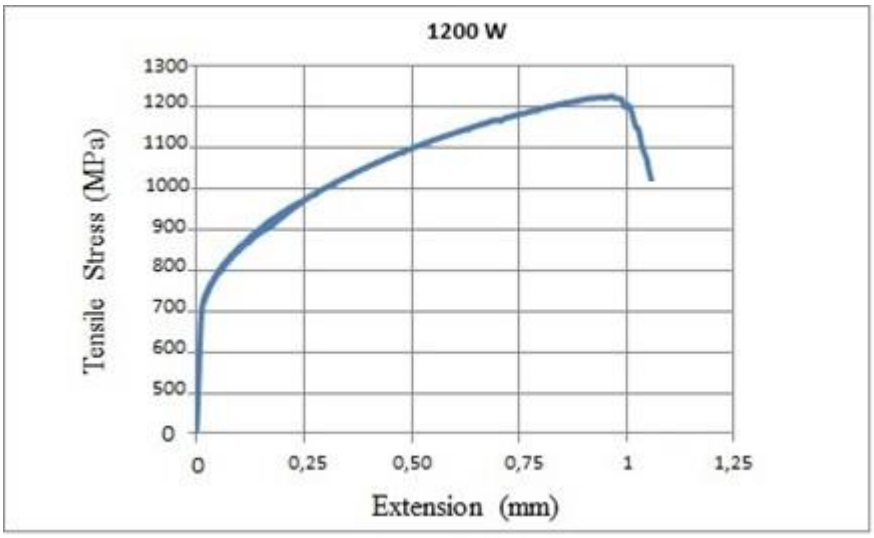
Şekil 5.12 Mikro sertlik grafiği

Şekil 5.12' de, numunenin çeşitli bölgelerinden alınan mikrosertlik değerleri grafiğe dökülmesi halinde 1400W lazer gücü ile yapılan kaynakta kaynak bölgesi en yüksek sertlik değerini vermiştir. 1200W ve 1000W Lazer gücünde gerçekleştirilen kaynak

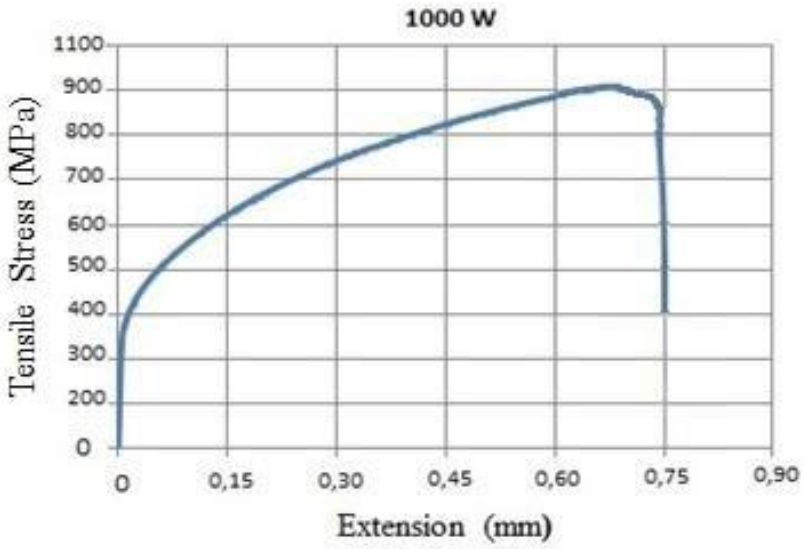
uygulamalarında ise kaynak bölgesi mikrosertliğinin düşük olduğu görülmekte. Ancak numunelerin, ITAB bölgesinden alınan mikrosertlik değerleri incelendiğinde yüksek ısı maruziyetinin numunenin yapısını etkileyerek mikrosertliğin düşük çıkmasına sebep olduğu söylenebilir. Sonuç olarak uygulanan lazer kaynağının gücü düştükçe kaynak bölgesinin de sertlik değeri düşmekte, ancak ITAB bölgesi daha az ısıya maruz kaldığından ötürü yapısı daha az etkilenmiştir denebilir.



Şekil 5.13 1400W Lazer kaynağı çekme mukavemeti



Şekil 5.14 1200W Lazer kaynağı çekme mukavemeti



Şekil 5.15 1000W Lazer kaynağı çekme mukavemeti

Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 Lazer kaynağı ile birleştirilmiş olan Ramor600 zırh çeliği numunelerinin, lazer kaynak gücüne göre çekme mukavemetlerini ve uzama miktarlarını açıklamaktadır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada Ramor 600 zırh çeliği kullanılarak Fiber Lazer kaynak yöntemiyle numuneler başarı ile birleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda Lazer kaynak parametre değerleri 3 farklı Lazer Gücü (W) (1000W, 1200W, 1400W), 3 farklı Lazer Atış Hızı (mm/sn) (2mm, 3mm, 4 mm/sn) ve 3 farklı Odaklama mesafesi (mm) (5mm, 10mm ve 15mm) kullanılmıştır. Taguchi optimizasyon yöntemi ile deney sayıları optimize edilerek, deney dizin sıralaması belirlenmiş, S/N ve Varyans (ANOVA) analiz çalışmaları yapılmıştır.

6.1 Lazer Kaynağı Yapılmış Numunelerin Sonuçları

- Lazer kaynak işlemleri Ramor600 zırh çeliğinin dayanımlarını belirlemek amacıyla çekme mukavemet deneyi, mikrosertlik deneyi ve çentik darbe testleri yapılmıştır.

- Lazer gücü 1400W, Lazer atış hızı 3 mm/sn ve Odaklama mesafesi 5mm olan Lazer kaynaklı birleştirilmiş numune kaynak bölgesinden değil de ana malzemeden kopmuştur. Çekme kopma mukavemeti 1401,25 MPa olarak ölçülmüştür.

- Lazer kaynağı yapılmış numunelere sertlik ölçümleri yapılmış ve Lazer gücü 1200W, Lazer atış hızı 4 mm/sn ve Odaklama mesafesi 5mm olan deneyde en yüksek sertlik değeri gözlenmiştir.

- Lazer kaynağı yapılmış numunelerde çentik darbe mukavemeti ölçümü yapılmış, Lazer gücü 1400W, Lazer atış hızı 4 mm/sn ve Odaklama mesafesi 10 mm olan deneyde en yüksek çentik darbe mukavemeti 18,9 J olarak ölçülmüştür.

6.2. Optimizasyon Deneysel Tasarım Analiz Sonuçları

- Taguchi deney tasarımı ile optimizasyon yapılarak, uygulanmış olan çözümlemelerde 27 deney sayısı yerine, 9 deney yapılarak zamandan ve maliyetten büyük oranda tasarruf edilmiştir.

- Lazer kaynak işlemi ile birleştirilen numunelere uygulanan, çekme mukavemeti ve çentik darbe deney çalışma sonucu ile elde edilen veriler kullanılarak Minitab 18 programıyla Sinyal/Gürültü S/N ve Varyans (ANOVA) analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Çekme mukavemeti için tüm proses parametrelerinin sırasıyla Varyans (ANOVA) analizinden Lazer gücü %48,10, Lazer atış hızı %42,30 ve Odaklama mesafesi %7,96 ile önemli katkıda bulunduğu ve hata payının %1,64 olduğu sonucuna varılmıştır.
- Çentik darbe mukavemeti için tüm proses parametrelerinin sırasıyla Varyans (ANOVA) analizinden Lazer gücü %28,13, Lazer atış hızı %31 ve Odaklama mesafesi %7,96 ile önemli katkıda bulunduğu ve hata payının %6,61 olduğu tespit edilmiştir.
- ANOVA kullanılarak, lazer kaynak ile kaynak uygulamasında kullanılan parametreler arasında; Kaynak kalitesi üzerinde en etkili parametrenin Lazer gücünün olduğunu tespit edilmiştir.
- Çekme mukavemeti (MPa): Lazer gücü (W), Lazer atış hızı (mm/sn) ve Odaklama mesafesi (mm) Şekil 5.9'daki olasılık grafiği regresyon doğrusu boyunca yayılmış ve %95 güven seviyesinde çalışılmış olup sonuçta %98,36'lık bir oran elde edilmiştir.
- Çentik darbe mukavemeti (MPa): Lazer Gücü (W), Lazer atış hızı (mm/sn) ve Odaklama mesafesi (mm) Şekil 5.11'deki olasılık grafiği regresyon doğrusu boyunca yayılmış ve %95 güven seviyesinde çalışılmış olup %93,39'luk bir oran elde edilmiştir.
- Çekme mukavemeti için ve çentik darbe mukavemeti için regresyon analizi yapılarak polinom denklemleri bulunmuştur.

KAYNAKLAR

[1] Ş. Karagöz, Ş.H. Atapek, "Bor yakıtlı zırh çeliklerinin kırılma davranışı", Prooceedings of 8th International Fracture Conference, 2007.

[2] M.L. Bekci, B.H. Canpolat, E. Usta, M.S. Güler, O.N. Cora, ¨Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. Eng. Sci.Technol.an Int. J. 24, 990–995. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001, 2021.

[3] S. Chocron, A.J. Carpenter, N.L. Scott, R.P. Bigger, K. Warren, Impact on carbon fiber composite: ballistictests, materialtests, and computer simulations. Int. J. Impact Eng.131,3956. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng, 2019.

[4] J. Tomkow, Weldability of under water wet-welded HSLA steel: effects of electrode hydrophobic coatings. Materials (Basel). 2021, 14, 1364, https://doi:10.3390/ma14061364, 2021.

[5] J.S. Kim, H.J. Yi, "Characteristics of GMAW narrow gap welding on the armor steel of combat vehicles". Appl. Sci. 7, 658. https://doi.org/10.3390/app7070658, 2017.

[6] B. Savic, A. Cabrilo, "Effect of heat input on the ballistic performance of armor steel weldments". Materials (Basel) 14, 3617. https://doi.org/10.3390/ma14133617, 2021.

[7] J. Bassett, "Laser welding of high hardness armour steel", Sci. Technol. Weld. Join. 3, 244–248. https://doi.org/10.1179/136217198791138003, 2012.

[8] A. Sajek, "Welding thermal cycles of joints made of S1100 QL steel by saw and hybridplasma-magprocesses". Adv. Mater. Sci. 20, 75–86. https://doi.org/10.2478/adms-2020-0023, 2020.

[9] B. Skowrońska, J. Szulc, M. Bober, M. Baranowski ve T. Chmielewski, "Selected properties of RAMOR 500 steel welded joints by hybrid PTA-MAG", Journal of Advanced Joining Processes, 5, 100111, 2022.

[10] Z.M. Liu, S.L. Cui, Z. Luo, C.Z. Zhang, Z.M. Wang, Y.C. Zhang, Plasma arcwelding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling J. Manuf. Process., 23 pp. 315-327, 2016.

[11] İ. Memiş, "Impact Response Of Ramor 500 Armor Impact Response Of Ramor 500 Armor Steel Subjected To High Velocities", Graduate School of Natural and Applied Science of Dokuz Eylül University In Partial Fullfilment of the Requirements forthe Master of Science of Mechanical Engineering, Mechanic Program, İzmir/Turkey, 2016.

[12] X.J. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarigeon, W. Wallace, “A review of laser welding techniques for magnesium alloys”, Journal of Materials Processing Technology, 171 (2), 188-204, 2006.

[13] S. Taskaya, T. Yıldız, A. Kaya Gür. “Ramor 500 zırh Çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde gerilimin etkisi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2017.

[14] K.H Abbott, S. Manganello, “Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets”, J of Mater JMLSA, vol. 17, 231–23, 1972.

[15] E. Zengin, “Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

[16] R.S. Chandel, H.P. Seow, F.L Cheong, “Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 72, 124–12, 1997.

[17] K.J. Kuhn, Laser engineering – Carbondioxide laser, TWI, 1998.

[18] D. Günay, D. Özkan, S. Şentürk, “Lazer, Plazma Kaynağı ve Uygulamaları”, Bitirme Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Müh., Isparta, 11-35, 2001.

[19] N. Tarakçıoğlu, M. Özcan, “Lazerler ve Materyal İşleme Uygulamaları”, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 5-133, 2004.

[20] A. Kenar, “Lazer kaynağı ile birleştirilmiş titanyum alaşımlarının farklı ısıl işlemler sonucunda mekanik özelliklerinin incelenmesi” Master's thesis, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2022.

[21] B. Yavuz ile M. Vural, “Comparative Study Regarding the Welding Behavior of Galvanized Steel Using Laser Welding and Gas Metal Arc Welding Processes Annals” of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, 32, 77-84, 2021.

[22] Ş.H. Atapek, “Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, 2006.

[23] Ş. Karagöz, Ş.H. Atapek, A. Yılmaz, “Su Verilmiş ve Temperlenmiş Çeliğin Alaşım ve Isıl İşlem Doğrultusunda Zırh Malzemesi Olarak Geliştirilmesi”, IV. Demir-Çelik Kongresi, Bildiriler Kitabı, 63-68, Karabük-Türkiye, 1-3 Kasım, 2007.

[24] Ş. Karagöz, Ş.H. Atapek, A. Yılmaz, “Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fraktografik Etüd”, Metal Dünyası, 182, 102-107, 2008.

[25] T. Baykara, “Zırh Teknolojileri: Genel Bir Bakış”, Zırh Teknolojileri Semineri, Milli Savunma Bakanlığı Ar-Ge & Teknoloji Daire Başkanlığı, Ankara, Mart, 2005.

[26] L. Sangoy, Y. Meunier, G. Pont, “Steels for Ballistic Protection”, Israel Journal of Technology, 24, 319-326, 1988.

[27] F. Gálvez, D. Cendón, N. García, A. Enfedaque, V. Sánchez-Gálvez, “Dynamic Fracture Toughness of a High Strength Armor Steel”, Engineering Failure Analysis, 16, 2567–2575, 2009.

[28] F. Ade, “Ballistic Qualification of Armor Steel Weldments”, Welding Journal, 70, 53-58, 1991.

[29] H. Jacobi, H.J. Batinmann, J. Gronsfeld, “New Method of Determining the Macrocleanness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel”, Stahl Eisen, 108 (20), 54-66, 1988.

[30] H. Matsubara, T. Osuka, I. Kozasu, K. Tsukada, “Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength, High Toughness Steel Plateby Controlled Rolling”, Transactions ISIJ, 12, 435-443, 1972.

[31] Ş. Karagöz, A. Yılmaz, H. Atapek, “Zırh Çelikleri ve Geliştirilmesi”, 3. Savunma Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: I, 501-511, ODTÜ, Ankara-Türkiye, 29-30 Haziran, 2006.

[32] S.J. Manganello, A.D. Wilson, “Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate”, Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90‟s, Ed.R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals&Materials Society, 235-241, 1993.

[33] Alloy Steel, “HY80, HY100”, Specification.

[34] Ş. Karagöz, Ş.H. Atapek, “Çökelti Sertleştirilmiş bir Sac Çeliğinde Mikroyapı-Kırılma Karakteristiği İlişkisi”, Deformasyon Sac İşleme, 11-12, 62-65, 2008.

[36] TS EN ISO 6892-1. Metalik malzemeler - Çekme testi - Bölüm 1: Oda sıcaklığında test yöntemi, 2011.

[35] S. Anık, Kaynak Tekniği El Kitabı. Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü Gedik Eğitim Vakfı Yayını, 250 s, İstanbul, 1991.

[36] SSAB teknik doküman. Erişim tarihi 09.06.2022: https://www.ssab.com/tr-tr/markalar-ve-urunler/armox/product-offer/ramor-600.

[37] İ. Çelik, İmalat, M.E. Teknolojileri, Destek Yapılar ve Hücresel Yapılar Ders Notları, Dumlupınar Üniversitesi Açık Ders Notları Sistemi, 2018.

[38] T. Forsman, K. Nilsson, J. Powell, C. Magnusson, “Laserwelding; the influence of laser choice and material properties on weld dimensions”, Journal of Laser Applications, pp. 89-103, 2001.

[39] D. Kautz, J. Milewski, D. Powers, “Laser BeamWelding, Cutting, and Associated Processes”. En: A. O'Brien & C. Guzman, edits. AWS Welding Handbook Volume 3. Miami: American Welding Society, pp. 25-28, 2007.

[40] C.T. Dawes, Laserwelding: A practical guide. Woodhead Publishing, 1992.

[41] G. Charpy, Note sur l'essaidesmetaux a la flexion par choc de barreauxentailles. Mem Comp Rend Soc Ingnr Civil France, 848–77, 1901.

[42] S. Russell, "Experiments with a new machine for testing materials by impact" Trans. Am. Soc. Civil Engrs., 39(826):237–50, 1898.

[43] V. Tvergaard, A. Needleman, "An analysis of the temperature and rate dependence of Charpy V-notchenergies for a high nitrogen steel." Int. J. Fract. 37, 197–215, 1988.

[44] R. Narasimhan, A.J. Rosakis, B. Moran, "A three-dimensional numerical investigation of fracture initiation by ductile failure mechanisms in a 4340 steel", Int. J. Fract. 56, 1–24, 1992.

[45] D.Z Sun, A. Hoenig, W. Boehme, & W. Schmitt, "Application of micromechanical models to the analysis of ductile fracture under dynamic loading", Fracture Mechanics: 25th Volume, ASTM STP, 1220, 343-357, 1995.

[46] K.K. Mathur, A. Needleman, V. Tvergaard, "3D analysis of failuremodes in the Charpy impact test. Modelling Simulation", Materials Sci. Eng. 2, 617–635, 1994.

[47] S.A. Tsirkas, P. Papanikos & T. Kermanidis, "Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens", Journal of materials processing technology, 134 (1), 59-69, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad	Karaşin, Mehmet Nur
Web sayfası (Research Gate, Academia, etc.)	

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2022
Lisans	Dicle Üniversitesi	2017
Lise	Sezai Karakoç A.L	2013

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Özel İlgiler

Basketbol

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Mehmet Nur KARAŞİN		
Öğrenci No	18818003		
Ana Bilim Dalı	Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		
Program Türü	Tez☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)			
Tez Başlığı	Lazer kaynağı ile birleştirilen Ramor600 zırh çeliğinin mekanik özelliklerinin incelenmesi		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	69		
Raporlama Tarihi	20.06.2022		
Benzerlik Oranı (%)	14		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 20/06/2022 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %14 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☐Kaynaklar hariç

☐Alıntılar hariç/dâhil

☒Diğer (Her şey dahil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mehmet Nur KARAŞİN
Tarih: 20/ 06/ 2022

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI İmza:
Tarih: 20/ 06/ 2022

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Vedat ORUÇ İmza:
Tarih: 20/ 06/ 2022