ZIRH ÇELİKLERİNDE LAZER KESİMİN MEKANİK ETKİSİ

Ali Berk TAVACI

Gazi University, Institute of Science, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06560, Yenimahalle, Ankara

Email: tavacialiberk@gmail.com

ORCID: 0009-0009-5172-5048

YUSUF ÖZÇATALBAŞ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06560, Yenimahalle, Ankara

Email: ozcatalbas@gazi.edu.tr

ORCID: 0000-0002-4256-8492

ÖZET

Savunma sanayii günümüzde en hızlı gelişen sektörlerden biridir ve zırhlı muharebe araçları bu alanda önemli bir yer tutmaktadır. Bu araçların üretiminde çelik, alüminyum, seramik ve kompozit malzemeler kullanılmakla birlikte, şekillendirilebilirlik, tedarik kolaylığı ve maliyet açısından en yaygın tercih edilen malzeme çeliktir. Zırh çelikleri, bu araçların tasarımlarına uygun geometrilerde kullanılmak üzere çoğunlukla lazer kesim yöntemi ile işlenmektedir. Ancak bu yöntemde malzeme yüzeyine aktarılan yüksek ısı girdisi, martensitik yapıya sahip yüksek sertlikteki çeliklerde mikroyapısal dönüşümlere ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde değişimlere yol açabilmektedir. Literatürde özellikle 600 HB sertlik seviyesindeki çeliklerde, lazer kesim sonrasında çekme dayanımı ve akma dayanımında belirgin düşüşler raporlanmıştır. Bu çalışmada, ortalama 600 HB sertlikte zırh çeliğinde 1700 mm/dk kesim hızında gerçekleştirilen lazer kesim işleminin mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kesim işlemleri sabit 1900 W lazer gücü, belirli odak konumu ve sabit gaz basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Kesim sonrasında hazırlanan numunelerde akma dayanımı ($Rp_{0.2}$), çekme dayanımı (Rm) ve kopma uzaması (A%) değerleri ölçülmüş; ayrıca kesim yüzeylerinden pürüzlülük (Ra) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lazer kesim sonrası çekme ve akma dayanımlarında belirgin bir düşüş gözlenmediğini, ancak kopma uzamasında(süneklik) ve yüzey pürüzlülüğünde ısıl etkiden kaynaklı değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarda raporlanan yüksek düşüş değerlerinden farklı olarak, kullanılan kesim parametrelerinin ısı girdisini sınırladığı ve dolayısıyla mekanik özelliklerdeki değişimin minimum düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zırh çeliği, Lazer kesim, Mikroyapı, Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)

THE MECHANICAL EFFECTS OF LASER CUTTING ON ARMOR STEELS

ABSTRACT

The defense industry is one of the fastest-developing sectors today, and armored combat vehicles constitute a significant part of this field. Although materials such as aluminum, ceramics, and composites are also used in their production, steel remains the most commonly preferred material due to its formability, availability, and cost efficiency. Armor steels, which generally possess a martensitic microstructure with hardness levels around 600 HB, are typically shaped by laser cutting to achieve the geometries required by vehicle designs. However, the high thermal energy transferred to the material during laser cutting may cause microstructural transformations in these ultra-high-hardness steels, leading to changes in mechanical properties. In the literature, particularly for steels with hardness values near 600 HB, several studies have reported a considerable decrease in tensile and yield strength after laser cutting. In the present study, the effect of the laser cutting process at a constant cutting speed of 1700 mm/min on the mechanical properties and surface quality of armor steel with an average hardness of 600 HB was experimentally investigated. The cutting operations were carried out using a constant laser power of 1900 W, a fixed focal position, and constant assist-gas pressure. Following the cutting process, yield strength ($Rp_{0.2}$), ultimate tensile strength (Rm), and elongation at fracture (A%) values were measured on prepared specimens, while surface roughness (Ra) values were also obtained from the cut edges. The experimental results indicated no significant reduction in tensile and yield strengths after laser cutting, while a slight change in elongation and surface roughness was observed due to the localized thermal effects. These findings differ from the higher degradation levels reported in previous studies and suggest that the applied cutting parameters in this work effectively limited the thermal input, resulting in minimal variation in the mechanical behavior of the 600 HB armor steel.

Keywords: Armor steel, Laser cutting Microstructure, Heat affected zone (HAZ)

1. GİRİŞ

Günümüzde artan güvenlik tehditleri, askeri operasyonların çeşitlenmesi ve savunma sistemlerinin modernizasyonu, zırhlı muharebe araçlarının stratejik önemini giderek artırmaktadır. Bu araçlarda kullanılan malzemeler, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, darbe dayanımı ve maliyet etkinliği gibi kriterler doğrultusunda seçilmektedir. Zırh sistemlerinde kullanılan malzemeler arasında çelik, alüminyum, seramik ve kompozit esaslı malzemeler yer almakta; ancak şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, üretim kolaylığı ve tedarik avantajı gibi nedenlerle zırh çelikleri en yaygın kullanılan malzeme türü olarak öne çıkmaktadır (Cimpoeru 2016). Zırh çeliklerinin üretim süreci, hedeflenen mekanik özelliklerin elde edilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu süreç genellikle yüksek alaşımlı çeliklerin dökümü ile başlamakta, ardından sıcak haddeleme işlemiyle devam etmektedir. Sıcak haddeleme, çeliğin yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyona uğratılarak kalınlığının düşürülmesini ve homojen bir mikroyapı elde edilmesini sağlar. Elde edilen levhalar, daha sonra ısıl işlem basamaklarına tabi tutulur. Bu aşamada çelik, östenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılır, ardından su verme (quenching) işlemi ile hızla soğutularak martensitik yapı oluşturulur. Sonrasında uygulanan temperleme (tavlama) işlemi ise iç gerilmeleri azaltarak çeliğe tokluk kazandırır (ILSENBURGER Grobblech 2023). Bu işlem dizisi sonucunda, hem balistik dayanım hem de darbe tokluğu açısından yüksek performans gösteren, yaklaşık 600 HB sertlikte zırh çelikleri üretilmektedir.

Zırh çeliklerinin şekillendirilmesi ve montajında kullanılan işlemler arasında lazer kesim, plazma kesim, su jeti ve mekanik kesme yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemler arasında lazer kesim, sunduğu yüksek hassasiyet, dar kesim aralığı (kerf width), düşük deformasyon oranı ve seri üretim avantajları sayesinde tercih edilmektedir (Gao et al. 2020). Ancak lazer kesim işlemi sırasında malzeme yüzeyine aktarılan yüksek ısı girdisi, özellikle martensitik yapıya sahip yüksek sertlikteki çeliklerde mikroyapısal dönüşümlere neden olabilmektedir. Bu dönüşümler, kesim kenarına yakın bölgede temperlenmiş martensit, karbür çözünmesi veya ferritik dönüşüm şeklinde ortaya çıkar ve mekanik özelliklerde lokal değişimlere yol açabilir (Barényi et al. 2014). Lazer kesim parametreleri — özellikle kesim hızı, lazer gücü, odak konumu ve yardımcı gaz tipi — malzemenin ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) genişliği ve yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir (Nadkarni et al. 2021). Kesim hızı azaldığında, ışının malzeme üzerinde etki süresi artmakta ve ısı girdisi yükselmektedir; bu da ITAB genişlemesine ve mikroyapısal yumuşamaya yol açmaktadır. Tersine, kesim hızının artırılması, ısı girdisini sınırlayarak yapısal bozulmaların daha düşük seviyede kalmasını sağlar. Literatürde yapılan çalışmalar, düşük kesim hızlarında çekme ve akma dayanımlarında %10–20 arası azalma görülebileceğini, buna karşılık yüksek hızlarda yapılan kesimlerde bu etkinin minimuma indiğini göstermektedir (Khurshid et al. 2017; Gao et al. 2020). Zırh çelikleri üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle 600 HB sertlik sınıfındaki malzemelerde, lazer kesim sonrası mekanik özelliklerde belirgin düşüşler raporlanmıştır (Barényi et al. 2014). Bunun temel nedeni, kesim sırasında açığa çıkan yüksek ısı enerjisinin yüzeye yakın bölgede martensitik dönüşümün kısmen tersine dönmesi ve lokal temperleme etkisi oluşturmasıdır. Ancak bazı araştırmalarda, kesim hızının artırılması veya uygun gaz kombinasyonlarının kullanılmasıyla bu etkinin sınırlanabildiği belirtilmiştir (Gao et al. 2020). Gerçekleştirilen bu çalışmada, yaklaşık 600 HB sertliğe sahip zırh çeliğinde farklı kesim hızlarında gerçekleştirilen lazer kesim işleminin mekanik özellikler (çekme ve akma dayanımı, kopma uzaması) ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, lazer kesim sırasında oluşan ısı girdisinin malzemenin mekanik bütünlüğünü ne ölçüde etkilediğini belirlemek ve literatürde bildirilen düşüş değerleriyle karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktır.

2. MALZEME VE METOT

Deneysel çalışmada kullanılan zırh malzemesi kimyasal bileşim Tablo 1'de, mekanik özellikler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. 600HB sertlikteki malzemeye ait kimyasal bileşim (% ağırlıkça)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
600HB	0,45	0,7	0,8	0,015	0,004	0,5	3,0	0,6	0,003

Tablo 2. 600HB sertlikteki malzemeye ait mekanik özellikler.

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Çekme Dayanımı (N/mm^2)	Uzama (%)	Darbe Dayanımı (J)
600HB	1400	1950-2150	6	14 (-40°C)

8.5mm kalınlığındaki çekme numuneleri bystronic lazer kesim tezgahında kesilmiştir. Kesim parametreleri tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 1. Bystronic lazer kesim tezgahı

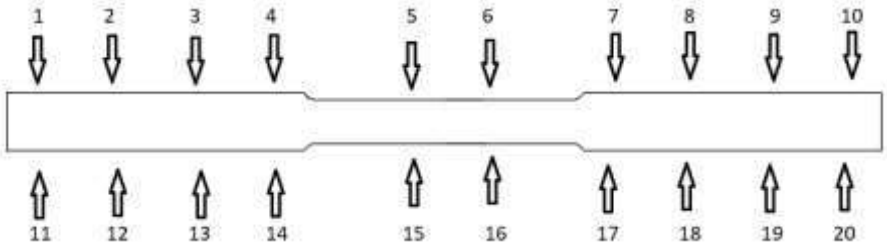
Tablo 3. 600HB sertlikteki malzemenin kesim parametreleri.

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Kesme Hızı (mm/dk)	Gaz Basıncı (Bar)	Yardımcı Gaz
600HB	1900	1700	0.8	O_2

Kesilen numunelerin görüntüleri Şekil 2'de verilirken, yüzey pürüzlülük ölçümleri Tablo 5'de verilmiştir. Ölçümler, Mahr MarSurf PS1 pürüzlülük cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme yüzeyinden 20 farklı noktadan ölçüm alınmış, alınan bölgeler Şekil 3'de gösterilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Ölçümler, DIN ISO 9013 standardı dikkate alınarak, malzeme kalınlığının 2/3 derinliğine kadar olan bölgeden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Kesilen Çekme Numuneleri



Şekil 3. Numune üzerindeki ölçüm noktaları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Belirlenen kesim hızında hazırlanan numunelere ait çekme test sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Belirlenen hız için kesilen 3 numunenin akma mukavemeti ($Rp_{0.2}$), çekme dayanımı (Rm) ve kopma uzaması (A%) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4. 600HB sertlikteki malzemeye ait çekme testi sonuçları.

Numune Adı	Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Yüzde Uzama
	MPa	MPa	%
A	1557,34	2090,62	4,30
B	1575,70	2120,84	5,40
C	1570,10	2108,57	5,10

Elde edilen sonuçlar, tüm numunelerde çekme dayanımlarının 2090–2120 MPa aralığında akma dayanımnın ise 1500-1600 arasında kaldığını göstermektedir. Bu değerler, üretici firma verileriyle oldukça uyumludur.

Kesim hızının belirlenmesiyle birlikte kopma uzamasında belirgin bir azalma eğilimi gözlenmiştir; kesilen numunelerde yüzde uzama yüzde 5 civarına düşmüştür. Bu durum, lazer kesim sırasında seçilen parametrelerin ITAB genişliğinin daralması ve lokal gevrekleşme oluşmuş olacağını işaret etmektedir. Öte yandan, $Rp_{0.2}$ ve Rm değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Bu da lazer kesim sürecinin çeliğin optimal parametreler seçildiği takdirde mukavemetini önemli ölçüde değiştirmediğini göstermektedir.

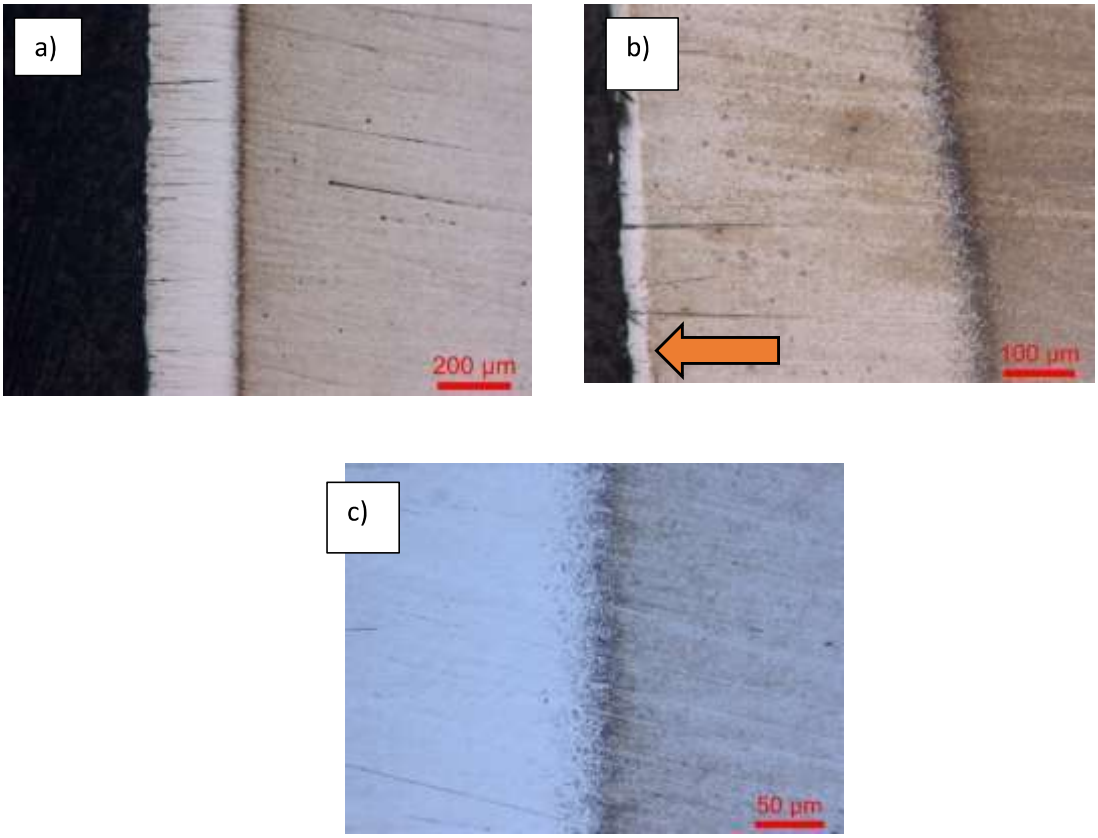
Kesilen ürünlerden alınan ölçümler Tablo 5'de verilmiştir.

Kesim yüzeylerinden alınan pürüzlülük ölçümleri, lazer kesimin yüzey kalitesini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler DIN ISO 9013 standardına göre, malzeme kalınlığının 2/3 derinliğinden yapılmıştır.

Tablo 5. 600HB sertlikteki malzemeleye ait lazer kesim sonrası yüzey pürüzlülükleri

Sıra No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	
A	2,797	3,303	2,598	2,646	2,525	2,947	2,803	2,847	2,809	2,805	
B	3,106	2,369	3,127	2,503	3,141	2,978	2,871	3,353	2,834	2,720	
C	2,362	3,001	2,656	3,160	3,229	3,088	2,916	2,749	2,823	2,828	
Sıra No	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**Ortalama**
A	3,353	2,852	2,808	2,825	2,835	2,771	2,821	3,303	3,229	2,777	**2,883**
B	2,785	3,206	2,819	2,822	3,229	2,773	2,784	2,873	2,828	2,810	**2,897**
C	2,700	2,854	2,802	2,745	2,821	2,825	2,826	2,759	2,795	2,832	**2,839**

Yüzey pürüzlülüğü değerleri, yüksek kesim hızının yüzey kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Ra değerinin yaklaşık 2.8 µm seviyesinde olması, erime tabakasının minimum, yeniden katılaşma izlerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, literatürde yüksek hızlarda ısı girdisinin azalmasıyla yüzey kalitesinin arttığını belirten çalışmalarla örtüşmektedir (Nadkarni et al. 2021).



Şekil 4. Kesilmiş zırh malzemesinin ITAB bölgesi mikroyapısı

(a)50x (b) 100x (c) 200x

Lazer kesim işlemi sonrasında elde edilen ve Şekil 4b'de verilen mikroyapı görüntüsü, ısı girdisinin malzeme üzerindeki etkisini net biçimde göstermektedir. Kesim yüzeyine en yakın bölgede, ergiyip katılaşma sonucu oluşan düzensiz, yönsüz ve mikroyapısal olarak homojen

olmayan bir tabaka gözlemlenmiştir. Literatürde bu bölge yeniden katılaşan tabaka (YKT) olarak tanımlanmakta olup, yüksek sıcaklık nedeniyle ergiyen malzemenin hızlı katılaşmasıyla oluştuğu belirtilmektedir (Saha et al., 2019). YKT tabakası, kesim işleminde en yüksek sıcaklıkla temas eden yüzeyidir.Şekil 4b'de okla gösterilmiştir. Yeniden katılaşan tabakanın hemen altında, kesim esnasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmış ancak erimeye uğramamış bir bölge yer almaktadır. Bu bölge, yüksek sıcaklıkların etkisiyle martensitik yapının kısmen temperlenmiş martensite dönüştüğü ve iğnemsi morfolojide bozulmaların başladığı bir ısıdan etkilenmiş zon olarak değerlendirilmektedir. Nadkarni et al. (2021) bu bölgeyi, yüksek sıcaklıklı ısı tesiri altındaki bölge (YS-ITAB) olarak sınıflandırmakta ve özellikle temperlenme etkisiyle mikrosertlikte düşüş yaşanabileceğini belirtmektedir. YS-ITAB, lazer kesiminde oluşan en aktif dönüşüm zonlarından biridir. Bu yüksek sıcaklık etkisinin daha da az hissedildiği, kesim yüzeyinden uzaklaşan bölgelerde ise düşük sıcaklıklı ısı tesiri altındaki bölge (DS-ITAB) olarak adlandırılan, martensitik yapının büyük oranda korunduğu ancak ısının yine de mikro yapıda hafif düzenlenmelere neden olduğu bir zon tespit edilmiştir. Andrés et al. (2016), (DS-ITAB) bölgesinde iğnemsi martensitin daha net ayırt edilebildiğini ve mekanik özelliklerin bu bölgede büyük ölçüde korunduğunu ifade etmektedir. Bu zonlardan sonra gelen ana malzeme, herhangi bir ısı etkisine maruz kalmamış ve orijinal temperlenmiş martensitik yapısını koruyan alandır. Bu bölge, ısıl işlem sonrası kazanılmış olan nihai mekanik ve mikroyapısal özelliklerini muhafaza etmektedir. Bu morfolojik zon ayrımı, lazer kesim gibi yüksek enerji yoğunluklu işlemler sonrası oluşan termal etkileri anlamak açısından kritik önem taşımaktadır. Özellikle zırh çelikleri gibi sertleştirilmiş martensitik yapıya sahip malzemelerde bu geçişlerin net olarak analiz edilmesi, kesim parametrelerinin malzeme performansına olan etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, yaklaşık 600 HB sertlik seviyesindeki zırh çeliğinin 1700 mm/dk kesim hızında lazerle kesilmesi sonrasında mekanik özelliklerinde ve yüzey kalitesinde meydana gelen değişimler kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Çekme testi sonuçları, gerilme–şekil değiştirme davranışı ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri birlikte incelenerek lazer kesim sürecinin malzeme performansı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. 1700 mm/dk hızda kesilen numunelerde gerçekleştirilen çekme testleri, malzemenin akma dayanımı ($Rp_{0.2}$) ve çekme dayanımı (Rm) değerlerinde belirgin bir düşüş oluşmadığını göstermiştir. Ölçülen $Rp_{0.2}$ değeri yaklaşık 1600 MPa, Rm değeri ise 2130 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürde 600 HB sınıfı çelikler için verilen tipik dayanım aralıkları ($Rp_{0.2} \approx 1500–1700$ MPa, Rm ≈ 2000–2200 MPa) ile tamamen uyumludur (Cimpoeru 2016). Bu sonuç, 1700 mm/dk kesim hızında lazerin malzeme üzerinde düşük bir ısı girdisi yaratması sayesinde, martensitik mikro yapının büyük ölçüde korunmuş olduğunu göstermektedir. Lazer kesim sonucunda oluşan ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) dar kalmış, martensitten temperlenmiş martensite veya ferritik fazlara dönüşüm için gerekli süre sağlanmamıştır (Nadkarni et al., 2021; Saha et al., 2019; Andrés et al., 2016). Bu nedenle kesim sonrası mekanik bütünlüğün korunduğu söylenebilir. Yapılan mikroyapı analizleri, lazer kesim işleminin zırh çeliği üzerinde belirgin bir ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) oluşturduğunu göstermiştir. Kesim kenarına en yakın bölgede yeniden katılaşma tabakası (YKT), onun hemen altında ise sırasıyla yüksek ve düşük sıcaklık etkili ITAB bölgeleri tanımlanmıştır. Bu zonlar, mikroyapısal bozulma derecelerine göre ayrımlanmış ve temperlenmiş martensit yapıda kısmi dönüşümler gözlenmiştir. Ancak bu mikroyapısal değişimlere rağmen çekme testi sonuçlarında mekanik özelliklerde belirgin bir farklılık meydana gelmemiştir. Bu durum, doğru lazer parametreleri ile işlem yapıldığında lazer kesim yönteminin yüksek sertlikteki zırh çelikleri için uygulanabilir ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1] Barényi, I., et al. “Effect of Laser Cutting on the Mechanical Properties of Armox 600 Steel.” Acta Metallurgica Slovaca 25, no. 3–4 (2014): 94–98.

[2] Cimpoeru, S. J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. DST Group TR-3305, Defence Science & Technology Group, 2016.

[3] Gao, F., et al. “Influence of Laser Cutting Parameters on the Quality of Armor Steels.” Optics & Laser Technology 132 (2020): 106484.

[4] Khurshid, M., et al. “Effect of Laser Cutting on Surface Integrity and Fatigue Strength of High-Strength Steels.” Materials & Design 114 (2017): 55–67.

[5] Nadkarni, A. V., et al. “Thermal Effects of Laser Cutting on Microstructure and Hardness of Ultra-High-Strength Steels.” Procedia Manufacturing 53 (2021): 52–61.

[6] “Cutting of Armour Steels.” ILSENBURGER Grobblech GmbH, Technical Data Sheet, February 2023.

[7] Andrés, D., Vázquez, A. J., & Riveiro, A. (2016). Characterization of the Heat Affected Zone in Steels Processed by Laser and Plasma Cutting. Journal of Materials Processing Technology, 237, 143–152.

[8] Nadkarni, A., Singh, D., Kattige, M., Pavan, P. G., & Srinivasan, S. (2021). Effect of Laser Cutting on the Surface Integrity of Quenched and Tempered Martensitic Steel Plates. Procedia Manufacturing, 54, 232–238.

[9] Saha, S., Ghosh, S., & Pal, T. K. (2019). Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Recast Layer Formed during Laser Beam Cutting of Martensitic Steels. Optics & Laser Technology, 112, 521–532.

[10] Hosseini, S. R., Dehghani, K., & Yazdani, M. R. (2018). Experimental Study on Heat-Affected Zone in Laser Cutting of Martensitic Steels with Different Thicknesses. Materials Testing, 60(2), 130–136.