



Journal of Turkish Operations Management

Bir imalat firmasında en iyi ürün kalitesi için lazer ile kesim parametrelerinin eniyilenmesi

Mustafa Yurdakul¹, Taha Tükel², Yusuf Tansel İç^{3*}, İbrahim Ülke⁴, Arif Balcı⁵, Serkan Güneş⁶

¹Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
e-mail: yurdakul@gazi.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-1562-5738>

²Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
e-mail: taha.tukel@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2692-1794>

³Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara
e-mail: yustanic@baskent.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9274-7467>

⁴Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
e-mail: ibrahimulke@gazi.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8927-0052>

⁵Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kafkas Üniversitesi, Kars
e-mail: arifbalci@kafkas.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-4932-9654>

⁶Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
e-mail: srkngnes@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-3976-0771>

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 08.07.2021
Revize: 27.09.2021
Kabul: 16.10.2021

Anahtar Kelimeler:

Fiber Lazer,
Deney Tasarımı,
Yanıt Yüzey Yöntemi,
En İyileme

Özet

Bu çalışmada, fiber lazer makinesinde çeşitli parametreler değiştirilerek üç farklı kalınlıkta işlenen St52 malzemesi ve süreç parametrelerinin kesim kalitesine etkileri araştırılmıştır. Yanıt yüzeyi metodolojisi ile 81 test örneğine ilişkin üç tekrarlı bir deney planı oluşturduk. Daha sonra ortalama yüzey pürüzlülüğünü (Ra), ortalama pürüzlülük derinliğini (Rz), ikinci dereceden ortalama pürüzlülük değerini (Rq), maksimum pürüzlülük derinliğini (Rt), yüzey sertliğini ve ısıdan etkilenen bölgeyi ölçtük. Son aşamada, yanıt değeri olarak test numunesi başına işlem süresi belirlendi. Daha sonra, Minitab yardımıyla ürün kalitesine etki eden eniyi parametreleri bulmayı amaçladık. Yüzey sertliği açısından sonuçları elde ettiğimizde kesme hızının artmasıyla yüzey sertliğinin azaldığını gözlemledik. Makro düzeyde yüzey sertliği, lazer gücü ve yardımcı gaz basıncının artmasıyla artmaktadır.

Optimizing laser cutting parameters for best product quality in a manufacturing company

Article Info

Article History:

Received: 08.07.2021
Revised: 27.09.2021
Accepted: 16.10.2021

Keywords:

Fiber Laser,
Design Of Experiment,
Response Surface Method,
Optimization

Abstract

In this study, St52 material that three different thicknesses were processed by changing various parameters on a fiber laser machine, and the effects of process parameters on cutting quality were investigated. We created three replicated experimental plans related to 81 test samples by the response surface methodology. Then, we measured the average surface roughness (Ra), average roughness depth (Rz), quadratic average roughness value (Rq), maximum roughness depth (Rt), surface hardness, and heat-affected zone. Finally, the processing time per test sample was determined as the response value. Afterward, with the help of Minitab, we aimed to find the optimum parameters affecting the product quality. When we obtained results in terms of surface hardness, we observed that the surface hardness decreases with the increase in cutting speed. The surface hardness at the macro level increases with the higher level of laser power and auxiliary gas pressure.

1. Giriş

Son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak, lazer teknolojisindeki gelişimler sanayiye de everilmiş ve lazer ile kesim yöntemleri yaygın olarak metal veya metalik olmayan malzemelerin kesilmesinde kullanılır hale gelmiştir. Ancak bu yaygın kullanım alanı ve uygulama sonucunda karşılaşılan kalitesizlik problemleri, kesilen malzeme bazında uygulanması gereken kesim faktörlerinin doğru seçilmesi gereksinimini de beraberinde getirmiştir (Tükel ve Yurdakul, 2019, Tükel 2020). Bu çalışma kapsamında, 8 mm 12 mm ve 15 mm kalınlıkta olan St-52 malzemesi, bir fiber lazer tezgâhında farklı faktör değerleri kullanılarak kesilerek faktörlerinin kesilen parçanın kalitesi üzerine etkileri incelenmiş ve en iyi faktör değerleri belirlenmiştir. Faktörler kesme hızı: 850 mm/dak, 1000 mm/dak ve 1150 mm/dak, lazer gücü: 3000 W, 3500 W ve 4000 W, yardımcı gaz basıncı: 0,55, 0,65, 0,75 bar olarak belirlenmiştir. Deney tasarımı yöntemlerinden biri olan yanıt yüzey yöntemi yardımıyla belirlenen 3 tekrarlı plan kapsamında, ilgili faktör değerleriyle lazer ile kesme işlemleri yapılarak 5 cm x 10 cm ebadında 81 adet deney parçası oluşturulmuştur. Kesme süresince diğer tezgâh parametreleri sabit değerlere ayarlanmıştır.

Kesme işleminin ardından, numune parçalarının ortalama pürüz derinliği (R_z), maksimum pürüz derinliği (R_t), ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), yüzey sertliği (HRA), kuadratik ortalama pürüzlülük değeri (R_q) ve ısı tesiri altındaki bölgeye ilişkin değerlerin ölçümü yapılmıştır. Her bir parça için işlem süresi değerleri de yanıt olarak kullanılmış ve Box-Bhenken tasarımı ile Minitab19 paket programı kullanılarak yanıt yüzeyi yöntemi uygulanarak ürün kalitesini eniyileyen faktör değerlerinin bulunması sağlanmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Bilimsel yazın taraması sonucunda; lazer ile kesme işleminde elde edilecek performans yanıtlarını en iyi düzeyde karşılayabilecek kesme parametrelerinin değerlerini bulmaya yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır:

Erdoğan (2007), CO₂ lazer delik delmede tezgah değerlerinin delik kalitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Kesme işlemi faktörlerini iş parçası kalınlığı: 1,2 ila 4 mm, lazer gücü: 2500 ila 4000 W, odaklama mesafesi: (-4) ila (-2) inç, yardımcı gaz basıncı: 8 ila 14 bar, lazer frekansı: 500 ila 1200 Hz olarak belirlemiştir. Sonrasında optik mikroskopla delik çapı ölçülerek, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve tekrar katılaştıran bölge büyüklükleri incelenmiştir. Sonuçta, farklı değerlerdeki kalınlıklarda farklı faktör değerlerinin en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Patel ve Patel (2011) ise, 6 mm kalınlığa sahip olan hardox 400 malzemesini kullanarak; CO₂ lazer kesme tezgahında lazer gücü: 100, 1500, 2000W, gaz basıncı: 0,5, 0,6, 0,7 bar, atım frekansı: 20, 25, 30 Hz ve kesme hızı : 200, 400, 600 mm/dak olarak belirlenen faktör değerleri ile bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, kesme aralığının gaz basıncı, frekans, lazer gücü ve kesme hızına bağlı olduğunu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0,6 bar gaz basıncı, 25 Hz atım frekansı, 1000 W lazer gücü, ve 200 mm/dak kesme hızı değerleri ile en dar kerf genişliğine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Cekic ve diğ. (2012), CO₂ lazer kullanarak üç farklı alaşımli çeliğin işlem parametrelerini eniyiledikleri çalışmalarında; yardımcı gaz olarak nitrojen, hava ve oksijeni kullanmışlardır. Çalışmalarında lazer tezgâh gücü 2000 W, parça kalınlıkları 3mm ve 4mm, nozül çapı 2 mm, lazer ışını dalga boyu 10600 nm olarak kullanılmıştır. Deney sonucunda çeliklerin lazer ile kesilmesinde oksijenin yardımcı gaz olarak kullanılmasının daha yüksek kesme hızına ulaşmayı sağlayabildiği, azot gazı ile gerçekleştirilen kesim işleminde ise son işlem gerektirmeyen yüzeyin elde edilebildiği gösterilmiştir.

Zaied ve diğ. (2012), S235 düşük karbonlu çeliğin CO₂ lazer ile kesilmesi işleminde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin matematiksel olarak modellenmesine çalışmışlardır. Çalışmalarında, 8mm kalınlığa sahip olan bir parça, kesme hızı: 600, 1200 ve 2200 m/dak, lazer gücü: 3, 4, 5 kW faktör değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan ANOVA analizi ile kesme hızı ve lazer gücü faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi belirlenmiş ve elde edilen matematiksel model sayesinde yüzey pürüzlülüğü değerini en küçükleyecek en iyi faktör değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

Bernat ve diğ. (2018) bir fiber lazer kesme işleminde lazer gücünün ve kesme hızının ölçü doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğü değerine etkilerini analiz ettikleri çalışmalarında, numune olarak paslanmaz çelik ve yapı çeliği malzemelerini kullanmışlardır. Numune kalınlıkları 6 mm olarak seçilmiştir.

Arcan (2011), CO₂ ile lazerle kesme tezgahında kesme hızı, kesme gazı basıncı ve lazer ışını odak noktası faktörlerini kullanarak, 5 mm kalınlığındaki St44 malzemesinin kesme kalitesinde belirlenmiş olan faktörlerin etkisini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, farklı faktörlerin sertlik değeri üzerindeki etkisinin malzemenin faz değişkenliğinin aynı olması sebebiyle düşük olduğu, faktör değerlerinin ayarlanarak istenen kesim yüzeylerinin elde edilebileceği açıklanmıştır. Ghany ve Newishy (2015) her biri ayrı ayrı yardımcı gazlar olarak atımlı ve sürekli dalga (CW) Nd: YAG lazer ışını ve azot veya oksijen kullanarak 1,2 mm östenitik paslanmaz çelik saclar için en iyi lazer kesim parametrelerini araştırmışlardır.

Chen (1998), gaz bileşiminin yumuşak çeliğin CO₂ lazer kesimine etkilerini araştırmıştır. Wee ve Li (2001), yumuşak çeliğin lazerle kesilmesinde çizgi oluşumu için iki boyutlu bir analitik model geliştirmişlerdir. Bagger ve Olsen (2001), 1,8 mm kalınlığında orta dayanımlı çelik için darbeli lazer kesim parametrelerini eniyilemeye çalışmışlardır. Li ve diğ. (2007), 2 mm kalınlığında yumuşak çelik sacların lazerle kesilmesi üzerine bir araştırma sunmuşlardır. Kaebernick ve diğ. (1999), en uygun kesme koşullarını belirlemek amacıyla farklı atım genişlikleri için kesme hızının bir fonksiyonu olarak giriş tarafındaki çentik genişliğini tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir.

Lamikiz ve diğ. (2005) güç, gaz basıncı, kesme hızı ve odak konumu gibi ana lazer kesim parametrelerini farklı AHSS sac çelik tiplerinde kesim kalitesi ve geometrisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Rajaram ve diğ. (2003) 4130 çeliğin CO₂ lazer kesim kalitesini araştırmış ve kerf genişliği ve ITAB genişliğinin lazer gücünden önemli ölçüde etkilendiğini, kesim hızının ise küçük bir rol oynadığını göstermişlerdir. Prasad ve diğ. (1998), 1 mm kalınlığında metal kaplı çelik sacların lazerle kesilmesini tartışmıştır. Chen (1999), yüksek basınç yardımcı gaz akışının 3 mm kalınlığında yumuşak çelik plakanın CO₂ lazer kesimine etkisini araştırmak için bir deney gerçekleştirmiştir.

Ghany ve diğ. (2006) lazer gücü, farklı gaz türleri, kesme hızı, gaz basıncı ve odak konumu gibi farklı faktörlerin, çapak, çentik genişliği ve kesim yüzeyi pürüzlülüğünün kesme kalitesi özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dubey ve Yadava (2008a, 2008b), yüksek silikon alaşımlı çeliğin ince sacları için çok performanslı özelliklere sahip Taguchi yöntemi ve yanıt yüzeyi yöntemi kullanarak lazer ışını kesme işlemini eniyilemeye çalışmışlardır.

Durukan ve diğ. (2014), 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzeme üzerinden belirli ölçülerde üçgen, kare ve dairesel şekilli parçaları farklı kesme şartlarında CO₂ lazer kesim tezgâhı ile keserek, kesilen numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde kesme parametrelerinin tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılarak etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında bağımsız değişkenler olarak lazer gücünü, kesme ilerlemesini, odak noktasını ve gaz basıncını seçmişlerdir.

Madic ve diğ. (2020), CO₂ lazer kesim yönteminde cüruf oluşumu, kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve kopma enerjisi ile ilgili pratik süreç kısıtlamalarını aynı anda göz önünde bulundurarak malzeme kaldırma oranını en üst düzeye çıkarmak için deney tasarımına dayalı bir en iyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir.

Ding ve diğ. (2020), genelleştirilmiş regresyon sinir ağına dayalı tümleşik bir model ve genetik algoritma yöntemlerini kullanarak (NSGAI) fiber lazer kesim paslanmaz çeliğin kalite özelliklerini öngörmek ve en iyilemek için bir model önermişlerdir.

Anghel ve diğ. (2020) ise, 304 sınıfı paslanmaz çelikten minyatür dişlilerin CO₂ lazerle kesilmesi üzerine yürütülen bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada, güç, kesme hızı, odak konumu ve gaz basıncı gibi lazer parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkilerinin analizi yapılmıştır. 9,04 mm dış çapa ve 4,5 mm alın genişliğine sahip paslanmaz çelik düz dişliler, yardımcı gaz olarak azotlu bir CO₂ lazer sistemi kullanılarak kesilmiştir. Yanıt yüzeyi yöntemine dayalı olarak, yukarıda bahsedilen lazer parametrelerinin her birinin üç düzeyde değiştiği toplam yirmi dokuz deney gerçekleştirilmiştir. ANOVA analizi sonucunda, odak konumu en önemli parametre olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, en iyi lazer parametreleri, lazer gücünde 2407 W, kesme hızı için 1,25 m/dak, odak konumu için (-) 2,4 mm, gaz basıncı için 12,5 bar olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerde elde edilebilen en iyi R_a değeri ise 0,43µm olarak tespit edilmiştir.

Chaki ve diğ. (2020), alüminyum alaşımının Nd:YAG lazer kesimi ile ilişkili kalite özelliklerinin tahmini ve en iyilenmesi için Yapay Sinir Ağlarını (ANN) ve Parçacık Sürü Optimizasyonunu (PSO) birleştiren entropi tabanlı ANN-PSO modelinin etkinliğini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, kesme hızı, atım enerjisi ve atım genişliğinin kontrol edilebilir giriş parametreleri olarak kabul edildiği, kerf genişliği, kerf sapması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma hızının yanıt olarak ölçüldüğü tam faktöriyel deney tasarımına dayalı bir model önerilmiştir.

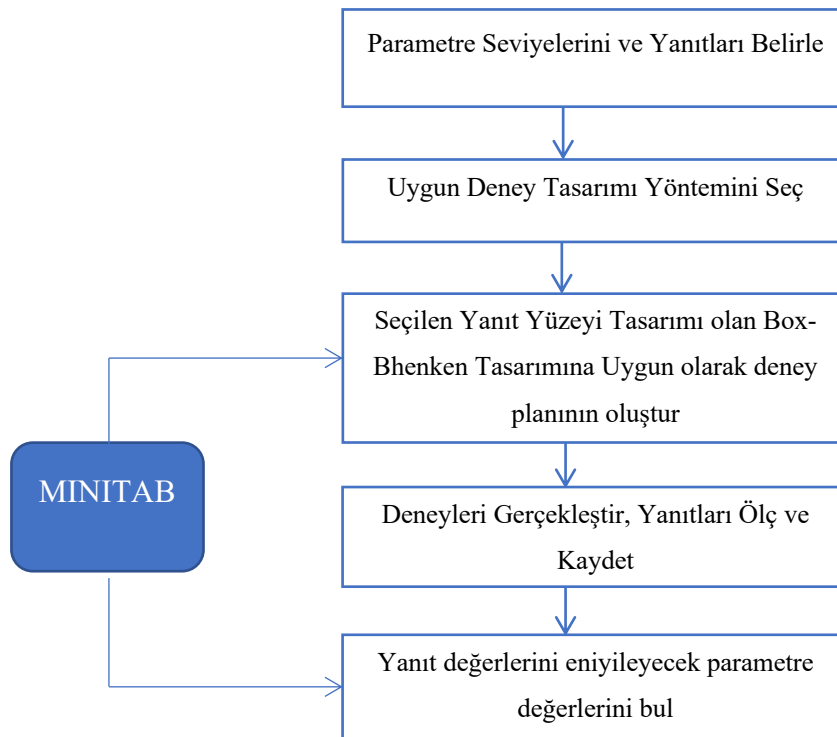
3. Yöntem

Çalışmada uygulanacak deney için tezgâha ait olan işlem faktörleri lazer gücü, gaz basıncı ve kesme hızı olarak, tezgâha ait işlem kapasitesi de değerlendirilerek belirlenmiştir. Başka bir değişken ise malzeme kalınlığıdır. Böylece çalışmamızda toplam 4 adet faktör kullanılmıştır. Her bir faktör için 3 farklı seviye kullanılarak bir deney tasarımı belirlenmiştir. Deneylerin ve ölçüm sonuçlarının tutarlılığı için 3 kez tekrarlanmış bir deney tasarımı Minitab19 yazılımı yardımıyla yanıt yüzey yönteminde Box-Behnken tasarımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sıralı bir şekilde gerçekleştirilmeyen ve sadece bir kez yapılabilecek deneyler için Box-Behnken tasarımları avantaj sağlamaktadır. Bu tasarım, birinci ve ikinci dereceden katsayıların etkin bir şekilde tahmin edilmesine olanak verir. Box-Behnken tasarımı daha az tasarım noktasına sahip olduğundan, aynı sayıda faktöre sahip merkezi kompozit tasarımlardan (Central Composite Design-CCD) daha az deneyle çalıştırılır. Deneye ait olan değişken ve sabit değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney tasarımında kullanılan parametreler

| Faktörler ve Seviye Değerleri | |
|--------------------------------|---|
| Faktörler | Seviye Değerleri |
| Parçanın Kalınlığı(A) (mm) | 1.Seviye: 8 / 2. Seviye: 12 / 3. Seviye: 15 |
| Kesme Hızı (B) (mm/dak) | 1. Seviye: 850 / 2. Seviye: 1000 / 3. Seviye: 1150 |
| Lazer Gücü (C) (Watt) | 1. Seviye: 3000 / 2. Seviye: 3500 / 3. Seviye: 4000 |
| Yardımcı Gaz Basıncı (D) (Bar) | 1. Seviye: 0,55 / 2. Seviye: 0,65 / 3. Seviye: 0,75 |
| Tezgâha bağlı parametreler | |
| | Değer |
| Nozul Mesafesi (mm) | 1,5 |
| Odak (Fokus) (mm) | 0 |
| Duty (%) | 100 |
| Frekans (Hz) | 5000 |
| Gaz Türü | Oksijen |
| Parça Boyutları (mm) | 100x50 |

Çalışmada takip edilen yönteme ilişkin olarak çizilen akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada takip edilen yönteme ilişkin akış şeması

3.1 Lazer Tezgâhı

Çalışmamızdaki deneyler Yilgenci San. ve Tic. A.Ş./ Sakarya firmasındaki Durma marka HD-F 6020 model fiber lazer tezgahında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Durma HD-F 6020 model fiber lazerle kesme tezgâhına ait olan teknik özelliklere ilişkin bilgiler Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Durma HD-F 6020 fiber lazer tezgâhı

Tablo 2. Fiber lazer tezgâhının özellikleri

| Özellik | Değer |
|--|-------------|
| X-Ekseni (mm) | 6150 |
| Y-Ekseni (mm) | 2100 |
| Z- Ekseni (mm) | 185 |
| Maksimum Sac Ölçüsü (mm) | 6096x2032 |
| Maksimum Sac Ağırlığı (kg/m ²) | 200 |
| Çalışma Modları | CW, QCW, SW |
| Çıkış Güç Değeri (W) | 400-4000 |
| Dalga Boyu Emisyon Değeri (nm) | 1070-1080 |
| Senkronizasyon (m/dak) | 170 |
| İvme (m/s ²) | 28 |
| Konumlama Hassasiyet Değeri (mm) | ±0,05 |

3.2 Deney Malzemesi

Deneyler St-52 çelik malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapı çelikleri sınıfında yer alan St-52 çoğunlukla yüksek mukavemet değeri gereken işlemlerde, köprüler, çelik konstrüksiyonlar, endüstriyel yapılar gibi alanlarda tercih edilmektedir. Mekanik özellikleri çoğunlukla içeriğinde yer alan karbon miktarlarına dayanır. Buna ek olarak üretilme şekli ile üretim sırasında içeriğine katılan fosfor, kükürt, azot, silisyum, bakır ve mangan elementleri mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Tablo 3’te, St-52 malzemenin kimyasal bileşimi, Tablo 4’te ise aynı malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. St-52 Malzemesinin kimyasal içeriği

| St-52 kimyasal içerik | (% ağırlık) |
|-----------------------|---------------|
| Karbon (C) | 0,20%-0,23% |
| Bakır (Cu) | 0,55%-0,60% |
| Mangan (Mn) | 1,60%-1,70% |
| Kükürt (S) | 0,035%-0,040% |
| Alüminyum (Al) | 0,015%-0,02% |
| Silisyum (Si) | 0,55%-0,60% |
| Fosfor (P) | 0,035%-0,040% |
| Azot (N) | 0,008%-0,009% |

Tablo 4. St-52 Malzemenin mekanik özellikleri

| Çekme Dayanımı (MPa) | | Akma Sınırı (MPa) | | Kopma Uzaması (%) | |
|----------------------|---------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| <3 mm | ≥3 mm | ≤16 mm | ≥16 mm | ≥3 mm | ≥40 mm |
| 510-680 | 490-630 | 355 | 345 | 22 | 21 |

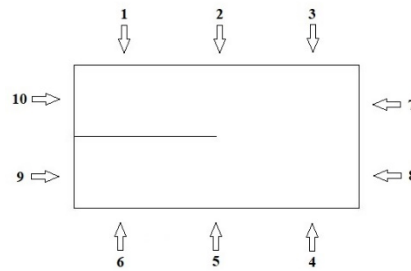
3.3 Deneyin Yapılışı

Çalışmamızda, farklı kalınlıkta kesilecek deney numuneleri ayrı ayrı tezgâhın tablasına yerleştirilmiştir. Belirlenen deney planına göre (Ek A), tezgâhın değerleri her defasında tek tek girilerek kesme operasyonu gerçekleştirilmiş ve kesilen parçalara numaralar verilerek ölçme işlemine hazır hale getirilmiştir.

4. Bulgular

4.1 Yüzey Pürüzlülüğü

Lazerle kesilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri Tesa Technology Rugosurf 20 marka yüzey pürüzlülüğü ölçme aleti kullanılarak ölçülmüştür. Ölçme süreci DIN ISO 9013 Standartları kapsamında, malzeme kalınlığının 2 mm'den büyük olması nedeniyle, her bir kesim yüzeyinin üst kısmından 2/3'ü kadarlık bir mesafeden, 10 farklı noktadan ölçümler olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktaları görülmektedir.



Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktaları

Kesim işlemi yapılan 8 mm kalınlıktaki parça 76'nın bütün kesim yüzeyleri Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Parça no 76 yüzey görüntüsü (kalınlık 8mm)

Minitab programında gerçekleştirilen ANOVA analizi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (R_a), kuadratik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_q), maksimum pürüz derinliği (R_t) ve ortalama pürüz derinliği (R_z) regresyon eşitliklerinin R^2 (adj) değerlerinin %92'nin üzerinde olduğu ve iyi bir tahmin için elverişli olduğu değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri için çizilen yanıt yüzey grafikleri ve en iyi değerleri Şekil 5-Şekil 12'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne dair regresyon eşitlikleri ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

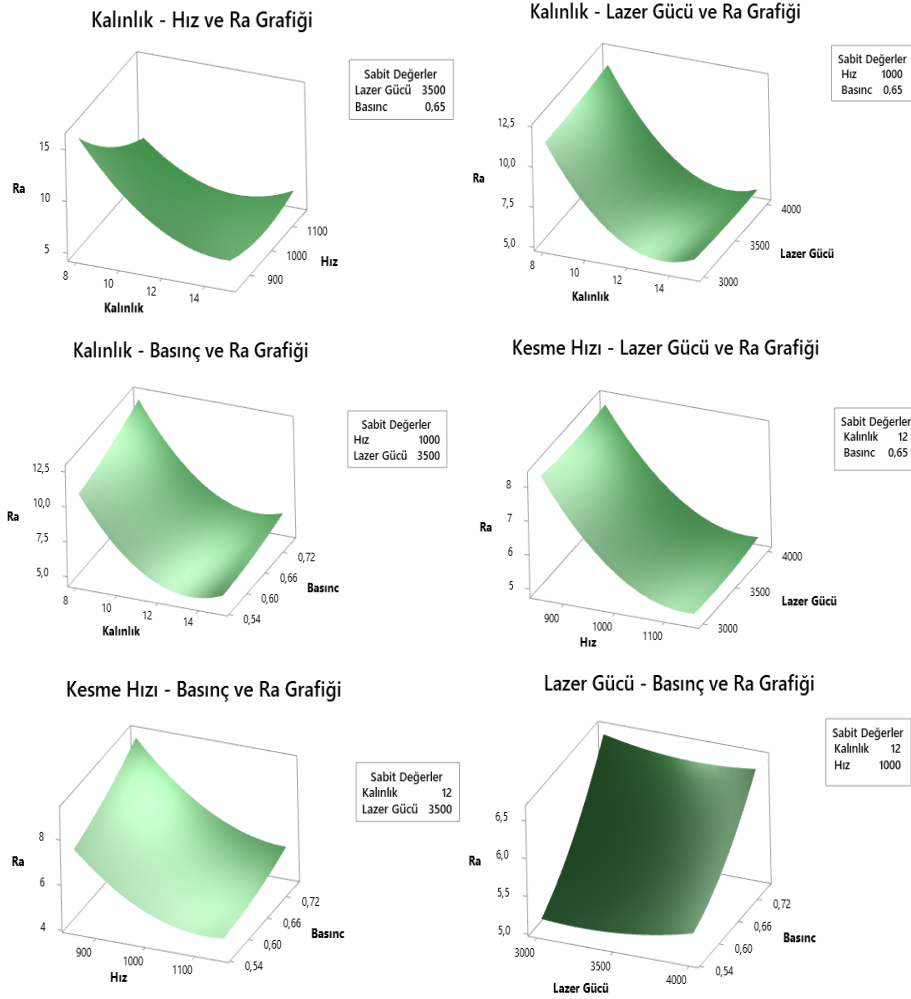
$$Ra=6,00839-2,92252x_1-1,84208x_2+0,03879x_3+0,69370x_4+2,50341x_1^2+0,90732x_2^2+1,70002x_1x_2 \quad (1)$$

$$Rq=7,40160-3,61933x_1-2,26268x_2+0,03715x_3+0,86102x_4+3,07884x_1^2+1,08147x_2^2+2,14194x_1x_2 \quad (2)$$

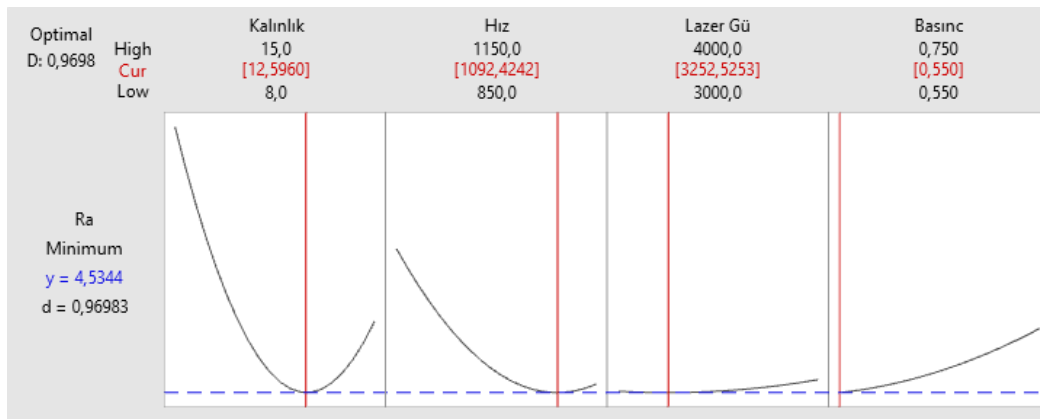
$$Rt=43,40122-17,88516x_1-12,21957x_2+0,02047x_3+5,90248x_4+14,48866x_1^2+4,97228x_2^2+11,60758x_1x_2-3,47665x_1x_4 \quad (3)$$

$$Rz=30,29460-11,14537x_1-8,08853x_2+0,27646x_3+3,00264x_4+11,15284x_1^2+3,54811x_2^2+9,02777x_1x_2 \quad (4)$$

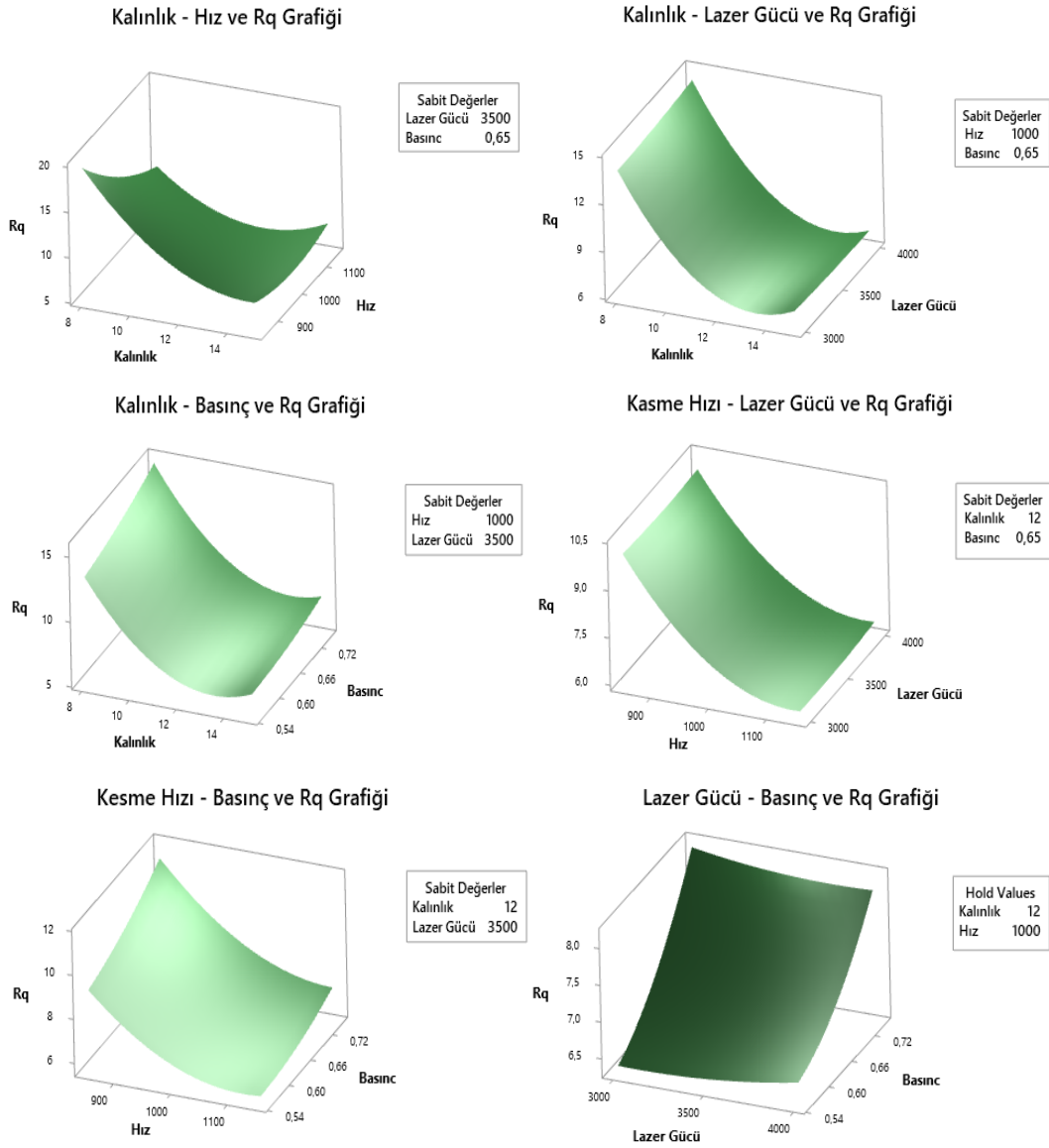
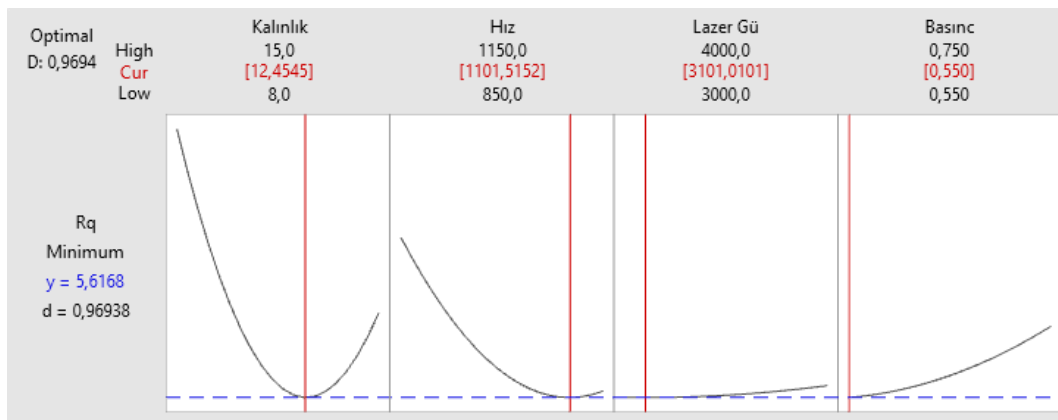
Denklemlerde x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basıncı olarak temsil edilmektedir.

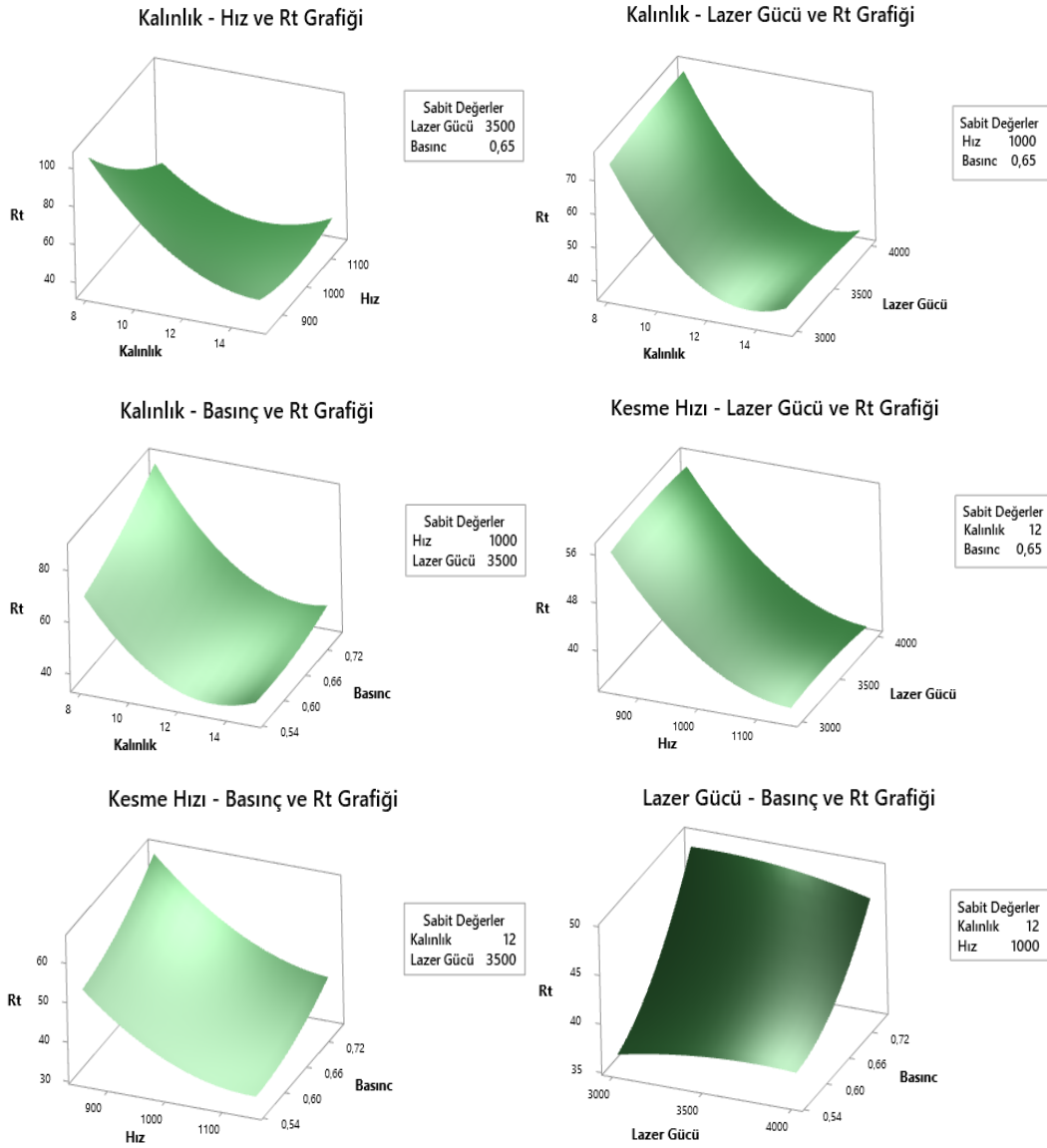
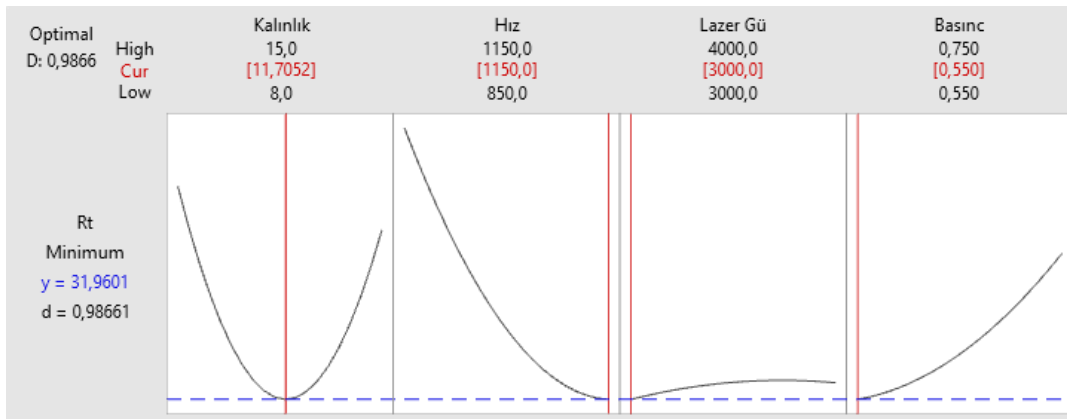


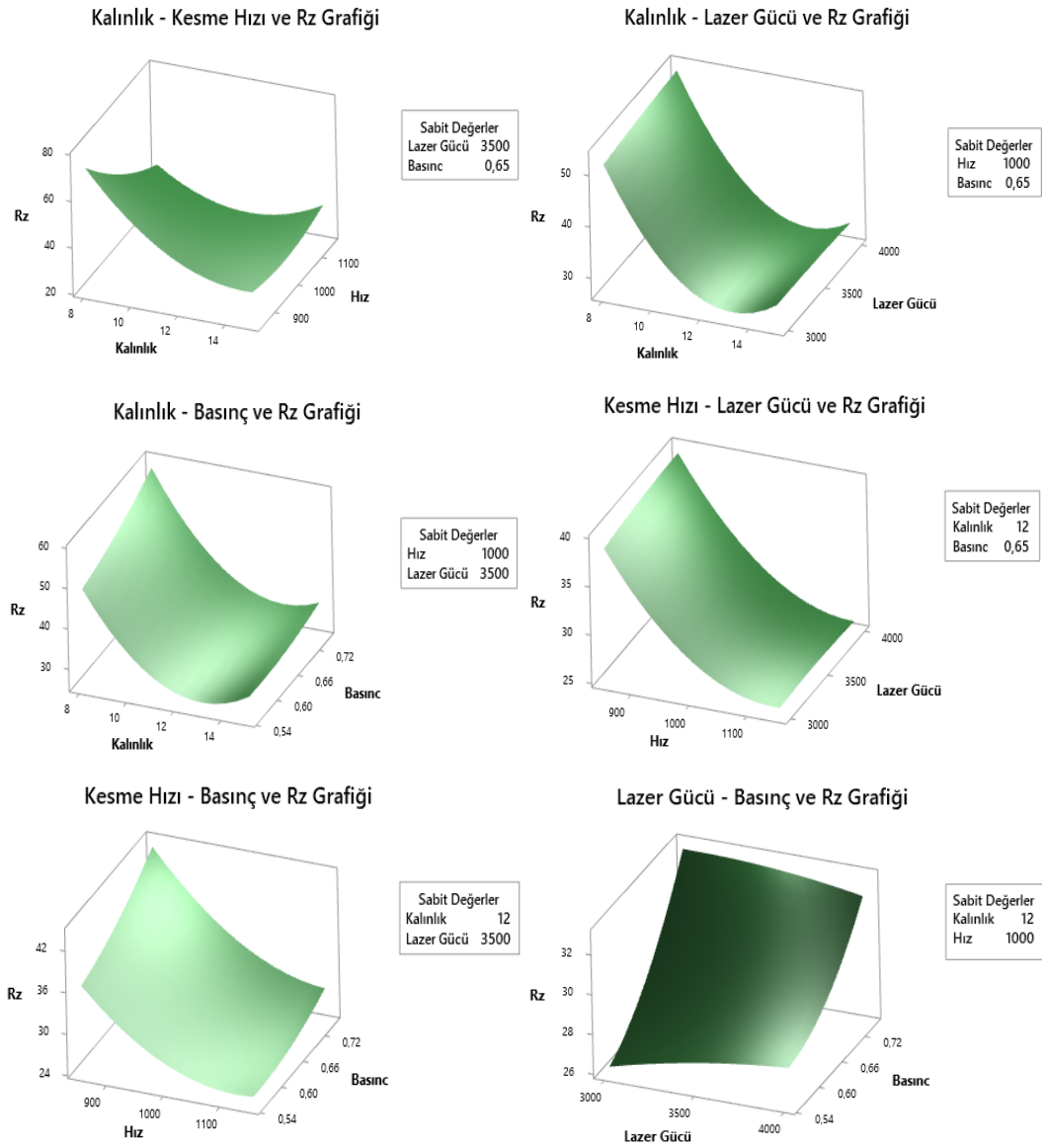
Şekil 5. Ra için elde edilen grafikler



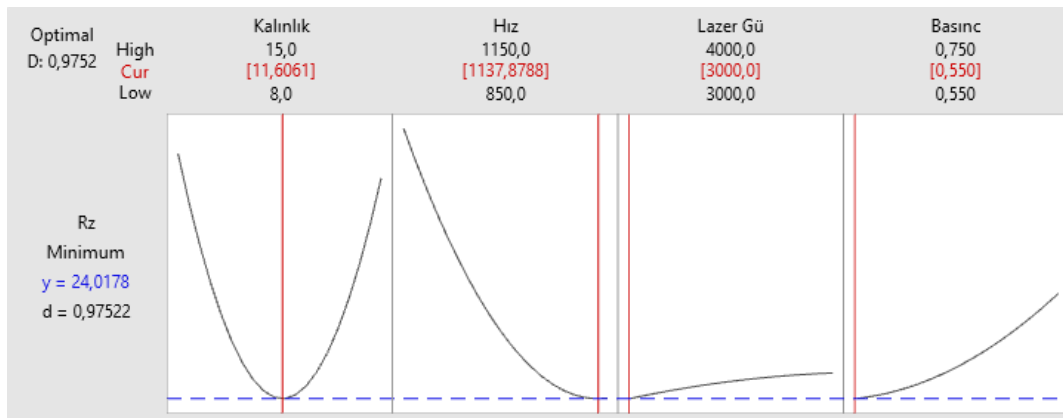
Şekil 6. Ra ana etki değerleri ve en iyi değerler grafiği

Şekil 7. R_q için elde edilen grafiklerŞekil 8. R_q ana etki değerleri ve en iyi değerler grafiği

Şekil 9. R_t için elde edilen grafiklerŞekil 10. R_t ana etki değerleri ve en iyi değerler grafiği



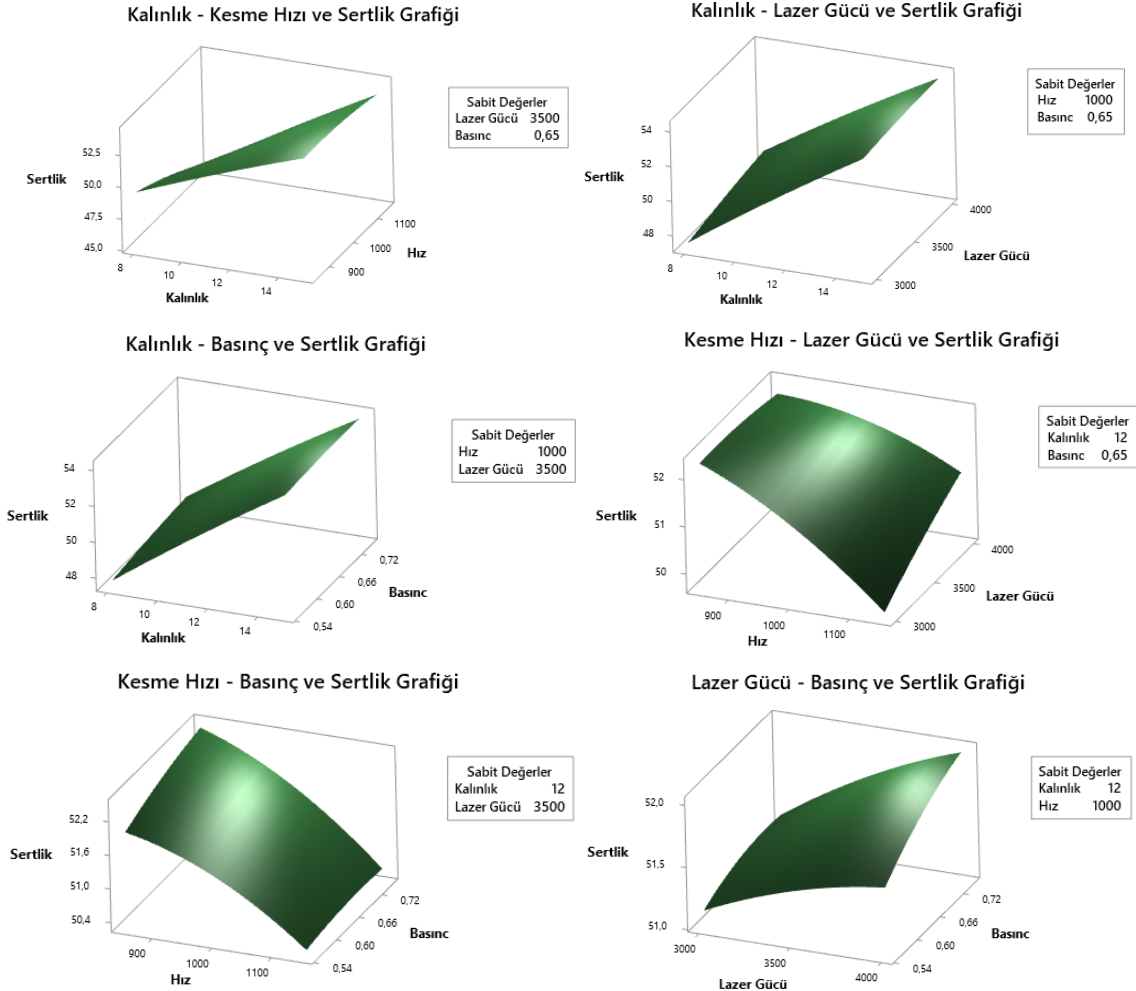
Şekil 11. Rz için elde edilen grafikler



Şekil 12. Rz ana etki değerleri ve en iyi değerler grafiği

4.2 Yüzey Sertlik Değeri

Kesme işlemi gerçekleştirilmiş olan numunelerin, kesim işlem sırasında artan ısıyla etkileşmesi nedeniyle kesilmiş yüzeylerinde oluşan makro sertlik değerleri Rockwell yöntemi ile ölçülmüştür. Numune ölçüm işlemleri Time Technology-TH 500 model tezgâh tipi Rockwell sertlik ölçme aleti ile gerçekleştirilmiştir.

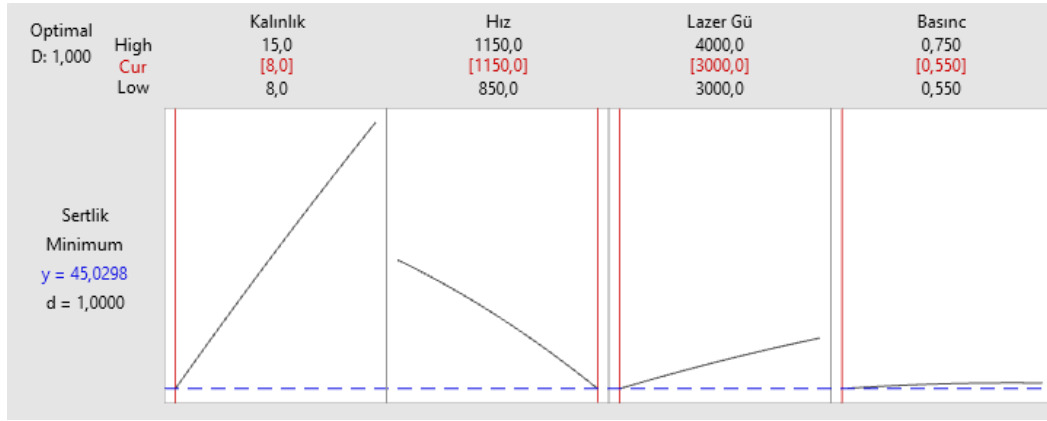


Şekil 13. Yüzey sertliği için elde edilen grafikler

Ölçüm, numune parçanın alete konumlandırılması ve elmas ucun numuneye temas etmesinin ardından, 10 Kgf ön yük uygulanarak ve ardından 60 Kgf toplam yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümün ardından, HRA cinsinden sertlik değerleri belirlenmiştir. Minitab programı yardımıyla sertlik değeri için regresyon fonksiyonu Eş. (5)'te verilmiş olup, R^2 (adj) değerinin %84,74 ile yeterli düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

$$S=51,17830+3,07056x_1-0,99584x_2+0,31088x_3+0,16971x_4+0,66512x_1x_2 \quad (5)$$

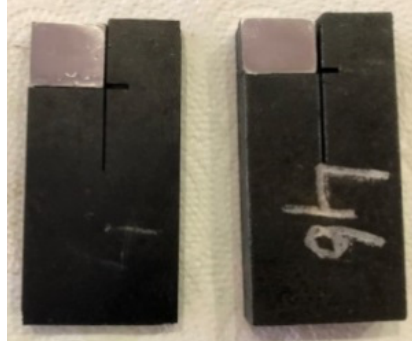
Minitab19 kullanılarak sertlik için yüzey grafikleri ve en iyi parametre değerleri Şekil 13 ve Şekil 14'de verilmiştir. Ulaşılan sonuçlara göre 8 mm kalınlıkta, 1150,0 mm/dak kesme hızında, 3000 W lazer gücünde ve 0,55 bar yardımcı gaz basıncında yüzey sertliği değeri 45,02 HRA olarak tespit edilebilmektedir.



Şekil 14. Yüzey sertliği en iyileme sonuçları

4.3 Isıdan Etkilenen Bölge

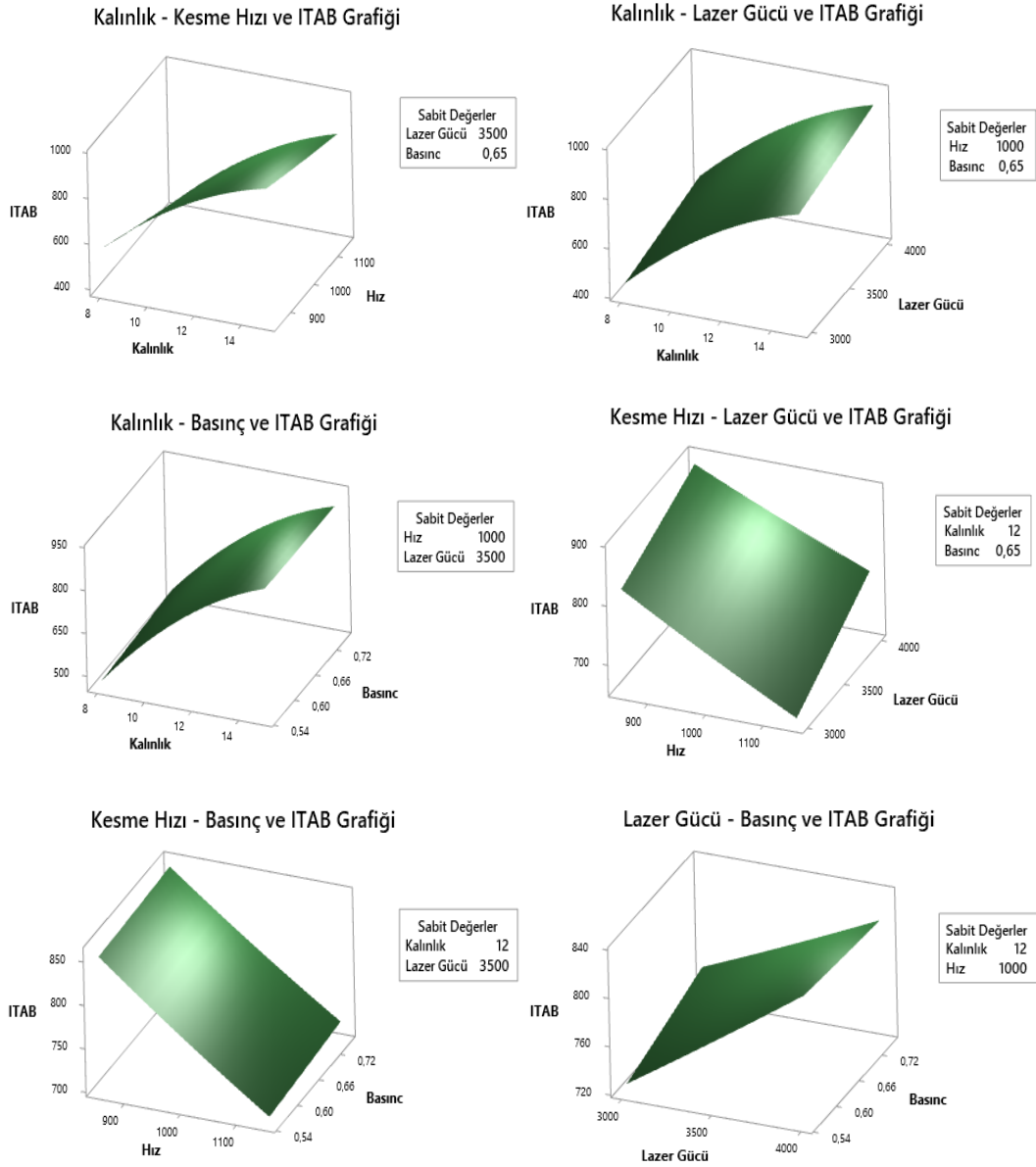
Lazer ile kesilmiş olan numune parçaların işlem sırasında açığa çıkan ısı ile etkileşimi nedeniyle kesilen yüzeyin ITAB değeri Gazi Üniversitesi'ndeki Toz Metalürji laboratuvarında yer alan Leica marka mikroskop kullanılarak belirlenmiştir. ITAB değerini ölçmek amacıyla, numuneler çok büyük olduğundan tamamına yüzey parlatılması yapılamaması nedeniyle numunelerden daha küçük alanda parçalar kesilmiş ve ölçümler bu küçük numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 15).



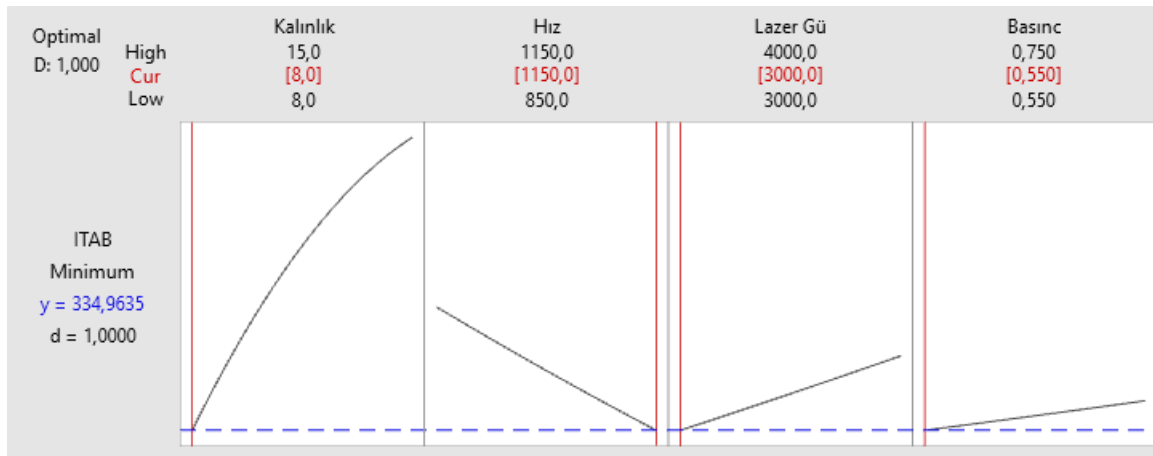
Şekil 15. ITAB ölçüm için bir numune örneği

Kesilmiş olan numuneler 400, 600, 1200 ve 2500 kum zımpara kullanılarak, Gazi Üniversitesi Toz Metalürjisi Laboratuvarındaki Struers marka Labpol1 parlatma makinasında parlatılmıştır. Dağlanma işlemi amacıyla ISO/TR16060'de belirtildiği gibi %95 etil alkol ve %5 nitrik asit ile hazırlanan nital çözeltisi içinde numuneler 10-15 saniye bekletilmiştir. Ardından numuneler mikroskop altında 50x büyütülerek incelenmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen regresyon fonksiyonu Eş(6)'da, yüzey grafikleri Şekil 16'da ve en iyileme sonuçları Şekil 17'de verilmiştir. Regresyon fonksiyonunun R^2 (adj) değerinin %96,59 ile yeterli düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

$$I=750,42637+208,37361x_1-73,56304x_2+40,91314x_3+5,42846x_4-57,79970x_1^2 \quad (6)$$



Şekil 16. ITAB mesafesi için elde edilen grafikler



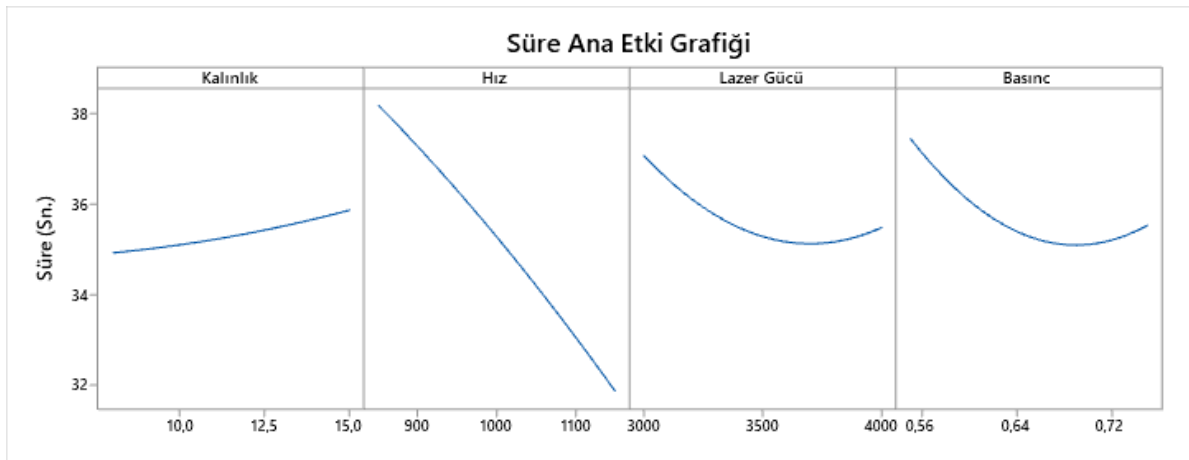
Şekil 17. ITAB en iyi değerler grafiği

4.4 İşlem Süresi

Lazerle kesme işlemi süresi için, her bir parça için üretilme sürelerinin belirlenmesi sonucunda bir eniyileme yapılarak süre kayıplarının önüne geçilebileceği değerlendirilmiştir. İşlem süresi üzerinde etkili olan faktör kesme işleminin hızı olarak belirlenmektedir. Yüksek miktarlı üretimlerde işleme süresinin azalması üretim maliyetinin de azalmasını beraberinde getirecektir. Kesme süresi için elde edilen regresyon fonksiyonu Eş.(7)'de verilmiştir. Regresyon fonksiyonunun R^2 (adj) değeri %71,2 olup, değerlendirme yapılabilecek alt sınır değeri olarak kabul edilmiş ve yeterli düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

$$T=35,26360+0,47222x_1-3,16667x_2-0,79866x_3-0,95917x_4+1,00000x_3^2+1,20833x_4^2+2,91667x_3x_4 \quad (7)$$

Kesme işlemi süresi için ana faktör kesme hızı olduğundan diğer grafikler Şekil 18'e eklenmemiştir. Kesme hızı arttığında parça başına gerekli olan işleme süresinde kısalma olacaktır. Şekil 18'deki ana etki grafiğinden de görüldüğü üzere, kesme hızı faktörü haricindeki diğer faktörlerin etkisinin düşük mertebelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 18. İşlem süresinin ana etki grafiği

4.5 Çapak Oluşumunun İncelenmesi

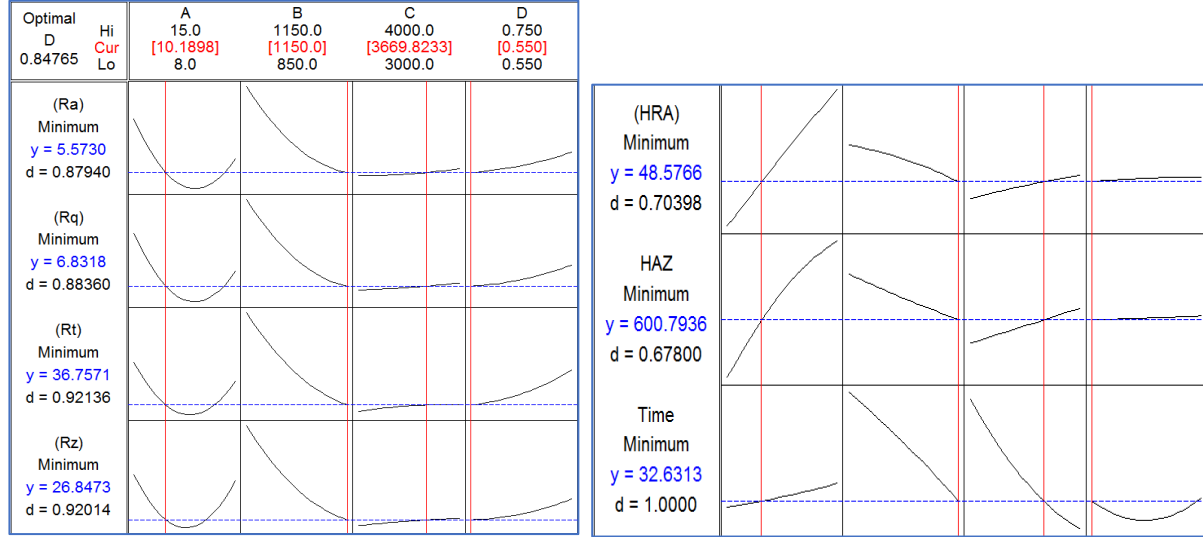
Kesilen deney parçaları analiz edildiğinde; 18,19,32 ve 37,38,60 nolu numunelerde çok fazla çapak oluşmuştur (Şekil 19). Bu numunelerin kesiminde yardımcı gaz basıncının 0,65 bar düzeyinde bulunması, çapak oluşmasında gaz basıncının önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ergiyen malzemeyi mümkün olan en kısa sürede uzaklaştırmak için yardımcı gaz basıncı değerinin yüksek seviyede tutulmasının fayda sağlayabileceği değerlendirilebilir.



Şekil 19. 18-19-32 numaralı numunelerde çapak oluşumu

4.6 Tüm Yanıtların Aynı Anda Eniyilenmesi

Lazer makinesinde farklı parametrelerle kesilmiş St-52 malzemeden imal edilmiş 81 numunenin ölçülmüş olan yanıtlarının analizi için, 3 farklı kalınlıkta en iyi kesme parametrelerini bulmak üzere Minitab programının “yanıt en iyileycisi - response optimizer” aracı kullanılmıştır. Tüm yanıtları aynı anda eniyileyen parametre değerleri Şekil 20’de verilmiştir.



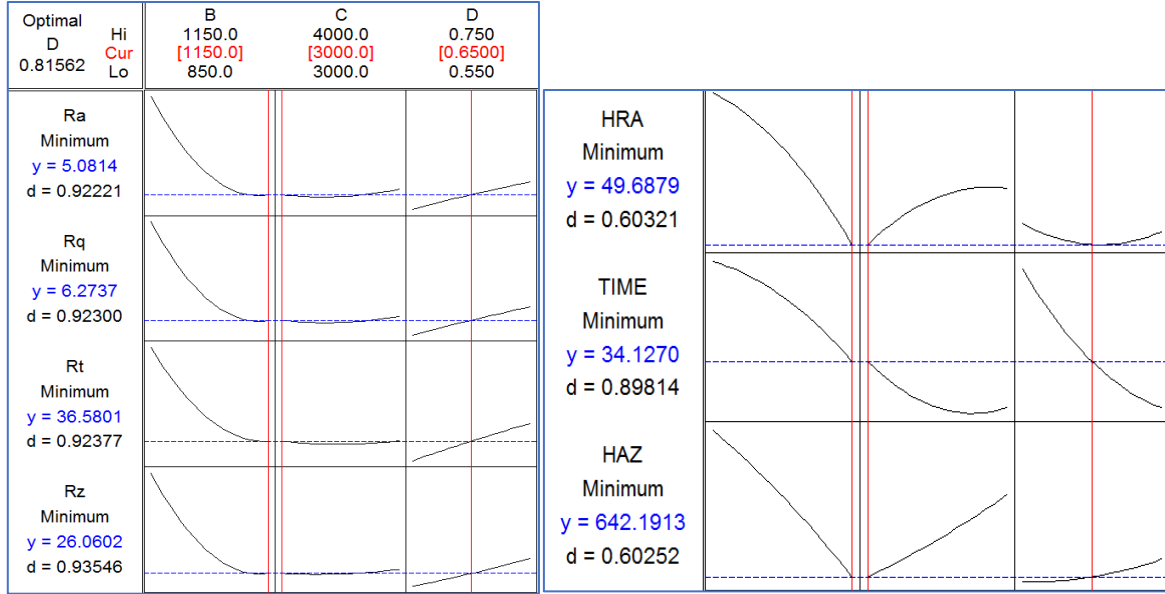
Şekil 20. Tüm yanıtlar için eniyileme sonuçları

Buna göre, Parça Kalınlığı (A): 10,19 mm, Kesme Hızı (B): 1150 mm/dak, Lazer Gücü (C): 3669 W, Yardımcı Gaz Basıncı (D): 0,55 bar değerlerinde tüm yanıtlar için eniyilenmiş bir çözüm olacaktır. Bu sonuçlar tüm yanıtların eşit ağırlıklı alındığı duruma göre elde edilmiştir. Birbirinden farklı altı ağırlık senaryosuna göre, yeni en iyileme sonuçları elde edilmiştir (Çizelge 5). Tablo 5’ten görüldüğü gibi, parça kalınlığı (A) ağırlığa en duyarlı parametredir ve 8,5 ila 10,09 arasında değişen değerler almıştır. Yeni bir analiz olarak, parça kalınlığı 12 mm olarak sabit tutulup B, C ve D faktörleri için en iyileme çalışması tekrarlanarak yeni en iyi parametre değerleri elde edilmiştir (Şekil 21).

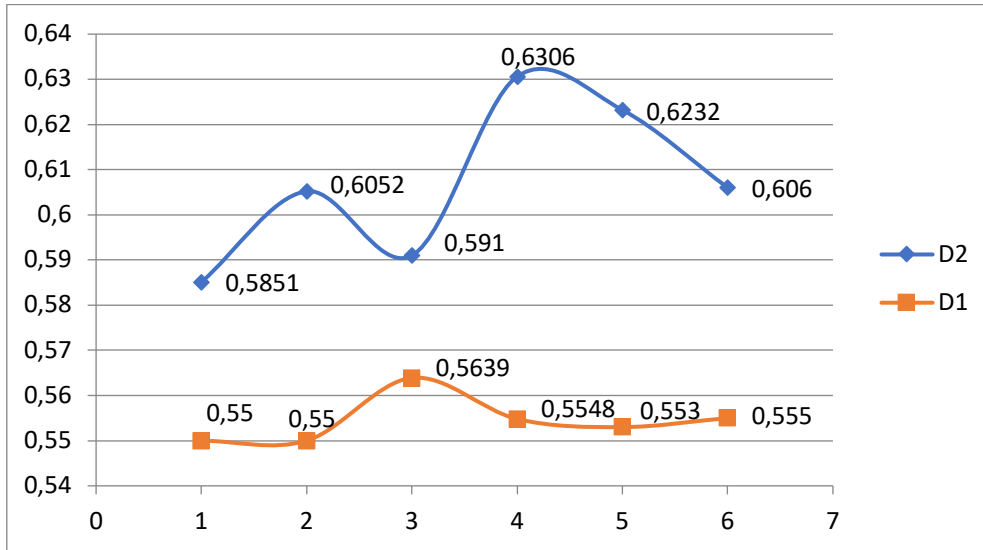
Tablo 5. Bazı etkili yanıtlar için ağırlık senaryoları

| Ağırlık Senaryoları | | En İyi Değişken Parametre Değerleri | | | | |
|---------------------|-----|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Ra HRA | HAZ | Kalınlık (A) (mm) | Kesme Hızı (B) (mm/dak) | Lazer Gücü (C) (W) | Yardımcı Gaz Basıncı (D) (bar) | |
| 10 | 10 | 9,3 | 1150 | 3000 | 0,55 | |
| 5 | 10 | 9,1 | 1150 | 3000 | 0,55 | |
| 10 | 5 | 10,09 | 1150 | 3000 | 0,639 | |
| 10 | 7 | 8,5 | 1150 | 3000 | 0,5548 | |
| 7 | 3 | 9,37 | 1150 | 3000 | 0,553 | |
| 3 | 10 | 9,01 | 1150 | 3000 | 0,555 | |

Yeni en iyileme sonuçları, D faktörünün farklı ağırlık senaryoları için en hassas faktör olduğunu göstermektedir. Çizelge 5’deki ağırlıklar ile en iyileme çalışmaları tekrarlanmış ve en iyi gaz basıncı değerinin değişimi Şekil 22’de gösterilmiştir. Parça kalınlığı bir değişken parametre olarak alındığında (şekilde D1 olarak gösterilmiştir), en iyi yardımcı gaz basıncı değişimi dar bir aralıkta değişirken, parça kalınlığı 12 mm de sabit tutulduğunda (şekilde D2 olarak gösterilmiştir), gaz basıncı değerinin arttığı ve daha geniş bir aralıkta değiştiği gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, lazer gücü (C) parametresinin en iyi değerinin de 3000 W olarak gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 21. B, C ve D faktörleri için en iyileme sonuçları



Şekil 22. En iyi gaz basıncı değeri (D) grafiği

5. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, lazer ile kesilen malzemelerin kalitesi bakımından, tezgâh parametreleriyle birlikte malzeme kalınlığının sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmektedir. St-52 malzemesi, 8 mm, 12 mm ve 15 mm kalınlıkları bazında değerlendirildiği zaman, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili olan faktörün kesme hızı olduğu belirlenmiştir. Kesme hızı arttığında, yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan diğer faktörlerden gaz basıncı değerinin artması durumunda yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Lazer gücü değişimi, ilgili faktörler içerisinde sonuçlar üzerinde daha az etkiye sahip olmakta ve lazer gücündeki azalma sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri de azalmaktadır.

Yüzey sertliği açısından sonuçlar analiz edildiğinde, kesme hızı arttığında yüzeyin sertliğinin azalacağı, lazer güç değeri ile yardımcı gaz basıncının artması durumunda ise makro-yüzey sertliğinde artış olacağı belirlenmiştir.

ITAB açısından sonuçlar değerlendirildiğinde, kesme hızı artışı ITAB üzerinde olumlu etkiye sebep olmaktadır. Lazer gücü arttığında ise malzemenin yüzey kısmına etkiyen enerji de yükseldiğinden dolayı ITAB'ın büyüdüğü, yardımcı gaz basıncının sürece etkiyen diğer faktörlere göre daha az etkiye sahip olduğu, fakat yardımcı gaz basıncı arttığında ITAB'ın da büyüdüğü belirlenmiştir.

Çapak oluşumunun azaltılması için, ergitilen malzeme kesim bölgesi civarından daha hızlı uzaklaştırılması için yardımcı gaz basıncının artırılması gerektiği belirlenmiştir.

Bu çalışmada St-52 malzemesi için lazer ile kesim işleminde uygun olan kesme parametreleri elde edilmiştir. Malzeme tipi değiştiğinde farklı parametre değerlerinin uygun olacağı açıktır. Dolayısıyla, kompozitler, alaşımli metaller, ahşap bazlı malzemeler, polimerler açısından da yeni çalışmalar yapılarak farklı malzemeler için uygun kesme parametreleri belirlenmelidir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışma Taha TÜKEL'in yüksek lisans tez çalışmasına dayanmakta olup, tez çalışması sonrasında gerçekleştirilen ilave çalışmalarla oluşturulmuştur. Bu araştırmada; Taha TÜKEL, deney planının hazırlanmasında, deneysel çalışmaların yapılmasında, optimizasyon sonuçlarının elde edilmesinde, Mustafa YURDAKUL, problemin ortaya konmasında ve çözüm yöntemi üretilmesinde, senaryo analizlerinin geliştirilmesinde, Yusuf Tansel İÇ, deney tasarım planının ve modelin geliştirilmesinde, analizlerin derinleştirilmesinde ve makalenin yazılmasında, İbrahim ÜLKE, yazım kontrolünün yapıp makalenin düzenlenmesinde, Arif BALCI, içeriğin ve sunumun geliştirilmesine, Serkan GÜNEŞ, deneysel çalışmaların tamamlanmasına destek olarak katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Anghel, C., Gupta, K., & Jen, T. C. (2020). Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting. *Optik*, 203, 164049. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164049>

Arcan A. (2011). Lazer ışını ile metallerin kesilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi (2011). *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 8-15. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/559801>

Bagger C. and Olsen FO. (2001). Pulsed mode laser cutting of sheets for tailored blanks. *Journal of Material Processing Technology*, 115, 131–135. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00752-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00752-X)

Bernat,R., Zalezak, Z., Zarnovsky, J. and Kescskes, N. (2018). Monitoring the Quality of Laser Cutting. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 50 (1), 137-145. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/293129>

Cekic, A., Begic, D. and Kulenovic, M. (2012). Optimization of Process Parameters of Alloyed Steels Using CO₂ Lasers. *International DAAAM Symposium*, 0247-0250. Erişim adresi: https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2012/057.pdf

Chaki, S., Bose, D., & Bathe, R. N. (2020). Multi-objective optimization of pulsed Nd: YAG laser cutting process using entropy-based ANN-PSO model. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 88-110. doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00109-8>

Chen SL. (1998). The effects of gas composition on the CO₂ laser cutting of mild steel. *Journal of Material Processing Technology*, 73:147–59. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00224-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00224-0)

Chen S. L. (1999). The effects of high pressure assistant gas flow on high power CO₂ laser cutting. *Journal of Material Processing Technology*, 88, 57–66. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00402-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00402-6)

- Ding, H., Wang, Z., & Guo, Y. (2020). Multi-objective optimization of fiber laser cutting based on generalized regression neural network and non-dominated sorting genetic algorithm. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103337>
- Dubey A. K. and Yadava V. (2008). Multi-objective optimization of laser beam cutting process. *Optics & Laser Technology*, 40(3), 562–570. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.002>
- Dubey A. K. and Yadava V. (2008). Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based super alloy sheet using orthogonal array with principal component analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 46, 124–132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.08.011>
- Durukan, Z., Motorcu, A.R. and Güllü, A. (2014). Modeling of the effects of parameters on dimensional accuracy in laser cutting of AISI 304 steel with different geometries. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), 505-515. Erişim adresi: <https://hdl.handle.net/11503/1391>
- Erdoğan Ş. (2007). Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara. Erişim adresi: https://dspace.gazi.edu.tr/bitstream/20.500.12602/149309/1/senol_erdogan_tez.pdf
- Ghany K.A. and Newishy M. (2005). Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser. *J Mater Process Technology*, 168:438–47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.251>
- Ghany K. A., Rafea H. A. and Newishy M. (2006). Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 28, 111, 1–7. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-004-2468-x>
- Hecht J. (2019) *Understanding Lasers (Fourth Edition)*. United States of America: John Wiley&Sons, 4-5, 240-241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.100317>
- Kaebnick H., Bicleanu D. and Brandt M. (1999). Theoretical and experimental investigation of pulsed laser cutting. *CIRP Annals*, 48(1), 163-166. doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63156-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63156-4)
- Lamikiz A., Lacella LNL, Sanchez JA, Pozo DD, Etayo JM, Lopez JM. (2005), CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS). *Applied Surface Science*, 242, 362–368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.08.039>
- Li L., Sobih M. and Crouse P. L. (2007). Stration-free laser cutting of mild steel sheets. *CIRP Annals*, 56(1), 193-196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.047>
- Madić, M., Mladenović, S., Gostimirović, M., Radovanović, M., & Janković, P. (2020). Laser cutting optimization model with constraints: Maximization of material removal rate in CO₂ laser cutting of mild steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(10), 1323-1332. doi: <https://doi.org/10.1177/0954405420911529>
- Patel, J. M., and Patel, D. M. (2011). Parametric Investigation in CO₂ Laser Cutting Quality of Hardox-400 Materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5979-5984. Erişim adresi: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Parametric%20investigation.pdf
- Prasad G. V. S., Siores E. and Wong W. C. K.(1998). Laser cutting of metallic coated sheet steels. *Journal of Material Processing Technology*, 74, 234–242. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00276-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00276-8)

Rajaram N., Sheikh-Ahmed J. and Cheroghi SH. (2003). CO₂ laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 351–358. doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00270-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00270-5)

Tükel, T. (2020). *Lazer İle Kesim Parametrelerinin Deney Tasarım Yöntemi İle En İyilenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara. Erişim adresi: <https://dspace.gazi.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12602/216017/?isAllowed=y&sequence=1>

Tükel, T., Yurdakul, M. (2009). Lazer ile kesim parametrelerinin deney tasarım yöntemi ile eniyilenmesi. *Uluslararası bilim, teknoloji ve sosyal bilimlerde güncel gelişmeler sempozyumu*, Ankara, 286-293. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/293129>

Wee L. M. and Li L. (2005). An analytic model for striation formation in laser cutting. *Applied Surface Science*, 247:277–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.01.143>

Zaied, M., Bayraktar, E., Katundi, D., Boujelbene, M., and Miraoui, I. (2012). Effect of Laser Cutting Parameters on Surface Quality of Low Carbon Steel (S235). *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 128-134. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/334697188_Effect_of_laser_cutting_parameters_on_surface_quality_of_low_carbon_steel_S235

EKLER

EK A. (Appendix A). Deney sonuçları (Experimental results)

| No | Parça | R _s | | | R _q | | | R _i | | | R _e | | | HRA | | | ITAB | | | Süre | | |
|----|------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|---------|---------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 | Tek. 1 | Tek. 2 | Tek. 3 |
| 1 | (25-72-80) | 6,447 | 6,428 | 6,394 | 7,871 | 8,215 | 7,887 | 45,489 | 52,455 | 46,744 | 30,778 | 33,960 | 31,192 | 51,98 | 51,49 | 51,20 | 778,89 | 786,03 | 745,02 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 2 | (31-34-39) | 5,081 | 4,811 | 5,821 | 6,272 | 5,878 | 6,982 | 37,861 | 33,561 | 39,729 | 26,844 | 25,186 | 31,896 | 50,38 | 52,63 | 51,32 | 839,55 | 834,83 | 819,32 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 3 | (1-2-28) | 5,454 | 5,485 | 4,992 | 6,767 | 6,697 | 6,166 | 38,472 | 39,055 | 34,676 | 29,816 | 28,995 | 27,272 | 54,51 | 55,11 | 54,19 | 921,86 | 946,29 | 972,63 | 37,33 | 37,33 | 37,33 |
| 4 | (21-46-68) | 5,329 | 5,347 | 5,693 | 6,476 | 6,597 | 6,995 | 35,875 | 38,962 | 39,426 | 28,257 | 29,906 | 30,740 | 53,09 | 54,30 | 53,89 | 920,89 | 902,13 | 906,32 | 37,33 | 37,33 | 37,33 |
| 5 | (30-45-69) | 6,014 | 4,188 | 5,322 | 7,274 | 5,183 | 6,632 | 38,868 | 31,663 | 40,378 | 28,728 | 22,744 | 27,649 | 50,09 | 50,87 | 50,46 | 742,66 | 779,92 | 721,47 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 6 | (11-48-56) | 4,900 | 4,893 | 4,224 | 6,059 | 6,085 | 5,270 | 33,657 | 35,226 | 30,976 | 26,117 | 26,247 | 23,360 | 49,93 | 52,22 | 50,31 | 721,95 | 689,97 | 669,75 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 7 | (44-54-76) | 12,530 | 11,739 | 10,278 | 14,959 | 14,437 | 12,652 | 75,378 | 72,344 | 67,516 | 54,616 | 52,798 | 46,835 | 48,54 | 47,29 | 47,20 | 444,96 | 438,34 | 424,20 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 8 | (7-10-73) | 10,344 | 8,138 | 8,740 | 12,790 | 9,866 | 10,582 | 69,906 | 56,008 | 61,076 | 48,825 | 37,298 | 42,494 | 51,16 | 52,72 | 53,60 | 859,77 | 862,62 | 856,00 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 9 | (4-50-66) | 10,357 | 10,422 | 11,661 | 12,948 | 12,857 | 14,468 | 75,465 | 66,072 | 71,475 | 48,117 | 47,544 | 52,399 | 47,39 | 46,14 | 47,69 | 458,11 | 452,46 | 437,87 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 10 | (37-38-60) | 6,656 | 6,578 | 6,319 | 8,087 | 8,116 | 7,644 | 46,824 | 46,106 | 42,296 | 34,258 | 35,574 | 34,073 | 53,25 | 53,65 | 54,08 | 853,17 | 857,47 | 845,17 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 11 | (17-43-79) | 6,362 | 6,247 | 6,374 | 7,704 | 7,952 | 7,683 | 43,974 | 48,638 | 44,284 | 30,556 | 33,555 | 31,162 | 52,53 | 51,94 | 52,07 | 850,83 | 786,39 | 825,41 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 12 | (15-33-53) | 8,554 | 8,119 | 9,443 | 10,352 | 9,880 | 11,586 | 55,983 | 56,501 | 68,326 | 40,739 | 37,422 | 44,557 | 49,61 | 52,92 | 51,35 | 892,74 | 903,96 | 909,61 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 13 | (65-75-81) | 9,262 | 7,682 | 9,070 | 11,280 | 9,464 | 11,000 | 58,577 | 54,063 | 57,262 | 40,123 | 34,255 | 41,260 | 46,12 | 45,72 | 45,84 | 500,43 | 425,22 | 439,28 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 14 | (20-36-49) | 4,943 | 4,794 | 5,469 | 6,121 | 5,923 | 6,661 | 36,243 | 34,057 | 38,214 | 26,357 | 25,606 | 27,533 | 51,31 | 51,46 | 52,68 | 779,39 | 785,93 | 769,50 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 15 | (52-62-78) | 5,681 | 7,991 | 5,023 | 6,978 | 9,909 | 6,068 | 42,184 | 58,462 | 33,905 | 28,972 | 40,821 | 24,216 | 51,93 | 50,70 | 52,25 | 815,58 | 761,58 | 725,31 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 16 | (24-26-41) | 8,512 | 8,575 | 8,749 | 10,413 | 10,436 | 10,597 | 56,191 | 59,857 | 58,213 | 39,609 | 39,082 | 39,451 | 53,08 | 50,88 | 52,68 | 827,77 | 815,58 | 820,7 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 17 | (55-57-77) | 15,672 | 15,200 | 15,567 | 19,223 | 18,857 | 19,348 | 102,081 | 100,908 | 104,490 | 72,709 | 71,504 | 74,128 | 49,02 | 50,50 | 48,79 | 581,80 | 531,50 | 649,52 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 18 | (18-19-32) | 5,181 | 5,628 | 6,004 | 6,444 | 6,954 | 7,327 | 38,564 | 41,591 | 43,761 | 29,486 | 29,783 | 32,674 | 51,27 | 54,56 | 54,08 | 848,95 | 891,73 | 849,46 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 19 | (3-35-70) | 5,120 | 6,811 | 7,741 | 6,380 | 8,430 | 9,289 | 38,562 | 49,977 | 52,654 | 28,843 | 36,508 | 37,103 | 54,48 | 53,64 | 54,10 | 916,18 | 904,00 | 902,24 | 37,33 | 37,33 | 37,33 |
| 20 | (8-16-42) | 5,555 | 4,926 | 6,100 | 6,808 | 6,056 | 7,410 | 38,811 | 34,083 | 43,709 | 27,772 | 24,441 | 30,358 | 49,84 | 50,13 | 51,55 | 713,02 | 688,08 | 720,09 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 21 | (6-13-47) | 4,381 | 5,272 | 5,545 | 5,471 | 6,448 | 6,774 | 31,841 | 37,081 | 39,423 | 24,087 | 27,036 | 26,535 | 51,10 | 51,42 | 50,90 | 773,24 | 735,61 | 730,00 | 47,00 | 47,00 | 47,00 |
| 22 | (9-14-51) | 4,988 | 5,062 | 4,715 | 6,164 | 6,272 | 5,815 | 36,205 | 37,209 | 33,176 | 26,135 | 25,974 | 25,296 | 50,69 | 49,28 | 49,73 | 629,31 | 628,91 | 631,64 | 32,67 | 32,67 | 32,67 |
| 23 | (23-71-74) | 14,055 | 12,643 | 11,556 | 17,187 | 15,523 | 15,113 | 93,632 | 91,611 | 93,325 | 62,689 | 57,822 | 59,780 | 47,32 | 48,87 | 47,03 | 474,00 | 467,10 | 483,96 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 24 | (12-22-40) | 6,613 | 6,519 | 6,171 | 8,172 | 7,924 | 7,484 | 46,640 | 44,735 | 40,342 | 34,051 | 32,659 | 31,566 | 55,37 | 53,84 | 54,64 | 897,84 | 949,18 | 958,09 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 25 | (58-59-67) | 5,338 | 6,510 | 5,029 | 6,540 | 8,082 | 6,245 | 40,160 | 47,967 | 39,085 | 26,944 | 33,330 | 26,592 | 50,80 | 52,07 | 51,33 | 825,47 | 778,91 | 769,46 | 35,33 | 35,33 | 35,33 |
| 26 | (5-61-63) | 7,521 | 6,721 | 7,779 | 9,252 | 8,336 | 9,636 | 56,831 | 47,048 | 54,060 | 36,878 | 33,945 | 37,683 | 53,37 | 51,99 | 51,81 | 853,63 | 875,30 | 827,33 | 39,00 | 39,00 | 39,00 |
| 27 | (27-29-64) | 12,244 | 10,960 | 11,955 | 15,049 | 13,141 | 14,738 | 74,825 | 65,510 | 77,850 | 54,894 | 47,626 | 53,697 | 48,66 | 50,78 | 48,61 | 542,29 | 493,48 | 497,63 | 35,67 | 35,67 | 35,67 |