ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAVUNMA SANAYİİNDE KULLANILAN ZIRH ÇELİKLERİNİN İŞLENEBİLİRLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Caner ASMAFİLİZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Konstrüksiyon-İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya IŞIK

Bu çalışmada, Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak frezeleme işleminde farklı işleme parametrelerinin Millux Protection 600T'nin (Ultra yüksek sertlikte zırh çeliği) yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Seçilen proses parametreleri ilerleme hızı, kesme hızı, talaş derinliği ve yanal adımdır. Parametrelerin sayısına ve seviyelerine bağlı olarak Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Dokuz deney için yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu aşınma verileri toplanmış, her parametrenin optimum düzeyini ve katkı yüzdesini belirlemek için sinyal gürültü (S/N) oranı ve varyans (ANOVA) analizi hesaplaması yapılmıştır. Yüksek sertliğe sahip çeliğinin, PVD TiAlN kaplamalı sert karbür kesici uç yardımıyla frezeleme işleminde talaş derinliğinin (C), yüzey pürüzlülüğünde 73,04%, takım ucu aşınmasında ise 67,3% katkı yüzdesi ile en önemli etken parametre olduğu tespit edilmiştir. Ardından sırasıyla, kesme hızı (B), yanal adım (D) ve ilerleme hızı (A)'dan etkilenmiştir. Minimum yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu aşınması değerleri için seçilen parametrelerin optimum seviyeleri, yüzey pürüzlülüğü için ilerleme hızında seviye 1, kesme hızında seviye 2, talaş derinliği için seviye 3 ve yanal adım içinde seviye 3'tür. Takım ucu aşınması için ilerleme hızında seviye 2, kesme hızında seviye 1, talaş derinliğinde seviye 1 ve yanal adımda seviye 3 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İşleme parametreleri, frezeleme, taguchi yöntemi, robust tasarımı, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, zırh çeliği, savunma sanayii

2024, viii + 67 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF ARMOUR STEELS USED IN THE DEFENSE INDUSTRY

Caner ASMAFİLİZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Apllied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yahya IŞIK

In this study, the impact of different machining parameters on surface roughness and tool wear in the milling process of Millux Proteciton 600T (Ultra-high hardness armor steel) was investigated using the Taguchi optimization method. The selected process parameters comprised feed rate, cutting speed, depth of cut, and lateral step. Taguchi's L9 ortogonal array was employed based on the number and levels of parameters. Data on surface roughness and tool edge wear were gathered from nine experiments, and signal-to-noise (S/N) ratio and variance (ANOVA) analyses were conducted to ascertain the optimal level and contribution percentage of each parameter. The findings revealed that, in the milling of high-hardness steel utilizing a PVD TiAlN-coated carbide cutting edge, depth of cut (C) emerged as the most significant parameter, with contributionpercentages of 73,04% for surface roughness and 67,3% for tool edge wear. Following this, cutting speed (B), lateral step (D), and feed rate (A) were observed to exert influence. The optimal levels of the selected parameters for achieving minimal surface roughness and tool edge ear were determined as follows: level 1 for feed rate, level 2 for cutting speed, level 3 for depth of cut, and level 3 for lateral step concerning surface roughness. Regarding tool edge wear, the optimal levels were determined as level 2 for feed rate, level 1 for cutting speed, level 1 for depth of cut, and level 3 for lateral step.

Keywords: Machining parameters, milling, taguchi method, robust design, surface roughness, tool wear, armor steel, defense industry

2024, viii + 67 pages.

1. GİRİŞ

Savunma sanayiinde kullanılan zırh çeliklerinin işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, malzeme mühendisliği alanında büyük bir öneme sahiptir. Bu alanda yapılan çalışmalar, zırh çeliklerinin üretiminde kullanılan işleme yöntemlerinin etkinliğini artırmak, malzeme performansını optimize etmek ve sonuç olarak daha güvenilir ve dayanıklı zırh malzemeleri geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. İşlenebilirlik, bir malzemenin işlenme süreçlerinde ne kadar başarılı olduğunu ve bu süreçlerin ne kadar kolay veya zor geçtiğini belirler. Bu nedenle, zırh çeliklerinin işlenebilirlik özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, üretim süreçlerinin verimliliğini artırabilir ve maliyetleri düşürebilir.

İşlenebilirlik çalışmaları genellikle çeşitli deneyler ve testler kullanılarak gerçekleştirilir. Öncelikle, uygun zırh çelikleri seçilir ve belirlenen işleme teknikleriyle işlenir. Bu işleme teknikleri arasında döküm, dövme, haddeleme, kesme, delme, frezeleme, lazer ve su jeti kesim gibi çeşitli yöntemler yer almaktadır. Daha sonra, işlenen malzemelerin çeşitli parametreleri ölçülür ve kaydedilir. Kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü, aşınma direnci ve işleme esnasında ortaya çıkan yüzey kalitesi gibi parametreler, işlenebilirlik değerlendirmesinde önemli rol oynamaktadır.

Elde edilen veriler daha sonra istatistiksel olarak analiz edilir. Bu analizler, işlenebilirlikle ilgili belirleyici faktörleri ve işleme tekniklerinin performansını belirlemek için kullanılır. Sonuçlar, işlenebilirliği artırmak için öneriler geliştirmek amacıyla değerlendirilir. Bu öneriler, işleme parametrelerinin optimizasyonu, yeni malzeme alaşımlarının kullanımı veya işleme proseslerinin yeniden tasarımını içerebilir.

Bu çalışmanın amacı, zırh çeliklerinin işlenebilirlik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi, savunma sanayiinde daha güvenilir ve etkili zırh malzemelerinin üretilmesine katkıda bulunmak, savunma endüstrisinin ihtiyaçlarına uygun, yüksek performanslı, ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler geliştirmektir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bağcı ve Aykut (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, stellit 6 adlı kobalt bazlı alaşımın yüzey frezelemesi için kesme parametrelerini belirlemeyi ve düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde etmeyi amaçlamışlardır. İncelenen frezeleme parametreleri ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü verilerini ölçmek için çeşitli frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiş ve analiz için L27 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak yüzey frezeleme parametrelerinin optimumum değerleri belirlenmiştir. Taguchi'nin ortogonal dizileri, sinyal-gürültü (S/N) oranı, varyans analizi (ANOVA) ve optimum seviyelerin belirlenmesi gibi analizlerde kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin optimal seviyeleri ile doğrulama testleri yapılarak Taguchi optimizasyonu yönteminin etkinliği gösterilmiştir. İstatistiksel sonuçlar, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediğini (95% güven düzeyinde) ortaya koymuştur. Bu şekilde, Taguchi yönteminin stellit 6 gibi kobalt bazlı alaşımların yüzey frezelemesinde ortaya çıkan yüzey kalitesi problemlerini çözmek için oldukça uygun olduğu gösterilmiştir (Bağcı, E., Aykut, Ş., 2006).

Zahoor ve arkadaşlarının (2016) yaptığı çalışmada, fener mili kaynaklı zorlamalı titreşimlerin dikey frezeleme işleminin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlerleme hızı ve eksenel kesme derinliğiyle birlikte üç iş mili düzeyine atfedilen zorlamalı titreşimlerin etkileri, sabit radyal kesme derinliği ve kesme hızı koşulları altında yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk ve takım aşınması üzerine değerlendirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak AISI P20 ve takım ucu malzemesi olarak yekpare karbür kesici takım uç kullanılmıştır. Taguchi L9 standart ortogonal dizisi, öncelikle deneylerde yüzey pürüzlülüğünü ve boyutsal doğruluğu etkileyen mühim parametreleri belirlemek ve ardından (ANOVA) varyans analizi için kullanılmıştır. Krater aşınması (Kt) ve takım yan yüzeyi aşınması (VB_{max}), zorlamalı titreşimlerin etkisine erişim sağlamak için talaşlanma ve talaş yığılması analiziyle birlikte ölçülmüştür. Takım tezgâhı titreşim genliği ve eksenel kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü için 95% güven düzeyinde, titreşim genliğinin en fazla katkıda bulunan faktör olduğu (83,4%) ve ardından eksenel kesme derinliğinin (12.39%) geldiği bulunmuştur. Daha yüksek titreşim genliği ve ilerleme hızı değerlerinin, 0.15mm eksenel kesme derinliği ve 600 mm/dk

ilerleme hızı ile birlikte 0.185929 mm/dk titreşim genliği ile aşırı takım aşınmasına yol açtığı ve bu durumun ciddi takım arızalarına neden olduğu gözlemlenmiştir (Zahoor ve diğerleri, 2016).

Özbek ve diğer araştırmacılar (2017), sertleştirilmiş AISI 420 martenzittik paslanmaz çeliğin (46 HRC) CVD yöntemiyle kaplanmış tungsten karbür (TiCN/Al2O3/TiN) takımlarla sert tornalanması sürecinde takım aşınması (Vb) değerlerini en aza indirmek için en uygun kesme parametrelerini belirlemeye odaklanılmışlardır. Deneyler, kuru kesme koşullarında farklı kesme derinlikleri (0.6, 0.8 ve 1 mm), ilerleme hızları (0.08, 0.1 ve 0.12 mm/dev) ve kesme hızları (170, 200 ve 230 m/dk) kullanılarak optimal kesme parametrelerinin belirlenmesi için Taguchi L9 deney tasarımı kullanılarak yapılan çalışmada, en düşük yan yüzey aşınması değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir ve kesme parametrelerinin bu aşınma üzerindeki etkileri ANOVA analizi ile değerlendirilmiştir. Taguchi analizi sonucunda, en düşük yan yüzey aşınması değerlerine ulaşmak için en uygun kesme parametrelerinin 0.6 mm kesme derinliği, 0.08 mm/dev ilerleme hızı ve 170 m/dk kesme hızı olduğu belirlenmiştir. Taguchi, bu parametreler için yan yüzey aşınmasının tahmini olarak 0.0607 mm olarak hesaplanmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar, Taguchi optimizasyonunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir. Yan yüzey aşınması üzerindeki en büyük etkiyi gösteren parametrenin, ANOVA sonuçlarına göre ilerleme hızı olduğu ve bu etkinin oranın 47.04% olduğu tespit edilmiştir. Bu parametreden sonra, kesme hızı (36.28%) ve kesme derinliği (4.10%) sırasıyla diğer önemli etkilere sahiptir (Özbek ve diğerleri, 2017).

Kara (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hardox 400 çeliğinin PVD TiAlN+TiN kaplı karbür uçlarla ince talaş frezeleme işleminde kesme parametrelerinin optimize edilmesi incelenmiştir. Frezeleme deneyleri, Taguchi L16 ortogonal dizisine göre yapılmıştır ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı temel alınmıştır. Bu yöntem kullanılarak kontrol faktörleri belirlenmiş ve optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri tespit edilmiştir. İki farklı kesme hızı (60 ve 120 m/dk) ve soğutma yöntemi (kuru ve ıslak) kontrol faktörleri olarak seçilmiştir. Ayrıca kesme derinliği 0.3 mm ve ilerleme hızı 0.1 mm/dev olarak sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA), kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü

üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Taguchi analizi, en uygun sonuçların 120 m/dk kesme hızı ve ıslak soğutma yöntemiyle elde edildiğini göstermiştir (Kara, F., 2018).

Kara (2018) tarafından gerçekleştirilen araştırmada AISI P20+S plastik kalıp çeliğinin finiş frezelemesinde kullanılan kesme parametrelerinin performansı incelenmiş ve optimum işleme koşulları belirleniştir. Deneyler, Taguchi L8 (4^1x2^3) ortogonal dizisine göre planlanmıştır ve deney sonuçlarının analizinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak ve kontrol faktörleri belirlenerek, optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri tespit edilmiştir. Dört farklı kesme hızı (100, 150, 200, 250 m/dk), iki farklı ilerleme hızı (0.1, 0.2 mm/dev), kesme derinlikleri (0.12, 0.16 mm) ve soğutma yöntemleri (kuru ve ıslak) olarak seçilmiştir. Kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, deneysel sonuçlar kullanılarak varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiş ve ayrıca çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Doğrusal regresyon modeli, Ra için 0.923 değerini göstermiş ve saha yüksek bir korelasyon katsayısı (R^2) elde edilmiştir. Son olarak doğrulama testleri yapılmış ve optimizasyonun başarıyla uygulandığı gözlemlenmiştir. Taguchi analizi kullanarak yüzey pürüzlülüğü için optimum sonuçlar 150 m/dk kesme hızında, 0.1 mm/dev ilerleme hızında, 0.16 mm kesme derinliğinde ve ıslak soğutma yöntemiyle elde edilmiştir. Ra için hesaplama ve doğrulama testlerinin sonuçları ise sırasıyla 0.288 µm ve0.296 µm olarak belirlenmiştir (Kara, F., 2018).

Kara ve Öztürk (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma, DIN 1.2738 sert kalıp çeliğinin tornalama işlemi için en uygun işleme koşullarının belirlenmesine odaklanmıştır. Bu amaçla, Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılarak deneyler yapılmış ve deney sonuçları, sinyal/gürültü oranı değerlendirmesiyle incelenmiştir. Yapılan varyans analiziyle kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü ve yanak aşınması üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Ayrıca, deney sonuçları için iki farklı çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, İkinci dereceden regresyon modelinin Ra ve Vb için yüksek korelasyon katsayıları (R^2) sağladığı belirlenmiştir; sırasıyla 0.97 ve 0.95. Bulgular, TiAlN kaplı takımların genel olarak daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Taguchi analizi, yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun sonuçların fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle kaplanmış karbür kesici takımlarla elde edildiğini göstermiştir. Son olarak, Hesaplamalar ve doğrulama testlerinin sonuçları Ra için sırasıyla 0,595 ve

0,570 μm, Vb için ise sırasıyla 0.0244 ve 0.0256 μm olarak belirlenmiştir (Kara ve Öztürk, 2018).

Tlhabadira ve ekibi (2019), AISI P20'nin frezeleme işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğünü azaltmayı hedefleyerek, kesme sürecini Taguchi yöntemiyle modellemiş, kritik süreç parametrelerini belirlemiş ve optimize etmeyi amaçlamışlardır. Autodesk Fusion 360 (2.0.5357), çeşitli kesme koşulları altında kesici takımın ve iş parçasının gerilimini, yer değiştirmesini ve termal davranışını modellemek için kullanılmıştır. Deney yöntemi, her değişken için üç faktörlü ve üç seviyeli L9 ortogonal dizi içermekte olup, her faktörün yüzey pürüzlülüğüne katkısının incelenmesini sağlayan Taguchi metodu kullanılarak planlanmıştır. Taguchi yöntemi, işleme parametrelerinin etkilerini analiz ederek ana işlenebilirlik faktörü olan yüzey kalitesiyle kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği arasındaki ilişkiyi kurmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada, kesme derinliği (d), mil hızı (N) ve kesme ilerlemesi (fm) gibi işleme parametreleri incelenmiş ve ölçülen yanıt değişkeni olarak yüzey pürüzlülüğü kullanılmıştır. Karbür uçlar kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel deneyler, Siemens 810D kontrol sistemine sahip Deckel Maho Almanya yapımı DMC 635 V DMG ECOLINE CNC dik frezeleme makinesinde yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Hem sayısal hem de fiziksel deneylerden elde edilen sonuçların istatistiksel analizi, yüzey pürüzlülüğünü bağımsız işleme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ilişkilendiren önemli bir matematiksel model üretmiştir. En az yüzey pürüzlülüğü üreten optimum işleme parametresinin kesme derinliği (2-3 mm), kesme hızı (275 m/dk), fener mili hızı (5471 rpm) ve ilerleme (2188 mm/dev) olduğu bulunmuştur. Ayrıca kesme kuvveti değerindeki artış takım-iş parçası ara yüzeyindeki kayma gerilmesini artırarak yer değiştirmeye neden olmuştur (Tlhabadira ve diğerleri, 2019).

Moayyedian ve diğerlerinin (2020) yaptıkları çalışmada, farklı işleme parametrelerinin Hardox 600 aşınma plakasının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini, Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanarak frezeleme işleminde değerlendirmişlerdir. İşleme parametreleri olarak ilerleme hızı, iş mili hızı kesme derinliği ve radyal dalma seçilmiştir. Parametre sayısına ve seviyelerine bağlı olarak, Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Gerçekleştirilen dokuz deneyde yüzey pürüzlülüğü verileri toplanmıştır. Her parametrenin optimum düzeyini ve katkı yüzdesini belirlemek için sinyal gürültü (S/N)

oranı ve varyans analizi hesaplanmıştır. Ayrıca, S/N oranının tahmin edilen değerini belirlemek için matematiksel model oluşturulmuş ve matematiksel modeli doğrulamak için deneyler gerçekleştirilmiştir. İşleme sürecini etkileyen herhangi bir kontrol edilemeyen parametreden kaynaklanan hata payı etkisinin matematiksel model ve deneysel sonuç için 5.5% olduğu bulunmuştur. Ayrıca yüksek sertlikteki çeliğin (Hardox 600) işlenmesinde radyal dalmanın 4.33% katkı ile en önemli parametre olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğü en çok radyal dalmadan (D), ardından sırasıyla kesme derinliğinden (C), mil hızından (B) ve son olarak ilerleme hızından (A) etkilenmiştir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değeri için seçilen parametrelerin en uygun değerleri, radyal daldırma 33%, kesme derinliği 0.2 mm, iş mili hızı 250 rpm ve ilerleme hızı 25 mm/dk olarak tespit edilmiştir (Moayyedian ve diğerleri, 2020).

Amol Vikas Joshi ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, Jakar gövdesi gibi bir döküm parçasının yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için farklı proses parametrelerinin etkilerini optimize etmek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Deneysel yöntemde, kontrol faktörleri ekip üyelerinin fikirleri doğrultusunda farklı seviyelerde seçilmiştir. Üç faktörlü ve üç seviyeleri L9 ortogonal dizisi olarak devir hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği seçilmiştir. Değişken parametrelerin sonuçlarını incelemek için deneyler yapılmıştır. Ayrıca, gürültü faktörlerinin varlığı nedeniyle oluşabilecek değişiklikleri telafi etmek için 9 deneyin her biri iki kez tekrar edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerdeki pürüzlülük sonuçları bir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. 9 deney, MINITAB yazılımından elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranı değerleri ile birlikte analiz edilmiş ve S/N grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, minimum yüzey pürüzlülüğünün 225 rpm hızında, 0.7 mm/dev ilerlemede ve 1.5 mm kesme derinliğinde elde edildiğini göstermektedir. Taguchi yönteminde, orta ilerleme hızının ve düşük kesme derinliğinin yüksek devir hızında daha iyi yüzey kalitesi sağladığı gözlemlenmiştir (Amol Vikas Joshi ve diğerleri, 2022).

2.1. Talaşlı İmalatın Tanımı ve Takım Tezgâhları

İmalatın temel amacı, hammadde halindeki malzemeleri belirli bir forma getirerek nihai ürün elde etmektir. İmalat süreci, insan, hayvan gücü ve teknoloji kullanılarak veya makinelerin yardımıyla gerçekleştirilebilir. Yüksek teknoloji ve makinelerin yoğun olarak kullanıldığı üretim sistemine ise sanayi denir (Akkurt, 2000).

İmalatın hedefi, üretim prosesleri ve yardımcı araçlar kullanılarak nihai ürüne ulaşmaktır. Takım tezgâhları, üretime yardımcı olan önemli araçlardan biridir, özellikle metalik malzemelerin işlenmesinde sıkça kullanılır. Üç temel faktörün etkileşimiyle gerçekleşen imalat sürecinde, şekillendirilecek hammadde, kullanılan imalat yöntemi, kesici takım ve işleme tezgâhı gibi unsurlar önemli rol oynamaktadır. İmalat yöntemi, hammaddeyi nihai ürüne dönüştürmek için uygulanan fiziksel süreçleri içermektedir. Takım terimi, imalat işlemini gerçekleştiren elemanları ifade ederken, tezgâh terimi ise malzemeye ve takıma gerekli hareketleri sağlayan makineleri tanımlar (Akkurt, 2000).

İmalat yöntemleri, endüstride ürünlerin üretilmesi için kullanılan çeşitli tekniklerin geniş bir yelpazesini içermektedir. Bu yöntemler, genellikle mekanik ve fiziksel-kimyasal olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Mekanik imalat yöntemleri, malzemelerin şekil verilmesi ve işlenmesi için fiziksel güç ve mekanizmaları kullanırken, fiziksel-kimyasal yöntemler, kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel etkileşimlerle üretim süreçlerini gerçekleştirmektedir. Mekanik yöntemler, talaşlı ve talaşsız imalat olarak ayrılmaktadır. Talaşsız imalat yöntemleri, işlenen malzeme üzerinden parça kaldırmadan şekil verme sürecini içermektedir ve döküm, dövme, kaynak, presleme, haddeleme gibi işlemleri kapsamaktadır. Talaşlı imalat ise, iş parçası yüzeyinden malzeme uzaklaştırarak istenilen şekil ve boyutta nihai ürün elde etmeyi sağlamaktadır. Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve kullanım alanları bulunmaktadır. Örneğin, talaşlı imalat yöntemleri, hassas toleranslarda çalışabilme ve yüksek yüzey kalitesi elde etme gibi avantajlara sahiptir. Günümüzde frezeleme, tornalama, delme, taşlama, planyalama ve vargelleme gibi talaşlı imalat yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır ve endüstriyel üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Akkurt, 2000).

2.2. Talaş Oluşumu

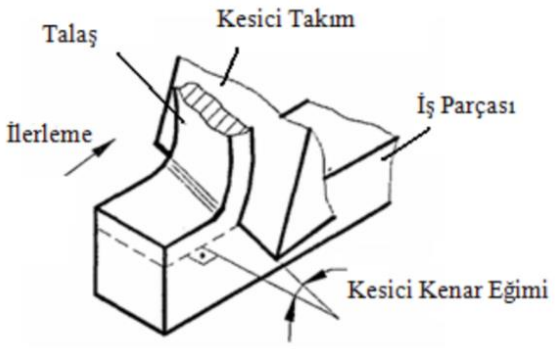
Talaş oluşumu, belirli bir kayma bölgesinde birincil deformasyon bölgesi içinde meydana gelir. Bu süreçte malzeme elastik şekil değiştirme yaşar, ancak kayma bölgesine gelindiğinde plastik şekil değiştirme başlar, Kesici takım ucunun iş parçasıyla temas ettiği bölgede, önce elastik, ardından plastik şekil değiştirme gerçekleşir. Bu bölgedeki gerilmeler, malzemenin kopma sınırını aşarak talaş adı verilen parçacıkların ayrılmasına neden olur (Kartal, 2000).

Talaşın formu düzgün kırılması, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Bu faktörler arasında malzemenin işleme kabiliyeti, kesme hızı, ilerleme değerleri, talaş yüzeyinin düzgünlüğü, kesici uç özellikleri ve talaş kırıcısı gibi etkenler yer almaktadır (Kartal, 2000).

2.3. Talaş Kaldırmada Kesme Çeşitleri

2.3.1. Eğik kesme

Talaş kaldırma teorisinde, dik kesme modelinin yanı sıra, takımın kesme kenarı kesme hız vektörüne eğik olan eğik model de kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de bu eğik kesme modeli gösterilmektedir. Talaş terimi, iş parçasından takım tarafından kaldırılan malzeme tabakasını ifade etmektedir. Teorik hesaplamalarda, talaşın orijinal kalınlığı ve genişliği esas alınmaktadır. Ancak, gerçekte oluşan talaş, teorik boyutlarından farklı olabilmektedir; genellikle daha kalın ve daha kısa olma eğilimindedir (Küçük, 2001).



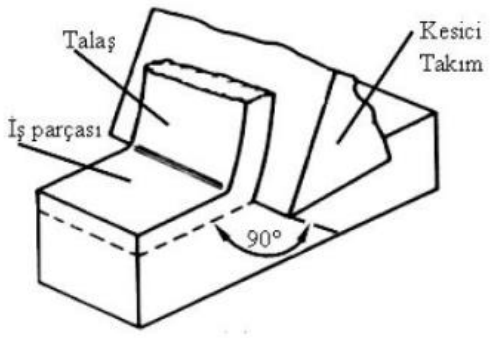
Şekil 2.1. Eğik kesme modelinin şematik gösterimi (Küçük, 2001)

1940 yılında Merchant tarafından yapılan ilk sistemli çalışmalar, talaşlı imalatın kesme kuvvetleri üzerine odaklanmış ve bu alanda matematiksel ifadeler geliştirmiştir. Merchant, fiziksel açıdan talaş kaldırma olayının nasıl gerçekleştiğini inceleyerek, talaş oluşumunu anlamaya çalışmıştır. Yaptığı çalışmaların sonucunda dik bir model önermiş ve takımın etkisi altında kaldırılacak malzemenin önce elastik, sonra plastik bir şekil değiştirme göstererek, belirli bir açıyla düz bir düzlemde talaş olarak ana malzemeden ayrıldığını varsaymıştır (Demirayak, 2006).

2.3.2. Dik (ortogonal) kesme

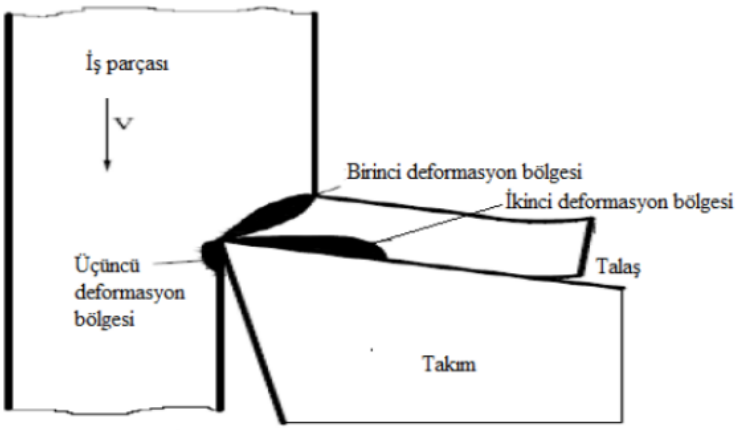
Dik kesme, kesici takımın işlenen parça ile kesme kenarı arasındaki açının 90° olduğu bir kesme yöntemidir. Bu yöntemde, kesici takımın ucu tamamen sivri olduğu kabul edilmektedir. İşlenen yüzey ile kesici yüzey arasında sürtünme olmadığı varsayılır ve talaş kaldırma işlemi sırasında kayma tek bir düzlemde gerçekleşmektedir (Dişbudak, 2015).

Dik kesme işlemi sırasında, talaş kaldırma süreci kesme kenarı boyunca düzgün bir şekilde meydana gelmektedir. Bu durum, iş parçası malzemesinin kenarına yayılma olmadan iki boyutlu bir düzlemde şekil değiştirme işlemi olduğunu göstermektedir. Kesme kuvvetleri, yalnızca esas kesme kuvveti (Fc) ve ilerleme kuvveti (Ff) olarak adlandırılır ve bu kuvvetler hız ve kesilmemiş talaş kalınlığı yönünde etki etmektedir (Karayel, 2015).



Şekil 2.2. Dik kemse modeli (Karayel, 2015)

Dik kesme işlemi sırasında, üç ayrı deformasyon bölgesi mevcuttur, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi. Kesici takım, iş parçası yüzeyine temas ettiğinde deformasyon başlar ve ilk kayma bölgesi oluşur. Kesme işlemi devam ettikçe gerilmeler artar, iş parçası malzemesi akma sınırını geçer ve plastik deformasyon başlar. Kesici takımın talaş yüzeyi boyunca hareketi, ikinci bir deformasyon bölgesi oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca, kesici takımın yan yüzeyindeki sürtünme sonucunda üçüncü bir deformasyon bölgesi meydana gelmektedir. Talaşın iş parçasından kaldırılması sürekli kayma sürtünmesiyle geçekleşir ve bu süreçte talaş akışı başlamaktadır. Kesici takımın talaş yüzeyiyle teması kaybolur ve talaş kesici takımdan ayrılır (Karayel, 2015).



Şe**kil 2.3.** Dik kesme işleminde oluşan deformasyon bölgeleri (Karayel, 2015)

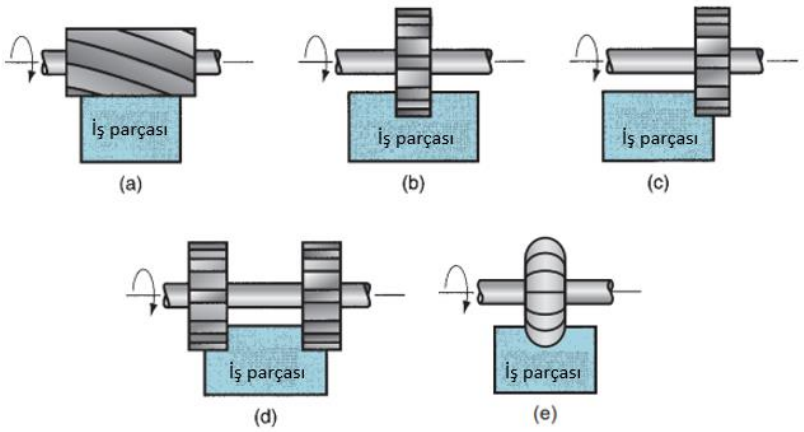
2.4. Frezeleme

Frezeleme, talaşlı imalatın önemli bir parçasıdır ve bir iş parçasının üzerinde ilerletilen döner bir takımın, birden fazla kesme kenarına sahip olması üzerine kurulmuş bir operasyondur. Bu işlem sırasında, kesme takımının dönme ekseninin ilerleme doğrultusuna dik olması, frezeleme işlemine özgü bir özellik olarak kabul edilmektedir. Frezeleme operasyonunda kullanılan kesme takımı genellikle freze çakısı olarak adlandırılmakta ve kesme kenarları diş şeklinde tasarlanmıştır. Freze makineleri gibi yaygın olarak kullanılan konvansiyonel takım tezgâhları, frezeleme işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bu yöntemle oluşturulan geometrik şekiller genellikle düz yüzeylerdir, ancak takımın izlediği yol veya şekline bağlı olarak farklı iş parçası geometrileri de elde etmek mümkündür. Frezeleme operasyonları, çeşitli şekillerin oluşturulabilmesi ve yüksek üretim hızlarına ulaşılabilmesi nedeniyle talaşlı imalatın en

yaygın kullanılan işlemlerinden birisidir. Ancak, kesintili bir kesme operasyonu olması nedeniyle her dönüşte çarpma kuvveti ve ısıl şok döngüsü meydana gelebilir. Bu nedenle, freze takımının malzeme ve geometrisi, bu tür zorlu koşullara dayanacak şekilde dikkatlice tasarlanmalıdır (Groover, 1996).

2.4.1. Çevresel frezeleme

Çevresel frezeleme, düz frezeleme olarak da adlandırılır. Bu frezeleme türünde, takımın dönme ekseni işlenen yüzeye paralel konumlanır ve kesme operasyonu, çakının dış çevresindeki kesme kenarları kullanılarak gerçekleştirilir. Çeşitli çevresel frezeleme yöntemleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir (Groover, 1996).



Şekil 2.4. Çevresel frezeleme yöntemleri (Groover 1996)

2.4.1.1. Vals frezeleme

Çevresel frezelemenin temel formunda, freze çakısının genişliği iş parçasının her iki yanından dışarı doğru uzanır. Bu özellik, Vals frezeleme adı verilen bir çevresel frezeleme türünü ifade eder, Şekil 2.4.a'da görsel olarak açıklanmıştır (Groover, 1996).

2.4.1.2. Kanal açma

Bu işlemde freze çakısının kalınlığı, iş parçasının genişliğinden daha küçüktür, bu da iş parçasında bir kanal oluşturulmasına olanak tanır. Özellikle freze çakısı ince ise, bu operasyon dar kanalların açılması veya iş parçasının ikiye ayrılması için kullanılabilir. Kanal açma işlemi, Şekil 2.4.b'de gösterilmektedir (Groover, 1996).

2.4.1.3. Yan frezeleme

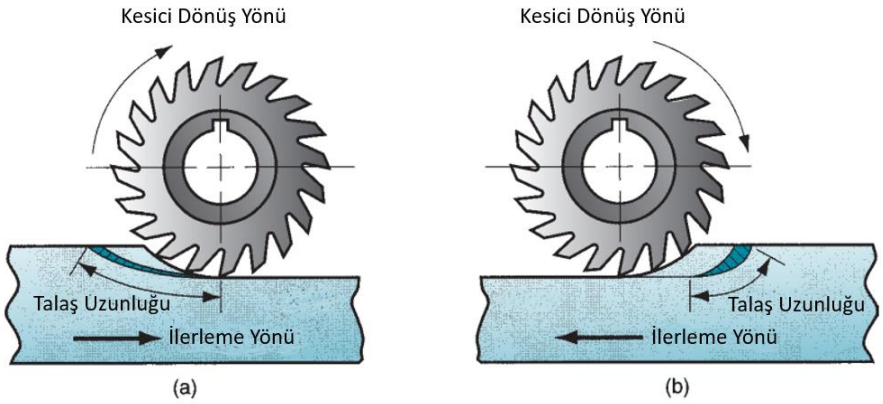
Yan frezeleme işlemi, Şekil 2.4.c'de görüldüğü gibi freze çakısı iş parçasının sadece bir yanını işlemektedir (Groover 1996).

2.4.1.4. Çifte frezeleme

Çifte frezeleme, yan frezeleme ile benzerdir; fakat Şekil 2.4.d'de gösterildiği gibi, iş parçasının her iki yanı aynı anda kesilmektedir (Groover 1996).

2.4.1.5. Biçimleme frezeleme

Biçimleme frezelemesinde, freze çakısının dişleri, iş parçasına açılacak kanalın şeklini belirleyen özel bir profili takip eder, Şekil 2.4.e'de görüldüğü gibi. Bu nedenle, biçimleme frezelemesi, bir biçimlendirme operasyonu olarak sınıflandırılır. Çevresel frezelemede ise, freze çakısının dönüş yönünün yukarı frezeleme ve aşağıya frezeleme olarak iki türünü birbirinden ayırması, Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Groover, 1996).



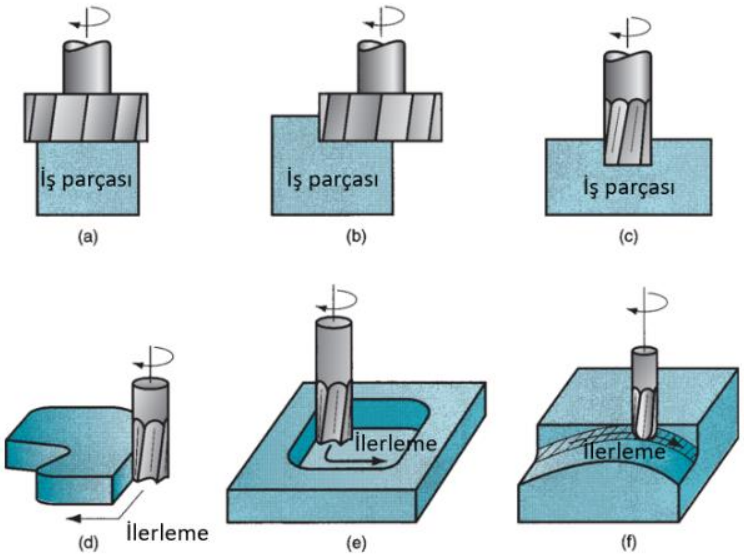
Şekil 2.5. Çevresel frezelemede freze çakısının dönüş yönü (Groover, 1996)

Yukarı frezeleme işleminde, freze çakısının dişleri iş parçasına girdiğinde, dişin hareket yönü parçanın ilerleme yönüne karşıdır, bu da ilerlemeye karşı bir freze hareketi içermektedir. Aşağı yönlü frezelemede ise, freze çakısının dişleri iş parçasına girdiğinde, freze çakısının hareket yönü iş parçasının ilerleme hareketiyle aynıdır. Yukarı frezeleme ve aşağı frezeleme, kesme hareketlerindeki farklılıklar nedeniyle göreceli geometrilerinden kaynaklanan önemli farklılıklara sahip olmaktadır. Yukarı frezelemede, her diş tarafından oluşturulan talaşlar çok ince başlar ve dişin parça içindeki kesme

ilerledikçe kalınlığı artmaktadır. Aşağı frezeleme ise, her talaş kalın olarak başlar ve kesme ilerledikçe kalınlığı azalmaktadır. Aşağı frezelemede oluşan talaş boyu, yukarı frezelemede oluşan talaş boyundan daha kısa olup, bu durum, bir birim kesilen talaş miktarı için iş parçasında daha az malzeme bırakıldığını göstermektedir. Bu nedenle, genellikle aşağı frezeleme, takım ömrü açısından daha uzun ömürlü olmaktadır. İş parçası içinde kesme yapan dişlerin kesme kuvveti yönü, freze çakısının çevresine teğet olarak belirlenmektedir. Yukarı frezeleme durumunda, kesme kuvvetleri freze çakısının dişleri iş parçasından çıkarken parçayı yukarı doğru kaldırma eğilimindedir. Bu durumda, kesme kuvvetleri iş parçasını yukarı çekmeye çalışır. Aşağı frezelemede ise, bu kesme kuvvetlerinin yönü aşağıya doğrudur ve iş parçasını freze tablasında tutmaya doğru bir baskı uygulamaktadır. Yani, aşağı frezeleme işlemi sırasında kesme kuvvetleri iş parçasını aşağı doğru itmeye çalışır. Bu farklı yönlü kuvvetler, frezeleme işlemlerinde iş parçasının hareketini etkileyerek kesme performansını belirlemektedir (Groover, 1996).

2.4.2. Alın frezeleme

Alın frezeleme işleminde, freze çakısının ekseni frezelenmekte olan yüzeye dik konumdadır ve kesme işlemi çakının dış çevresinde ve ucundaki kesme kenarları ile gerçekleşir. Çevresel frezelemede olduğu gibi, alın frezelemenin de çeşitli türleri bulunmaktadır. Bu türlerden bazıları Şekil 2.6.'da gösterilmektedir (Groover, 1996).



Şekil 2.6. Alın frezeleme türleri (Groover, 1996)

2.4.2.1. Geleneksel alın frezeleme

Bu yöntemde, freze çakısının çapı iş parçasının genişliğinden daha büyüktür, bu da freze çakısının iş parçasının her iki yanından taşmasına neden olur. Geleneksel alın frezeleme yöntemi Şekil 2.6.a.'da gösterilmiştir (Groover, 1996).

2.4.2.2. Kısmi alın frezeleme

Kısmi alın frezeleme yönteminde, Şekil 2.6.b'de görüldüğü gibi freze çakısı, iş parçasının sadece bir yanından taşmaktadır (Groover, 1996).

2.4.2.3. Parmak frezeleme

Parmak frezeleme yönteminde, Şekil 2.6.c'de de gösterildiği gibi freze çakısının çapı, iş parçasının genişliğinden daha küçüktür. Bu sayede iş parçasında bir kanal açılmaktadır (Groover, 1996).

2.4.2.4. Profil frezeleme

Profil frezeleme, parmak frezelemenin bir türüdür ve Şekil 2.6.d'de gösterildiği gibi düz bir iş parçasının dış çevresini kesmektedir (Groover, 1996).

2.4.2.5. Cep frezeleme

Cep frezeleme yönteminde, düz bir uca sahip çakıp yerine yuvarlatılmış bir uca sahip freze çakısı kullanılarak, üç boyutlu bir yüzey şekli oluşturmak için eğrisel bir hareketle ileri geri iletilmektedir. Aynı kesici takım hareketi, kalıp oyması olarak adlandırılan kalıp yuvalarının kontürlerinin işlenmesinde de uygulanmaktadır. Cep frezeleme yöntemi, Şekil 2.6.e'de gösterilmiştir (Groover, 1996).

2.4.2.6. Yüzey şekillendirme

Yüzey şekillendirmede, düz bir uca sahip çakı yerine yuvarlatışmış bir uca sahip freze çakısı kullanılarak, Şekil 2.6.f'de gösterildiği gibi üç boyutlu bir yüzey oluşturmak için eğrisel hareketle ileri geri ilerletilmektedir (Groover, 1996).

2.4.3. Frezelemede talaş oluşumuna etki eden faktörler

Kesme işlemi, kesici takımın işlenecek malzemeden daha sert olması gereken bir prensip üzerine kuruludur. Kesme sırasında, kesici takım iş parçasına belirli bir yük uygular ve iş parçasının yüzeyinden talaş kaldırarak istenen şekli elde eder. Bu süreçte, takımın ömrü ve yüzey kalitesi maksimum seviyelere çıkarılmaya çalışılırken aynı zamanda işlem maliyeti ve süresi en aza indirilerek ideal kesme işlemine ulaşma hedeflenmektedir. Kesme parametreleri, talaş oluşumunu doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Kesici takımın malzemesi, kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme miktarı gibi parametrelerin doğru seçimi, kesme işleminin başarılı olması açısından son derece önemlidir. Bu faktörlerin optimal bir şekilde ayarlanmasıyla takımın ömrü uzatılır, yüzey kalitesi iyileştirilir ve işlem maliyeti ile süresi optimize edilir. Bu prensipler ışığında, kesme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için kesici takım seçimi ve kesme parametrelerinin dikkatlice ayarlanması gerekmektedir (Domaç, 2011).

Frezelemede kesme hızı, kesici takımın iş parçası yüzeyinden bir dakikada kaç metre yol aldığını ifade eder. Bu değer, kesici takımın işleme malzemesini ne kadar hızlı kaldırdığını gösterir ve genellikle birim olarak metre/dakika olarak ölçülür (Domaç, 2011).

Kesme hızına ait formüller ve birimler aşağıda gösterildiği şekildedir.

Burada;

$$V = \frac{\pi * D * N}{1000} \tag{2.1}$$

V: Kesme Hızı (m/dk)
D: Kesici Takımın Çapı (mm)
N: Devir Sayısı (dev/dk)

Kesme hızı, genellikle kesici takım kataloglarından seçilmektedir. Kesici takım kataloglarında, kullanılan takımın çapı, malzemesi ve işlenecek iş parçası malzemesine göre önerilen kesme hızı değerleri yer almaktadır. Kesme hızı değeri, önerilen değerden daha yüksek seçildiğinde kesici takım aşınarak daha hızlı bozulabilir, bu da takımın ömrünü kısaltarak takım değişimini zorunlu hale getirebilir. Diğer taraftan, kesme hızı değeri önerilen değerin altında seçildiğinde, talaş kaldırma sırasında talaşlar kesici

takımın ağzına yapışabilir ve parça üretim hızını düşürebilir. Bu nedenle, talaş kaldırma sırasında kullanılacak kesme hızı, takım ömrü ile talaş kaldırma miktarını dengeli bir şekilde göz önünde bulundurarak optimum bir değerle seçilmelidir. Böylece hem takımın ömrünü uzatır hem de istenilen üretim kalitesini sağlar (Domaç, 2011).

Kesme hızını belirlerken aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

- Kesici takım malzemesi
- Kesici takım çapı
- Talaş derinliği
- Kullanılan tezgâh ve bağlantı elemanlarının rijitliği
- İş parçası malzemesi
- Talaş kaldırma işlemi sonunda istenen yüzey kalitesi

Frezelemede ilerleme hızı, kesici takımın iş parçasını kesmek üzere döndürüldüğü sırada, bir dakikada iş parçasının altından geçen mesafeyi milimetre cinsinden ifade eder. İlerleme hızına ait formüller ve birimler aşağıda belirtildiği gibidir (Domaç, 2011).

$$F = F_z * Z * N \tag{2.2}$$

Burada;

F: ilerleme hızı (mm/dk)
Fz: Ağız başına ilerleme miktarı (mm/ağız)
Z: Takımın kesici ağız sayısı (adet)
N: Devir sayısı (dev/dk)

Frezelemede talaş derinliği, kesici takımın malzeme kaldırma esnasında iş parçasının içine dikey olarak giren mesafeyi belirtir. Talaş derinliği ve ilerleme hızı, kesme hızına kıyasla takım ömrü üzerinde daha düşük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, hızlı bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirmek istendiğinde, takımın ömrü açısından odaklanılması gereken öncelik, kesme hızını arttırmak yerine ilerleme hızını ve talaş derinliğini artırmaktır. Bu yaklaşım, daha verimli bir üretim sürecine katkı sağlar (Domaç, 2011).

Kesme parametreleri (kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme miktarı) belirlenirken, önceliklendirme işlemi aşağıdaki durumlar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

- En kısa parça üretim süresi,
- En yüksek kesici takım ömrü (en az kesici takım kırılması),
- En iyi ölçüsel hassasiyet,
- En küçük yüzey pürüzlülüğü (en iyi yüzey kalitesi),
- Tek seferde kaldırılacak en fazla talaş miktarı,
- Kesintisiz en güzel kesme işleminin elde edilmesi,
- İşleme sırasında tezgâhta meydana gelebilecek titreşim ve aşınmanın azaltılması,
- Kesme işlemi için minimum birim maliyet (Domaç, 2011).

2.5. Zırhın Tanımı ve Tarihçesi

İnsanlar yaratılışından itibaren hayatta kalma mücadelesi vermiş ve dışarıdan gelecek tehditlere karşı korunma güdüsüyle hareket etmiştir. İlk olarak çevresel koşullara, çetin iklim şartlarına uyum sağlama ve kendini koruma amacıyla barınaklar, örtüler ve konutlar geliştirmişlerdir. Daha sonra dışarıdan gelebilecek insan ve vahşi hayvan saldırılarına karşı giysiler, ayakkabılar ve başlıklar geliştirmişlerdir. Gelişen bu teçhizatları yaparken doğada bulunan taş ve kaya parçaları, hayvan derileri, bitkiler, ağaç parçaları, kemikler, iri hayvan dişleri gibi çeşitli malzemeleri kullanmışlardır. Düşman saldırısı esnasında vücutlarına aldıkları darbelerin nüfuz etmemesi, zarar vermemesi için farklı yöntemler oluşturmuşlardır. Keskin kenarlı sert taş parçalarıyla yaptıkları taş balta ve mızraklar korunma, saldırı, avlanma amacıyla kullandıkları ilk silahlardandır. Devamında metal işleme ve üretebilme becerisi kazanmalarıyla birlikte kendilerine yönelen ok ve mızrak türü silahlara karşı plakalar haline getirilen metal parçalarının örttüğü göğüs-sırt kısmı, başlık-miğfer ve (deri, ahşap ve bitki elyaflarından oluşan) kalkanları koruma sistemi olarak geliştirmişlerdir. İnsanlığın gelişmesiyle birlikte bakır metalini ve akabinde ona dayalı alaşım bronzu (tunç) elde etmişlerdir. Bu malzemeden bıçaklar, kılıçlar, baltalar, keser, nacak, cıda, mızraklar, süngüler yaparak kendilerini güvenceye alma, savunma ve saldırı yapmayı sağlayacak silahlar üretmişlerdir. Genel anlamda insanlar korunma güdüsüyle üzerlerine yönelen keskin, sivri, delici, yırtıcı parçalayıcı saldırıları karşılayabilecek, saptırabilecek ya da bu darbeleri sönümleyecek bireysel korunmanın

önemini kavrayacaktı. Korunma güdüsü doğal olarak Zırh kavramını ortaya çıkarmıştır. Tarihsel süreçte insanlar zırhı kişisel olarak vücuda ve önem verdikleri binek hayvanlarının (özellikle at ve fillerin) gövdelerine konulan, kaplayan koruma teçhizatı olarak kullanmışlardır (Baykara ve diğerleri, 2020).

Özetle zırh; insanı, aracı ve yapıyı saldırı ve tehditlerden koruma görevi görür. Belirli bir nesneye, kişiye veya araca doğrudan gelen mermi darbe ve etkiye yönelik, koruyucu bir örtü olarak da düşünülebilir. Çatışma ve savaş ortamında veyahut tehlike arz eden bir ortamda oluşabilecek hasar ve yaralanmalara karşı korunma kabiliyetine sahiptir (Baykara ve diğerleri, 2020).

Tarihte bilinen ilk zırh (M.Ö. 1500) Mısırlılar tarafından kullanılmıştır. Zırh, üzerine bronz pullar veya katmanlı plakalar dikilmiş gömlek benzeri bir giysiden oluşmaktaydı. Zırh çok ağır olduğu için hareket kabiliyetini sınırlıyordu bundan dolayı zırh kullanımının kısa ömürlü olmasına neden olmaktaydı. M.Ö. 900-600 yıllarında Asurluların geliştirmiş olduğu katmanlı zırhlar küçük dikdörtgen plakaların paralel sıralar halinde bir giysiye dikilmesinden oluşuyordu. Bu zırh tarzı 16. yüzyılda da kullanılmıştır. Asurluların korunmak amacıyla kullandıkları diğer araçlar ise kalkanlar ve bronz miğferlerdi. M.Ö. 8. yüzyılda Yunanlılar bronz plakaları vücudun farklı bölgelerindeki kaslara uyacak şekilde işlediler (Walder, 2015).

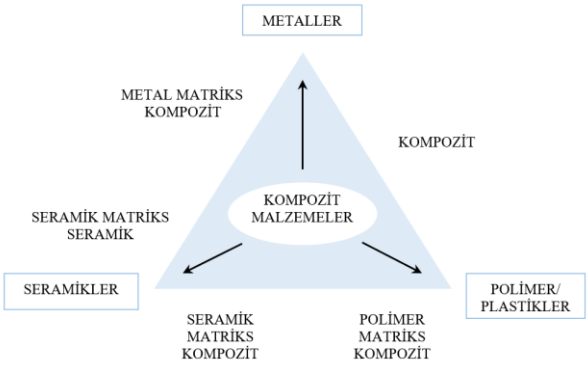


Şekil 2.7. Vücut zırhı curias (Muscle curiass, 2010)

Curiass olarak adlandırılan bu zırhlar bronz göğüs ve sırt plakası, baldır plakası ve pirinç miğferden oluşuyordu (Muscle curiass, 2010).

2.5.1. Zırh malzemeleri

Bir savunma platformu için kritik olan unsurlardan biri, zırh korumasıdır. Savunma platformunun çeşitli bölgeleri, örneğin motor, mürettebat, gövde altı, cephane, gövde geri bölmesi ve kule, koruma amacıyla zırhla kaplanır. Kinetik enerjili, kimyasal enerjili ve diğer mühimmat türlerine karşı en üst düzeyde koruma sağlamak, aynı zamanda cephane ve yakıt infilaklarına karşı ek koruma önemlidir. En ideal zırh malzemesi, yüksek sertlikte olmasının yanı sıra az kırılganlık özelliklerini gösteren malzemedir. Bu bağlamda, ağırlık da kritik bir faktördür. Son dönemde, artan çeşitli tehditler nedeniyle zırh korumasının 15-20% daha fazla ağırlık gerektirdiği görülmektedir. Bu durum, taşınabilirlik ve hareket kabiliyeti kısıtlanmış zırhlı araçlara yönelik bir sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, zırh malzemeleri üzerinde yapılan çalışmaların özellikle hafiflik açısından özel bir önemi bulunmaktadır (Baykara ve diğerleri, 2020).



Şekil 2.8. Ana mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması (Baykara, Günay ve Demirural, 2020'den değiştirilerek alınmıştır)

Günümüzde kullanılan çağdaş zırh malzemeleri aşağıdaki ana malzeme gruplarına ayrılmaktadır.

- Metalik zırhlar
- Seramik esaslı zırhlar
- Polimer esaslı zırhlar
- Fabrikler
- Kompozit zırhlar
- Balistik şeffaf malzemeler (Camlar, cam seramikler)
- Metal-seramik-kompozit hibrit katman sistemleri (Baykara ve diğerleri, 2020).

2.5.2. Metalik zırhlar

“Sertlik, dayanıklılık ve tokluk değerleri dikkate alındığında genellikle metal ve alaşımlar zırh malzemeleri olarak kullanılan öncelikli malzemelerdir. Süneklik özellikleri ve kolay şekillendirilebilmelerinden dolayı farklı form, şekil ve geometrilerde koruma amaçlı olarak her türden platformda kullanılabilmektedirler. Buna karşın, metal ve alaşımlar, yüksek yoğunluklarından dolayı modern uygulamalarda giderek yerine alternatif çözümler araştırılan malzemelerdir” (Baykara ve diğerleri, 2020).

2.5.2.1. Alüminyum zırh

Alüminyum alaşımları mukavemetli ve hafif olmasının yanı sıra yüksek korozyon direncinin sayesinde günümüzde havacılık ve savunma sanayinde sıkça kullanılmaktadır. (İnce, 2014).

Alüminyum alaşımları çeliklere oranla daha düşük yoğunluklara sahiptir (2.66-2.84 g/cm^3). Zırhlı uygulamalarda daha hafif olmalarının avantajı ortada olmasına rağmen, sertliklerinin daha düşük olmasından dolayı balistik performansları daha düşüktür. Fakat kolay işlenebilme ve kaynaklanabilme özellikleriyle birlikte bazı platformlarda alüminyum zırhların kullanıldığı görülmektedir (Baykara ve diğerleri, 2020). Zırh plakalarında kullanılan özellikle 2195, 2519, 2139, 7039, 5083, 7075 serisi alüminyum alaşımları başarılı balistik performansları sebebiyle tercih edilmektedir (Gooch, 2007; Çağan, 2017; Sevinç, 2002).

2.5.2.2. Titanyum zırh

1938 yılında ABD Maden Bürosu tarafından başlatılan titanyum metalinin üretim teknolojileri geliştirme süreci, titanyumun yüksek miktarlarda bulunması, kuvvetli korozyon direnci ve yüksek ağırlığa karşı mukavemet gibi özellikleri sayesinde tetiklenmiştir. Titanyum alaşımı, 1950’lerin başlarında öncelikli olarak askeri mühimmat ve askeri havacılık endüstrisi için üretilmiştir. Ancak, 1960’lı yıllardan itibaren askeri havacılık yerine ticari havacılık ve endüstriyel üretime yönelik olarak gelişmeye başlamıştır (Rosenbaum, 1982).

1960'lı yılların başında, Ti-6Al-4V alaşımının küçük silah tehditlerine karşı çelik plakalara göre sağladığı önemli ağırlık tasarrufu ve gözlemlenen balistik performans verileri olmasına rağmen, o dönemdeki yüksek maliyet, titanyumun zırh üretiminde geniş çaplı kullanımını sınırlamıştır (Gooch-Burkins, 1995).

2.5.2.3. Zırh çelikleri

Zırh çelikleri, genellikle standart kimyasal bileşimlere sahip dökme ingotlar şeklinde üretilmektedir ve ardından sıcak haddeleme işlemiyle istenilen kalınlıkta plakalar haline getirilmektedir. Bu süreç, zırh çeliklerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Karagöz ve diğerleri, 2008). Bu üretim süreciyle birlikte, zırh malzemeleri arasında homojen haddelenmiş zırh olarak da bilinen (Rolled Homogenous Armor- RHA) çelikler mevcuttur. Şekillendirilen zırh çelikleri, östenitleştirme, su verme ve temperleme gibi çeşitli ısıl işlemlerle istenilen mukavemet, sertlik ve tokluk değerlerine ulaştırılmaktadır. Bu ısıl işlemler, mekanik özelliklerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar ve çeliklerin zırh malzemesi olarak tercih edilmesinde etkili bir faktördür. (Manganello ve Wilson, 1993).

Zırhlı araçlarda kullanılacak zırh çelikleri genellikle şu temel mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilir:

- Yüksek dirence sahip olma özelliği, kinetik enerjili mermi darbeleri ve patlama darbelerine karşı etkili korum sağlar.
- Üretim süreçlerinde kolaylıkla kaynaklanabilme, kesilebilme ve şekillendirilebilme gibi özellikler sunar.
- Uzun bir kullanım ömrü için yüksek yorulma direncine sahiptir.

Örneğin, MIL-A-46100 ve MIL-A-12560 kalitelerindeki zırh çelikleri, farklı ısıl işlem koşulları uygulanarak mekanik özelliklerinde belirgin değişikliklere olanak tanımaktadır. Çizelge 2.1'de MIL-A-46100, MIL-A12560 ve MIL-A-46100 kalitesindeki zırh çeliklerinin mekanik özellikleri detaylı bir şekilde verilmiştir (Karagöz ve Atapek, 2007).

Çizelge 2.1. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Karagöz ve Atapek, 2007)

Özellik	MIL-A-12560	MIL-A-46100	MIL-A-46173
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601
Akma Mukavemeti (MPa)	1150	≥1100	≥1100
Çekme Mukavemeti (MPa)	1250	≥1600	≥1700
Uzama (%)	≥10	≥9	≥8
Tokluk	20-30	30-40	30

Balistik koruma için günümüzde kullanılan çelik zırhlar genellikle üç ana kategoriye ayrılır: haddelenmiş homojenize çelik zırh (RHA), yüksek sertlikte çelik zırh (HHA) ve ultra yüksek sertlikte çelik zırh (UHA). Bu çeşitli zırh türleri, balistik panellerden araç zırhlarına kadar farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Özer, 2004).

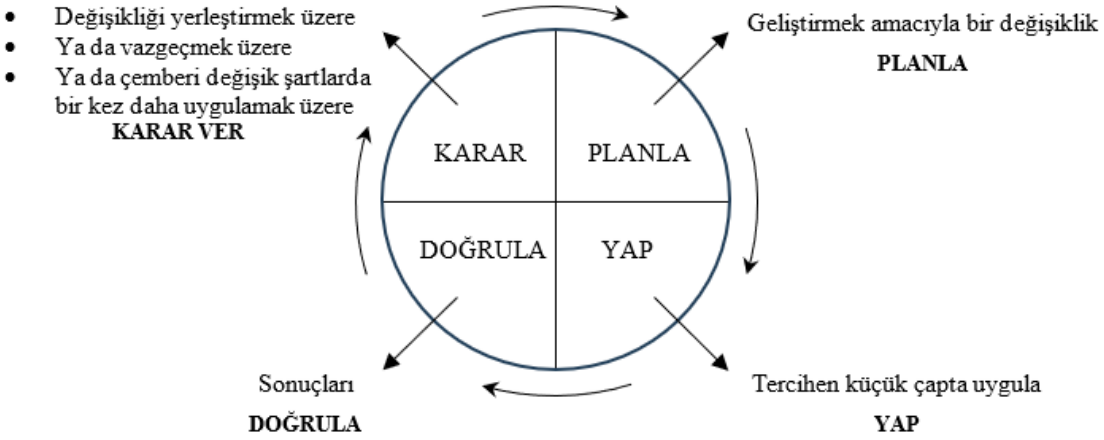
2.6. Toplam Kalite Yönetimi – Deney Tasarımı ve Modelleme Teknikleri

Toplam Kalite Yönetimi, uzun vadeli hedefler arasında müşteri memnuniyetini, başarıyı, kendi organizasyonunu, çalışanlarını ve toplumu avantajlarla buluşturmayı amaçlayan bir yönetim modelidir. Bu kalite odaklı yaklaşım, tüm çalışanların katılımına dayanmaktadır. Toplam Kalite Yönetimi anlayışının temellerini atan isimler arasında W. Edwards Deming, Joseph Juran ve Philip Crosby gibi önemli kalite yönetimi uzmanları bulunmaktadır. Aynı şekilde, Arman V. Feigenbaum ve Kaoru Ishikawa da kendi çalışmalarıyla kalite kavramının gelişimine önemli katkılarda bulunmuşlardır (Akın ve diğerleri. 1998).

Toplam Kalite Yönetimi'nin (TKY) etkili bir şekilde uygulanabilmesi için aşağıda belirtilen beş temel öğenin bir araya getirilmesi gerekmektedir:

1. Üst yönetimin liderliği
2. Müşteri odaklılık
3. Firma elemanlarının eğitimi
4. Takım çalışması
5. Sürekli geliştirme (kayzen) yaklaşımı

Bu unsurlardan ilk dört tanesi, beşincisi olan sürekli geliştirmenin gerçekleştirilmesi için gereklidir. Pratikte, ürün ve hizmet kalitesini artırmak için yapılan doğrudan çalışmalar, "Kayzen" yaklaşımı içinde gerçekleştirilir. Bu nedenle, sürekli geliştirme, TKY'nin en temel faaliyetidir. Kayzen çalışmalarında, Shewart veya Deming çemberi olarak bilinen "Planla – Yap – Doğrula – Karar Ver" (PYDK) süreci genel çalışma çerçevesi olarak uygulanmaktadır (Şirvancı, 1993).

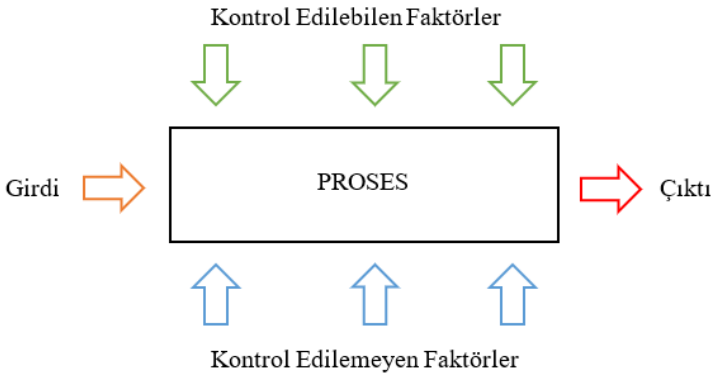


Şekil 2.9. Shewart veya Deming çemberi olarak bilinen PYDK süreci (Şirvancı, 1993'den değiştirilerek alınmıştır)

Çemberin farklı aşamalarında, çoğunluğu istatistiksel olan çeşitli teknik ve yöntemler kullanılabilir. Japonya'da geniş kitlelere öğretilmiş oldukları için en çok bilinen yöntemler arasında, "Ishikawa'nın yedi basit aracı" olarak adlandırılan balık kılçığı diyagramı, neden-sonuç diyagramları, pareto grafiği, çetele tablosu, histogram ve kontrol çizelgesi bulunmaktadır. PYDK çemberinde bir deney yapılması önerilmekte ve bu deneylerin amacı, mevcut şartlar yerine farklı olanları deneyerek üründe gelişme

sağlamaktır. Pratikte uygulanan deneylerin bir kısmı basit deneylerdir ve bu basit deneylerin planlanması ve sonuçlarının analizi, yukarıda bahsedilen yedi basit araçla gerçekleştirilmiştir (Şirvancı, 1993).

Deney tasarımı yöntemleri, birçok disiplinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemler, özellikle mühendislik çalışmalarında üretim sürecinin performansını arttırmada kilit bir rol oynamaktadır. Deneysel tasarım tekniklerinin uygulanmasıyla, ürün geliştirme sürecinde değişkenlik azaltılabilir, hedef değerlere yakın sonuçlar elde edilebilir ve maliyetler düşürülebilir. Şekil 2.23'te gösterildiği gibi, deney tasarımları özel süreç veya sistemler hakkında bilgi elde etmek amacıyla kullanılmıştır (Şahin, 2001).



Şekil 2.10. Prosesin genel modeli (Montgomery, 2009'den değiştirilerek alınmıştır)

Proses, makinelerin, metotların, insanların veya diğer çıktı veren kaynakların bir araya gelmesiyle oluşan bir kombinasyon olarak tanımlanabilir. Faktörler, deney sonuçlarını etkileyen çevresel değişkenler arasında kontrol altında tutulabilen veya tutulamayan unsurlardır, diğer bir adıyla deney değişkenleri olarak bilinirler. Deneyde kullanılacak faktörlerin belirlenmesi, deneyin planlama sürecini doğrudan etkileyerek büyük önem taşır. Kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesici takım uç yarıçapı gibi faktörler, kontrol edilebilen faktörler arasında yer almaktadır. Diğer yandan, deney sırasında kontrol edilemeyen unsurlar, takım aşınması, sıcaklık, nem gibi faktörlerdir (Montgomery, 2009).

2.6.1. Taguchi yöntemi nedir?

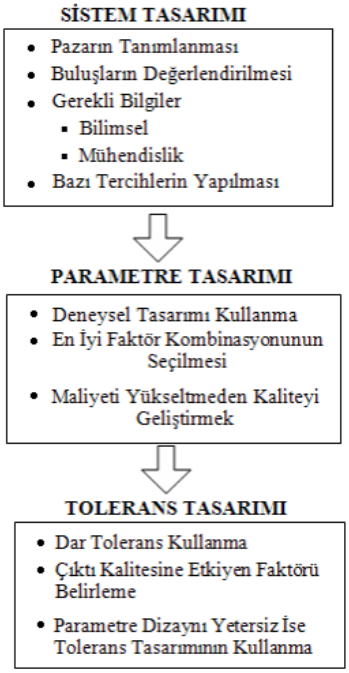
Üretim sektöründeki işletmeler, müşteri beklentilerini aşmayı hedefleyerek sürekli bir rekabet ortamında faaliyet göstermektedir. Müşterilere daha işlevsel, daha kaliteli, daha ekonomik ve daha hızlı ürünler sunma çabaları, kalite geliştirme bilincinin hızla yayılmasına neden olmuştur. İşletme yöneticileri hem üretim hattında hem de ürün ve süreç tasarım aşamalarında kalitenin doğru bir şekilde planlanması gerektiğinin farkındadırlar. Bu bilinçle hareket ederek işletmelerinin verimliliğini artırmayı ve rekabet avantajlarını güçlendirmeyi amaçlamaktadırlar (Canıyılmaz, 2001; Kayı, 2006).

Taguchi tasarımı, malzeme ve üretim süreçlerini doğasında bulunan değişkenliği tasarım aşamasında dikkate alan bir dizi yöntem bilimi olup, Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi, deney tasarımına teorik yenilikler getirmemiş olsa da uygulama alanında önemli değişikliklere imza atmış ve bu başarılı uygulamalarla metodun imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır. Taguchi metodunun ana hedefi, kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerde hem zaman hem de maliyet açısından etkin olmasının yanı sıra, aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler ve süreçler tasarlamaktır. Bu, ürün kalitesini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda kalite geliştirmede daha az deneme ile daha üstün sonuçlara ulaşma fırsatı sunar. Taguchi deney tasarımı tekniği, endüstride etkili bir şekilde kullanılarak ürün ve süreç geliştirmeye önemli katkılarda bulunmuştur (Kayı, 2006).

Taguchi metodunda öne çıkan bir diğer önemli nokta ise tercih edilen kalite karakteristiği olarak sinyal-gürültü (S/N) oranını kullanmasıdır. S/N oranı, standart sapmanın yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılarak daha etkili bir kalite ölçümü sağlamaktadır.

2.6.2. Taguchi metodu ile deney tasarımı

Dr. Genichi Taguchi'nin öne sürdüğü üç kalite aşaması, sırasıyla sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımını içermektedir.



Şekil 2.11. Taguchi metodunun sistematiği (Kayı, 2006)

2.6.2.1. Sistem tasarımı

Sistem tasarımı, yazılı koşullar altında çalışacak bir sistemin geliştirilmesini içermektedir. Bu aşama, bilim ve mühendislikten elde edilen teknik bilgiyi gerektirir ve sistem için belirlenen teknik özellikler, tasarım özelliklerini geliştirmek için bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Ayrıca, kalitenin tasarımı ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar yatırıma dönük bir aşama olarak da adlandırılabilir. Bu aşamada temel amaç, üretim aşamasında, belirlenen spesifik limitler ve toleranslar içinde mamul üretimini en düşük maliyetle gerçekleştirmektir. Bu hedefe ulaşmak için pazar araştırması, teknolojik gelişmeler ve bilimsel buluşlardan faydalanılabilir (Kayı, 2006).

2.6.2.2. Parametre tasarımı

Sistem tasarımını takiben gelen bir sonraki adım, parametre tasarımıdır. Bu aşamada, kontrol edilebilir sistem parametrelerinin en uygun kombinasyonunu belirleyerek ürünün geniş bir yelpazede yüksek performans göstermesi ve gürültü faktörlerine karşı dayanıklı olması için optimum seviyelerin seçilmesi amaçlanır. Taguchi'nin parametre tasarımı yaklaşımı, performans ve maliyet açısından en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için kontrol parametrelerinin en iyi kombinasyonunu seçmeye odaklanır. Bu şekilde, ürün veya süreç gürültü faktörlerine karşı en sağlam hale getirilir. Bir deneyin tasarımında en kritik adım, kontrol faktörlerinin seçimidir. Mümkün olduğunca çok faktör dahil edilmelidir, böylece önemsiz değişkenler en erken aşamada belirlenebilir (Şirvancı, 2002).

2.6.2.3. Tolerans tasarımı

Tolerans tasarımı, parametre tasarımının etkinliğinin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılır. Parametre tasarımında, düşük maliyetli ve geniş ölçüde değişebilen faktörler kullanılabilir. Ancak, bileşenlerin yetkinliğini artırmak için değişkeni istenilen değere düşürmek gerekiyorsa, tolerans tasarımına başvurulur. Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni bulunmaktadır (Şirvancı, 2002).

Bu türler şunlardır:

- En büyük en iyi,
- En küçük en iyi,
- Hedef değer en iyidir.

En büyük en iyi;

Bu tür tolerans çalışmalarında, kalite değişkeninin üst sınırı belirlenmiştir ve dolayısıyla bir hedef değer yoktur. Ölçü arttıkça, verimlilik de artacaktır. Örneğin, kesici takım ömrü bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Şirvancı, 2002).

$$S/N = -10log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right] \quad (2.3)$$

En küçük en iyi;

Bu tür karakteristikler, negatif sapma göstermez ve daima alt sınırın olmasını tercih eder. Tolerans azaldıkça iyileşme artar. Bu türde, örnek olarak takım aşınması verilebilir. Takım aşınması durumunda, toleransın azalmasıyla birlikte genellikle durumda bir iyileşme sağlanır. (Şirvancı, 2002).

$$S/N = -10log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \quad (2.4)$$

Hedef değer en iyi;

Bu durumda, sapmalar iki yönlü olarak değişebilir ve dolayısıyla iki taraflı toleransa sahiptir. Bu durumu en iyi şekilde boyut kriterleri göstermektedir. Boyut kriterlerinde, örneğin belirli bir parçanın boyutu hem üst hem de alt sınırlar arasında değişebilir ve bu nedenle iki taraflı toleransa ihtiyaç duyulur.

$$S/N = 10log\left(\frac{y^2}{s^2}\right) \quad (2.5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde "y", performans karakteristiğini temsil ederken, "s^2" varyansı ifade etmektedir (Şirvancı, M. 2002). Bu ifadeler, S/N oranlarını hesaplarken kullanılan temel terimlerdir ve performans ile varyans arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır (Şirvancı, 2002).

2.6.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi, test edilen parça grupları arasındaki ortalama performans değerlerindeki farklılıkları belirlemek için kullanılan bir istatistiksel araçtır. Bu yöntem, toplam varyasyonu farklı bileşenlere ayırarak matematiksel bir teknik sunmaktadır. Serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler gibi niceliklerin hesaplanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Deneysel tasarımın temelini oluşturan ANOVA, 1930'larda İngiliz istatistikçisi Fisher tarafından geliştirilmiştir ve adını Fisher'in soyadının baş harfinden almaktadır. Bu nedenle, F testi olarak da adlandırılmaktadır. Varyans analizi, tek faktörlü, iki faktörlü ve çok faktörlü gibi farklı kullanım alanlarına sahiptir. Taguchi'nin ortogonal dizileri, genellikle ikili veya üçlü kademe için varyans analizinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu diziler, Taguchi metodolojisi ile yapılan deneylerde sıkça tercih

edilen deneysel tasarım tekniklerinden biridir. Dolayısıyla, Taguchi deneylerinde, varyans analizi önemli bir analiz aracı olarak karşımıza çıkmakta ve sonuçların değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Ross, P. J., 1998; Durmaz, S., 2008).

Kareler toplamı:

Toplam varyansı bileşenlerine ayırdığımızda üç çeşit varyasyon ortaya çıkmaktadır:

- Performans karakteristiğini etkileyen faktörlere (A, B, C, …) bağlı varyasyon,
- Bu faktörler arasındaki etkileşimlere bağlı varyasyon,
- Hata kaynaklı varyasyon.

Örneğin, A ve B gibi iki faktörümüz varsa ve bu faktörler arasında bir etkileşim mevcutsa, toplam varyasyon aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AxB} + SS_D \tag{2.6}$$

AxB, A ve B faktörleri arasındaki etkileşimi temsil etmektedir.

$$SS_T = [\sum_{i=1}^{N} y_i^2] - \frac{T^2}{N} \tag{2.7}$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}}\right)\right] - \frac{T^2}{N} \tag{2.8}$$

Hata varyasyonunun hesaplanması için en basit yöntem, toplam kareler toplamından faktörlerin ve etkileşimlerin kareler toplamının çıkarılmasıdır.

$$SS_O = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \tag{2.9}$$

Ortogonal düzende sütunların toplam kareler toplamı SS_T'yi vermektedir.

Serbestlik derecesi:

ANOVA hesaplarını tamamlamak için serbestlik dereceleri de önemlidir. İstatistiksel olarak, serbestlik derecesi, verilerden elde edilen her parça bilgiyle ilişkilendirilir (Ross, 1998).

Genel bir tanımlamada bir sonuca varabilmek için yapılması gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısıdır. Serbestlik dereceleri toplamı, kareler toplamı gibi, toplam serbestlik derecesini vermektedir (Durmaz, 2008).

İki faktör ve bu faktörlerin etkileşimleri göz önünde tutulursa;

$$V_T = V_A + V_B + V_{AxB} + V_D \tag{2.10}$$

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşittir.

$$V_T = N - 1 \tag{2.11}$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi, seviye sayısının bir eksiğidir.

$$V_A = k_A - 1$$

$$V_B = k_B - 1 \tag{2.12}$$

Etkileşimin serbestlik derecesi, etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşit olduğu denklem 2.13'de verilmiştir.

$$V_{AxB} = (V_A)x(V_B) \tag{2.13}$$

Hata serbestlik derecesi, tüm faktörlerin ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplam serbestlik derecesinden çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır.

$$V_O = V_T - V_A - V_D - V_{AxB} \tag{2.14}$$

Denemelerin tekrarları yapıldığı durumda ise toplam serbestlik derecesi;

V_T= (Deneme sayısı x Tekrar sayısı)-1, şeklinde ifade edilmektedir (Durmaz, 2008).

Varyans:

ANOVA tablosundan elde edilen bir istatistiksel ölçüt, genellikle "varyans" olarak adlandırılmaktadır. Hata varyansı da bu ölçütlerden biridir ve genellikle sadece "varyans" terimiyle ifade edilmektedir. Hata karelerinin toplamı, hata serbestlik derecesine bölünerek bu değer elde edilmektedir (Ross, 1998).

V_e= Hata varyansı

$$V_T = \frac{SS_o}{V_o} \tag{2.15}$$

Hata varyansı, deneylerdeki kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklanan değişimin bir ölçüsüdür ve ölçüm hatalarını da içermektedir. Faktörlerin ve etkileşimlerin varyanslarıyla benzer bir şekilde hesaplanmaktadır (Ross, 1998).

A faktörü için varyans;

$$V_T = \frac{SS_A}{V_A} \tag{2.16}$$

B faktörü için varyans;

$$V_T = \frac{SS_B}{V_B} \tag{2.17}$$

AxB etkileşimi için varyans;

$$V_{AxB} = \frac{SS_{AxB}}{V_{AxB}} \tag{2.18}$$

Şeklinde bulunur.

Ortogonal düzende atama yapılmamış olan sütunların toplam kareler toplamı, hata kareler toplamına eşittir (Ross, 1998).

Sütunların hata varyansının belirlenmesinde kullanılan yaklaşım, tüm sütunlara faktörler atandığında da geçerlidir. Deneyler öncesi, performansı etkileyeceği düşünülen faktörlerin gerçekte ne kadar önemli olduğu değerlendirilmelidir. Bu faktörlerin atandığı sütunların varyansı genellikle düşük olduğundan, hata varyansının belirlenmesinde kullanılır. Bir faktörün deney sonucuna katkı yüzdesi düşükse, analizde göz ardı edilmesi, daha belirleyici faktörlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Yüzdesel etkinin yanı sıra, kareler toplamı da hata varyansının hesaplanmasında hangi sütunların birleştirileceğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Hata varyansını belirlerken sütun seçimi yapılırken F-testi de uygulanabilir. Bu test, etkisi en büyük olan sütunu takip eden daha az etkili sütunun önemli olup olmadığını belirlemek için kullanılmaktadır. Eğer anlamlı bir F oranı elde edilmezse, bu iki sütun bir sonraki daha az etkili sütunla karşılaştırmak üzere birleştirilir. Bu süreç, anlamlı bir F oranı elde edene kadar devam eder (Durmaz, 2008).

F Testi:

Veriler toplandıktan ve varyanslar hesaplandıktan sonra, hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemek için F-testi uygulanır. Standart F-testi, hataların eşit varyanslara ve normal dağılıma sahip olduğunu, ayrıca bağımsız olduklarını varsaymaktadır. Ancak, bu varsayımlar sağlanmadığında, F-testinin sonuçlarını doğru yansıtmayabilir. Ancak, standart F testinin varsayımlardan sapmalara karşı dirençli olduğu ve bazı durumlarda kullanılabileceği belirtilmektedir (Phadke ve diğerleri, 1989).

F-testi uygulanırken, hesaplanan F değerleri ile belirlenen güven seviyesindeki F tablo değerleri karşılaştırılır. Tablo değerinden büyük bir F değerine sahip olan faktörlerin, performans karakteristiği üzerinde etkili olduğu düşünülür. F değeri, faktör ya da etkileşimin varyansının hata varyansına oranı olarak tanımlanmaktadır, verilerden elde edilen bir orandır (Ross, 1998).

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \tag{2.19}$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Numunesi ve Kesici Takımlar

Deneysel çalışmada, zırhlı askeri araçların imalatında yaygın olarak kullanılan Millux Protection 600T (UHHA) zırh çeliği tercih edilmiştir. Bu özel çelik türü, 4.00 ila 20.00 mm arasındaki kalınlıklarda mevcuttur ve 570-650 HBW (55-61 HRC) sertlik değerlerine sahiptir. Protection 600T, akma dayanımı 1400 N/mm^2 ve çekme dayanımı 1950-2150 N/mm^2 aralığında ultra yüksek sertlikte balistik penetrasyona karşı yüksek direnç sağlar. Deney numunesi çizimi Inventor programı kullanılarak hazırlanmıştır ve zırh plakasının ısıl deformasyondan etkilenmemesi için su jeti kesim işlemi tercih edilmiştir. Millux Protection 600T'nin maksimum kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

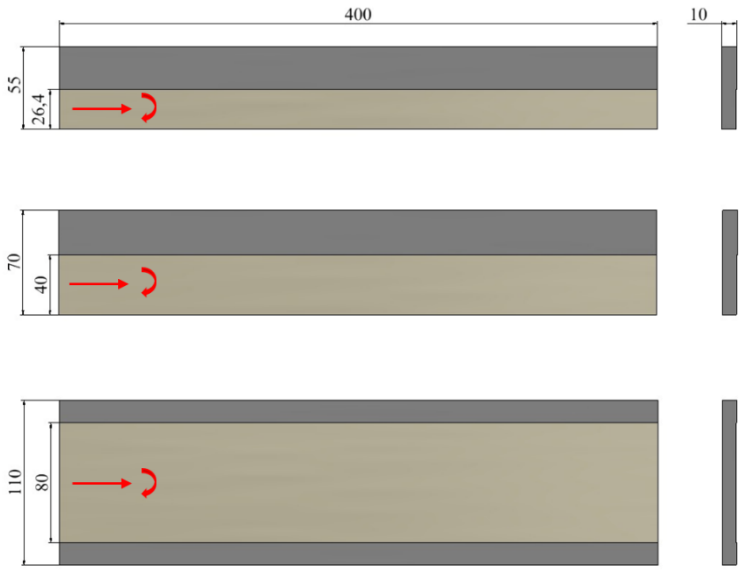
Çizelge 3. 1. Millux Protection 600T kimyasal kompozisyon bileşimi (%) pota analizi (Millux OY, 2024'den düzenlenerek alınmıştır)

Çelik Tipi		**Kalınlık** (mm)
Ultra Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (UHHA)		4.00-20.00
Karbon (C- max %)	**Silisyum** (Si- max %)	**Mangan** (Mn- max %)
0.45	0.70	0.80
Fosfat (P- max %)	**Kükürt** (S- max %)	**Krom** (Cr- max %)
0.015	0.004	0.50
Nikel (Ni- max %)	**Molibden** (Mo- max %)	**Bor** (B- max %)
3.00	0.60	0.003

Çizelge 3. 2. Millux Protection 600T Tipik Mekanik Özellikler (Millux OY, 2024'den düzenlenerek alınmıştır)

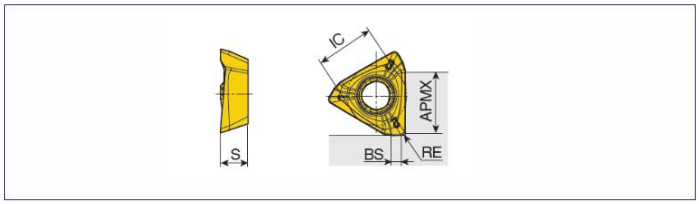
Kalınlık (mm)	**Tipik Akma Dayanımı** (MPa)	**Tipik Çekme Dayanımı** (MPa)	**Uzama** (%)
4.00-20.00	1400	1950-2150	6

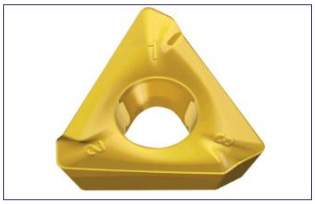
Deney numunelerinin şekil ve ölçüleri, Şekil 3.1'de detaylı olarak gösterilmiştir. Numuneler, malzeme ve işleme maliyetleri göz önünde bulundurularak, deney faktörü olan yanal adım miktarlarına göre üç farklı tip olarak hazırlanmıştır. Şekil 3.1'de, tarama kafasının ilerleme ve dönme yönü, kırmızı oklarla açıkça belirtilmiştir.



Şekil 3. 1. Deney numunelerinin şekil ve ölçülerinin gösterilmesi

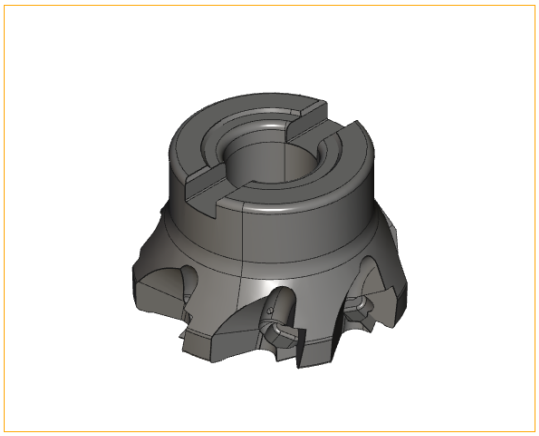
Yapılan çalışmada, PVD AlTiN kaplamalı 3PKT 150508R-M TT2510 sert karbür kesici takım kullanılmıştır. Kesici takım malzemesi seçilirken talaş kaldırılacak parçanın malzemesinden daha sert olması göz önüne alınmıştır. Kullanılan kesici takımın boyutsal ölçüleri Şekil 3.2.'de, Kullanılan tarama kafasının boyutsal ölçüleri ise Şekil 3.3.'de verilmiştir.

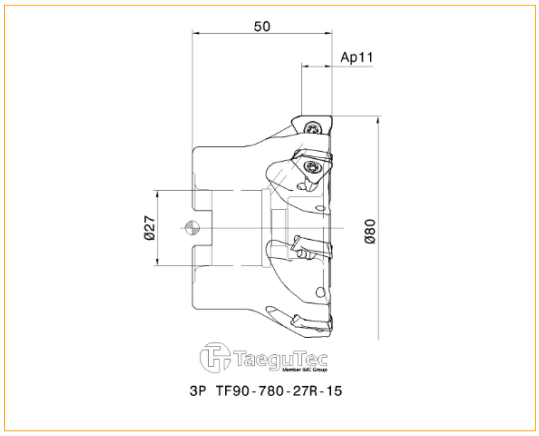




IC	RE	BS	S	APMX	ap (min)	ap (max)	fz (max)	fz (min)
10.70	0.80	1.60	5.00	11.00	3.00	9.00	0.170	0.070

Şekil 3. 2. Kesici takımın boyutsal ölçüleri





DC	CICT	DCONMS	DHUB	OAL	APMX		Arbor	Mtg. Ref	MIID
80.00	7	27.00	58.00	50.00	11.00	O	A	SH M12X1.75X35	3PKT 150508R-M

Şekil 3. 3. Tarama kafasının tip ve boyutsal ölçüleri

3.2. Takım Tezgâhı

Deneyler, ANZATSAN Mühendislik A.Ş.'nin talaşlı imalat atölyesinde bulunan AWEA AF-1250II model CNC dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. Bu dik işleme merkezine ait bilgiler, Çizelge 3.3'te detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3. 3. Kullanılan CNC dik işleme merkezi özellikleri

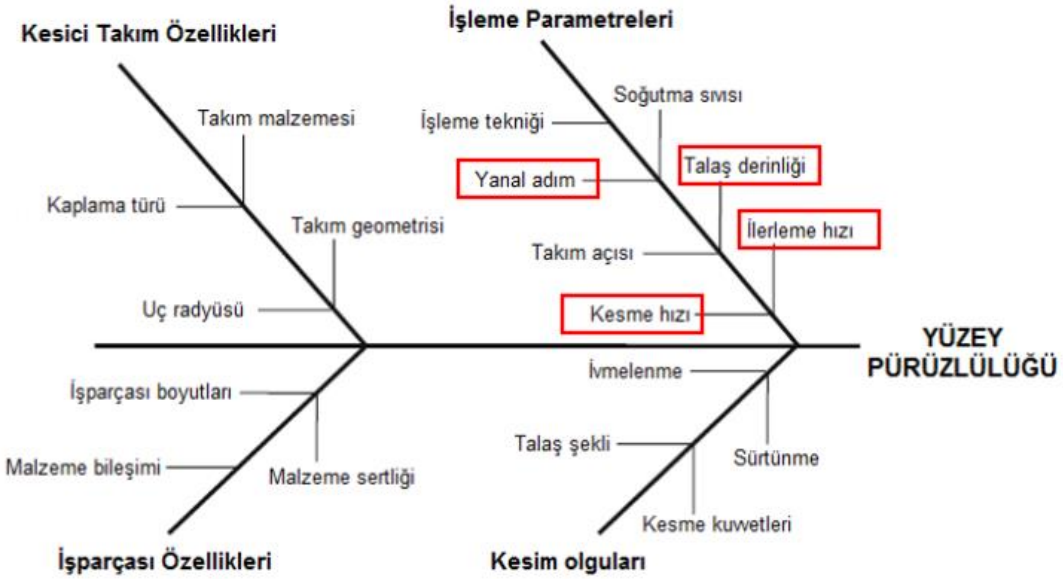
Model	AF-1250II
X Eksenindeki Hareket	1250 mm
Y Eksenindeki Hareket	650 mm
Z Eksenindeki Hareket	610 mm
Takım Tutucu Tipi	BT40
İş Mili Motoru	7.5 / 11kW
İş Mili Hızı	10,000 rpm



Şekil 3. 4. Deney numunelerinin işlenmesinde kullanılan CNC tezgâhı

3.3. Deney Parametrelerinin Seçimi

Talaşlı imalat yöntemlerinde, iş parçası malzeme türü, kesici takım tipi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, oluşan ısı, soğutma sıvısı ve tezgâhın konstrüksiyonu gibi çeşitli faktörler yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Bu faktörlerden herhangi birinin değişmesi, yüzey pürüzlülüğünde değişikliklere neden olabilmektedir. İşleme sırasında, yüzey pürüzlülüğünü belirleyen temel faktörler, balık kılçığı diyagramı olarak adlandırılan grafikle Şekil 3.5.'de açıkça gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. Deney parametrelerinin balık kılçığı yöntemi ile tespit edilmesi

Taguchi deney tasarımı yöntemi için seçilen değişken parametreler şunlardır:

A= İlerleme Hızı (Vf-mm/dk),

B= Kesme Hızı (Vc-m/dk),

C= Talaş Derinliği (ap-mm), ve

D= Yanal Adım (kesme genişliği) (ae-%).

Belirlenen parametreler ve seviye değerleri, Çizelge 3.4.'te açıkça belirtilmiştir.

Çizelge 3. 4. Deneyde kullanılacak faktör seviyeleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
İlerleme Hızı (mm/dk), A	350	500	650
Kesme Hızı (m/dk), B	188	250	314
Talaş Derinliği (mm), C	0,2	0,35	0,5
Yanal Adım (%), D	33	50	100

Prosese etki eden gürültü faktörlerinin kontrol edilmesi pahalı veya zor olmasından dolayı bu faktörleri gerçekleştirilecek deneyde kullanmamaya karar verilmiştir. Bunun yanı sıra faktörler arasında bilinen herhangi bir etkileşim bulunmamaktadır.

3.4. Uygun Ortogonal Dizinin Seçilmesi

Uygulanan Ishikawa diyagramı yardımıyla, dört adet 3 seviyeli faktörleri yapılacak parametre tasarımı için uygun görülmüştür. Ortogonal dizinin seçimini belirlemek için faktörlerin seviye çeşidini ve dizinin toplam serbestlik derecesinin bilinmesi gerekmektedir.

Dizinin toplam serbestlik derecesi;

A faktörünün serbestlik derecesi → $k_A - 1 = 3 - 1 = 2$

B faktörünün serbestlik derecesi → $k_B - 1 = 3 - 1 = 2$

C faktörünün serbestlik derecesi → $k_C - 1 = 3 - 1 = 2$

D faktörünün serbestlik derecesi → $k_D - 1 = 3 - 1 = 2$

Toplam serbestlik derecesi = 2+2+2+2=8 olarak belirlenmiştir.

Serbestlik derecesinin belirlenmesinden sonra, ortogonal dizi seçimi yapılabilir. Dizi seçimindeki kriter, toplam serbestlik derecesinin seçilecek olan dizinin deneme sayısından en fazla bir eksik olabilmesidir. Böylece mevcut serbestlik derecesine 1 eklenerek eldeki dizilerden hangisine eşit olursa, o seçilir. Eğer hiçbiriyle eşit olmazsa, serbestlik derecesi, mevcut dizilerin aralıkları içinde kalıyorsa bir alt değil, bir üst dizi seçilir.

Bu durumda dört faktörümüzün tümünün üç seviyeli olması ve toplam serbestlik derecesi sekize en yakın, uygun bir üst dizi olan L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Ardından seçilen dizinin sütunlarına faktörler atanmıştır. Çizelge 3.5.'de seçilen dört parametre için Taguchi yönteminin L9 ortogonal dizisi gösterilmektedir.

Çizelge 3. 5. Seçilen dört parametre için Taguchi L9 ortogonal dizisi

Deneme No	Faktörler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Faktörlerin ortogonal matris sütunlarına yerleştirilmesi, faktörler arası etkileşim olmadığı için A=1, B=2, C=3, D=4 şeklinde yapılmıştır. Buna ek olarak belirlenen faktörler arasında kontrol edilemeyecek türden faktörler (gürültü faktörleri) olmadığından ikinci bir dizi gerekli değildir.

3.5. Deneyin Yapılması

Deneyin yapılmasına geçmeden önce deney numunesinin hazırlığı, deney ölçüm sistemi, tekrar sayısı ve randomizasyonun yapılması gerekmektedir.

Deney numunesi, Millux Protection 600T zırh plakasının tedarik, depolama sürecinde çevresel şartlardan olumsuz şekilde etkilenmemesi için koruyucu kaplama (boyama) yapılmaktadır. Su jeti ile kesilen dokuz deney numunesi üzerinde ön, orta ve arka toplam üç bölgede NOVOTEST marka T-UD2 model sertlik ölçüm cihazı ile yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 3.6. Protection 600T deney numuneleri yüzey sertlik ölçüm değerleri HRC (Rockwell) olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3. 6. Protection 600T deney numuneleri korumalı yüzey sertlik ölçüm değerleri

	Korumalı Yüzey			
Numune No	**Ön**	**Orta**	**Arka**	**Ortalama (HRC)**
1/6	31,2	37	31	33,1
2/3	28,5	34,9	34,1	32,5
3/1	33,9	36	35,9	35,3
4/5	33,5	33,5	32,8	33,3
5/2	32,8	31	34	32,6
6/8	35,1	34,1	33,5	34,5
7/4	35	33,4	35	34,5
8/7	33,2	27,8	34	31,7
9/9	35,5	37	33,7	35,4

Ölçümleme sonucunda, zırh plakasının genel ortalama 33,6 HRC yüzey sertliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Zırh plakası, Protection 600T'nin yüzey düzlemselliğinin homojen olmayışı deney numunelerinin freze tablasına rijit şekilde bağlanmasına engel oluşu ve bu durum neticesinde işleme sırasında titreşimde artış olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle hem deney sırasında rijit bağlantı elde edebilmek hem de taahhüt edilen malzeme sertliğinde deneyleri yapabilmek için deney numuneleri ön frezeleme işlemine

tabii tutulmuştur. Yapılan ön yüzey frezeleme işlemi sonrasında ölçümlenen yüzey sertlik ölçüm değerleri Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 7. Protection 600T deney numuneleri ön frezeleme işlemi yapılmış yüzey sertlik ölçüm değerleri

Frezelenmiş Yüzey				
Numune No	**Ön**	**Orta**	**Arka**	**Ortalama (HRC)**
1/6	58,2	58,7	58,6	58,5
2/3	58,1	56	57,1	57,1
3/1	57,8	58,4	58,4	58,2
4/5	58,7	57,3	57,6	57,9
5/2	58	58,3	57,5	57,9
6/8	57,7	56,7	57	57,1
7/4	58,5	58,2	58,1	58,3
8/7	58,6	59	58,8	58,8
9/9	58	60	60,8	59,6

Deney numunelerinin ön frezeleme işlemi sonrasında ölçümlenen genel ortalama yüzey sertlik değeri 58,2 HRC olarak gözlemlenmiştir.

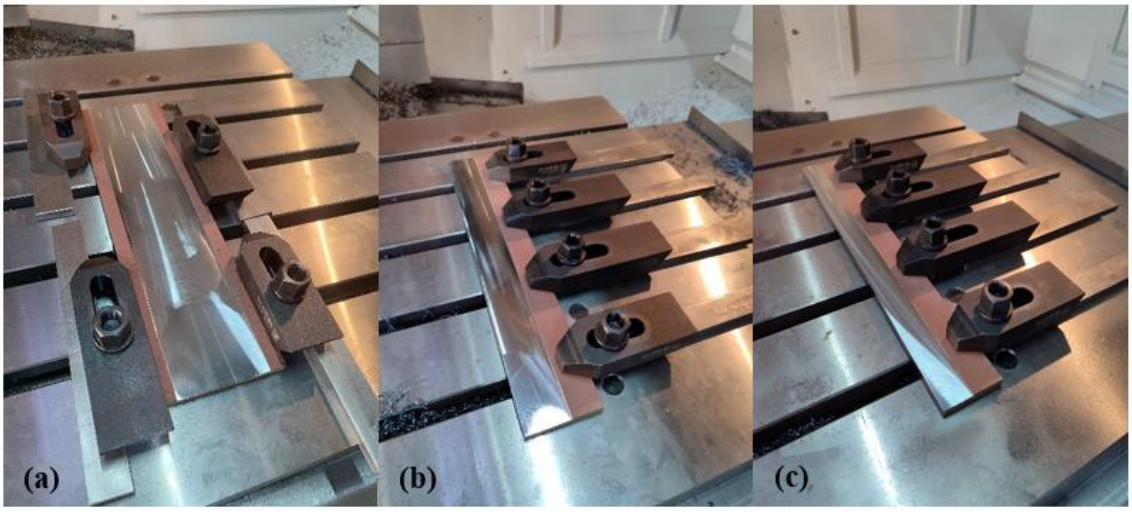
Deneyin tekrar sayısı, kullanılan takım ucu ve zırh çeliği malzemesinin yüksek maliyeti nedeniyle 1 olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen deneyde bilinmeyen gürültü faktörlerinin etkisini azaltmak için deney sırası rastlantısal olarak yapılmıştır. Deneyde kademelerin değiştirilmesi zor veya pahalı olan herhangi bir faktör kısıtı olmadığı için sıra tamamıyla rastlantısal olarak seçilmiştir. Bunun için 9 adet küçük kâğıda 1'den 9'a kadar numaralar yazılıp kura çekilerek deney sırası belirlenmiştir. Yapılan bu işleme göre deney sırası, 3, 5, 2, 7, 4, 1, 8, 6, 9 olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.8.'de L9 ortogonal dizisine göre seviye değerleri ve deney sırası gösterilmektedir. Şekil 3.6.'da deney numunesi yüzey frezeleme işlemi, Şekil 3.7'de Yanal adım değerlerine göre deney numunelerinin freze tablasına bağlanışı gösterilmektedir.

Çizelge 3. 8. L9 ortogonal dizisine göre seviye değerleri ve deney sırasının gösterilmesi

Sıra No	Deneyin Yapılış Sırası	A İlerleme Hızı (mm/dk)	B Kesme Hızı (m/dk)	C Talaş Derinliği (mm)	D Yanal Adım (%)
1	6	350	188	0,2	33
2	3	350	250	0,35	50
3	1	350	314	0,5	100
4	5	500	188	0,35	100
5	2	500	250	0,5	33
6	8	500	314	0,2	50
7	4	650	188	0,5	50
8	7	650	250	0,2	100
9	9	650	314	0,35	33



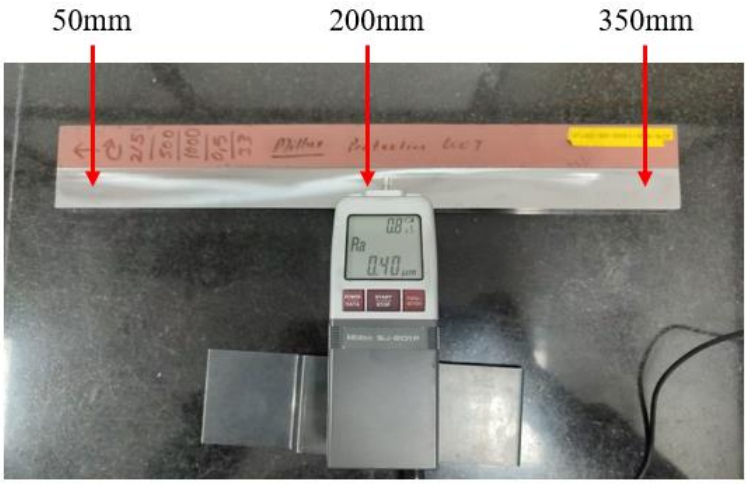
Şekil 3. 6. Deney numunesi, yüzey frezeleme işleminin yapılması



Şekil 3.7. Yanal adım miktarlarına göre deney numunelerinin freze tablasına bağlanması (a) yanal adım 100%, (b) yanal adım 50%, (c) yanal adım 33%

3.5.1. Yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ölçülmesi

Belirtilen seviyeler ve kontrol faktörleriyle yüzey frezelemesi yapılan deney numunelerinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değerleri "SURFTEST SJ-201P taşınabilir yüzey pürüzlülüğü test cihazı" ile tarama kafasının frezeleme işlemine başladığı noktadan 50, 200 ve 350mm konumlarında, üç tekrarlı ölçüm yapılıp ortalamaları alınarak tespit edilmiştir. Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.'da Deney numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçümlenmesi gösterilmektedir. Çizelge 3.9.'da her bir deney numunesi için 50, 200 ve 350mm konumlarında ölçümlenen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi-1



Şekil 3 9. Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi-2

Çizelge 3.9. Deney numunelerinden üç tekrarla ölçümlenen yüzey pürüzlülük değerleri

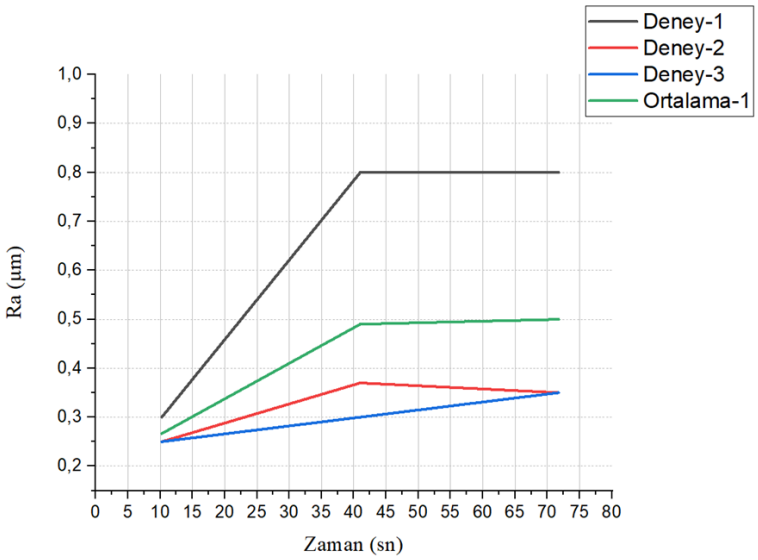
Deney No	Deney Sıra	Parametre Kodu	Ra		
			50mm	200mm	350mm
1	6	350-0750-0,20-033	0,30	0,80	0,80
2	3	350-1000-0,35-050	0,25	0,37	0,35
3	1	350-1250-0,50-100	0,25	0,30	0,35
4	5	500-0750-0,35-100	0,35	0,55	0,65
5	2	500-1000-0,50-033	0,40	0,30	0,35
6	8	500-1250-0,20-050	0,96	0,35	0,75
7	4	650-0750-0,50-050	0,20	0,37	0,55
8	7	650-1000-0,20-100	0,35	0,45	0,70
9	9	650-1250-0,35-033	0,40	0,35	0,50

Frezeleme işlemi gerçekleştirilirken her bir deneyin işleme süresi kronometre yardımıyla ölçülmüştür. Alınan ölçüm sonuçları teorik süre hesabıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada 350 mm/dk ilerleme hızında 82 sn, 500 mm/dk ilerleme hızında 57 sn ve 650 mm/dk ilerleme hızında ise 44 sn frezeleme süresi tespit edilmiştir. İlerleme hızlarına bağlı olarak her üç deneyde bir olmak üzere dokuz deney için 50, 200 ve 350 mm konumlarındaki frezeleme süreleri hesaplanmıştır. Elde edilen ilerleme hızı, konum ve zaman karşılaştırmaları Çizelge 3.10.'da açıklanmıştır.

Çizelge 3.10. Konum ve ilerleme hızlarına bağlı olarak sürelerin verilmesi

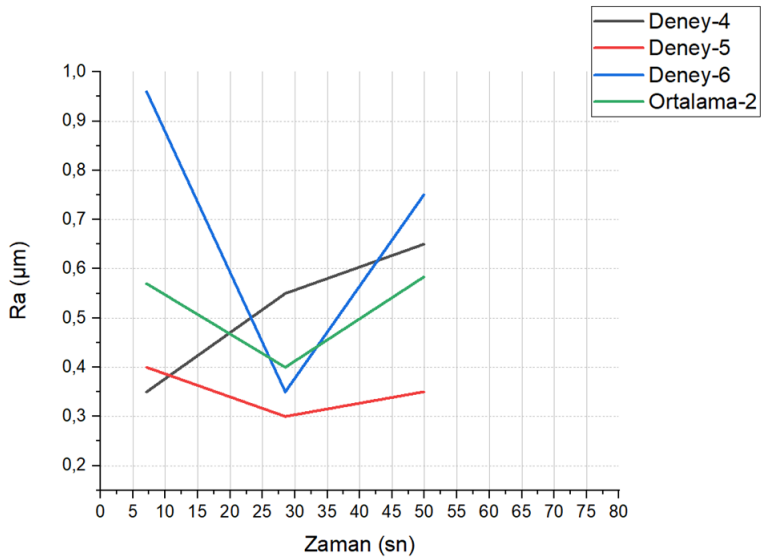
İlerleme Hızı (mm/dk)	Konum (mm)	Zaman (sn)
350	50	10,25
	200	41
	350	71,75
500	50	7,12
	200	28,5
	350	49,87
650	50	5,5
	200	22
	350	38,5

İlerleme hızı 350 mm/dk'ya sahip olan ilk üç deney ve konuma bağlı yüzey pürüzlülük değerleri ortalamasının Ra-Zaman grafiği Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



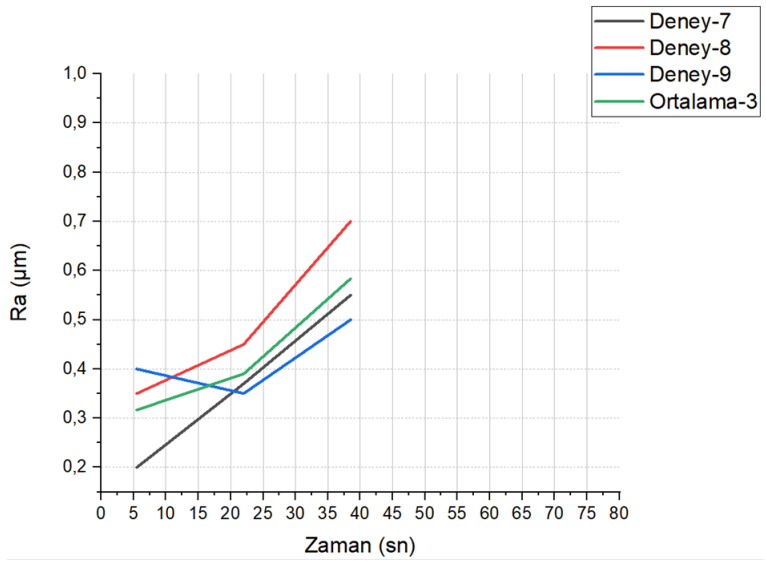
Şekil 3.10. İlerleme hızı 350 mm/dk ait deneylerin Ra-Zaman grafiği

İlerleme hızı 500 mm/dk'ya ait 4, 5 ve 6 numaralı deneylerin ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin Ra-Zaman grafiği Şekil 3.11.'de verilmiştir.



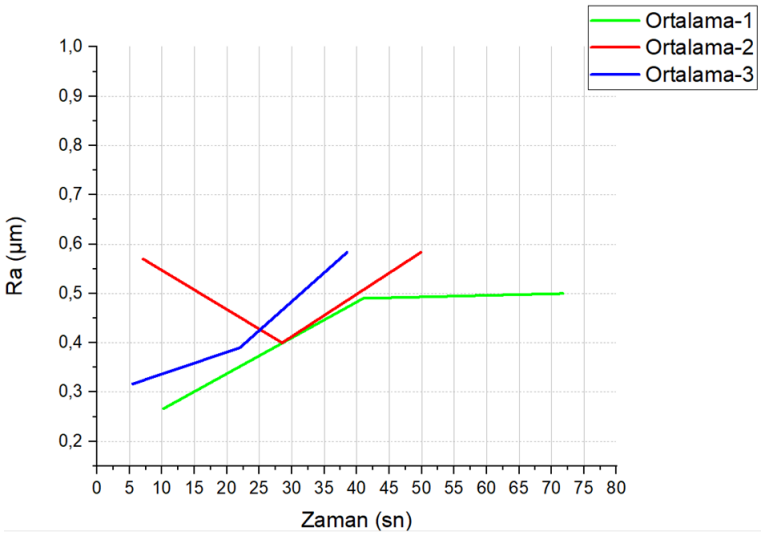
Şekil 3.11. İlerleme hızı 500 mm/dk ait deneylerin Ra-Zaman grafiği

İlerleme hızı 650 mm/dk olarak verilen 7, 8, ve 9 numaralı deneylerin ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin verildiği Ra-Zaman grafiği ise Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. İlerleme hızı 650 mm/dk ait deneylerin Ra-Zaman grafiği

Şekil 3.13.'de verilen grafikte ise her bir ilerleme hızı grubunda ölçümlenen Ra değerlerinin, alınan ortalamalarının ortak olarak gösterildiği Ra-Zaman grafiği bulunmaktadır.



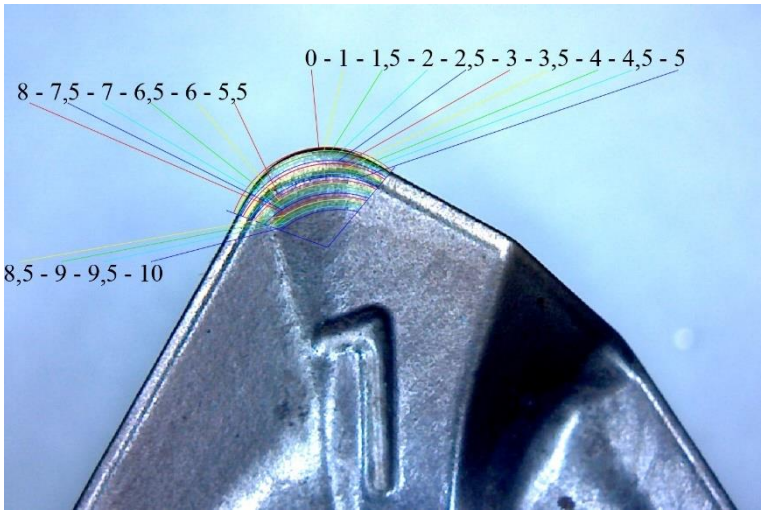
Şekil 3.13. Ortak ilerleme hızlarında ölçülen ortalama Ra değerlerinin Ra-Zaman grafiği

Elde edilen Ra-Zaman grafikleri incelendiğinde, ilerleme hızı, parça işleme süresi ve devir hızındaki artışın takım ucu aşınmasının, numune üzerinde değişken yüzey pürüzlülüğü değerleri oluşturduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünü değişken ilerleme hızı ve zaman değerlerinin haricinde kesme hızı, talaş derinliği, yanal adım miktarı, çevresel koşullar ve deney parçasının tabla üzerine sabitleme yöntemi gibi etken parametreler değiştirmektedir. Örneğin; 6 ve 9 numaralı deneylerde tarama kafasının parçayı işlemeye başladıktan sonraki 50mm konumunda diğer deneylerden fark edilir şekilde yüzey pürüzlülük değerleri yüksek çıkmaktadır. Deney numunesinin orta konumuna yaklaştıkça Ra değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun yanal adım miktarının az olduğu iki parçada gerçekleşmesi deney numunesinin rijit şekilde işlenemediğinin bir göstergesidir. Böylece birçok etken ve parametrenin bulunduğu deneysel çalışmalarda en optimum değerlerin ve sonuçların elde edilmesi için analiz çalışması yapılması daha uygun olacaktır.

3.5.2. Takım ucu aşınma miktarlarının (Vb) belirlenmesi

Deney numunelerinin yüzey frezeleme işlemi sırasında takım uçlarında gerçekleşen aşınma miktarları ise “TONPOP USB dijital mikroskop” yardımıyla gözlemlenmiştir. Her bir deneyde yedi adet olmak üzere toplamda altmış üç adet görüntü alınmıştır. Görüntüleri alınan takım uçları aşınma miktarlarına göre puanlanarak her deney için ortalama takım ucu aşınma miktarları belirlenmiştir. Aşınma gerçekleşmeyen takım ucundan alınan

görsel üzerinde eşit aralıklarda çizgiler çizilerek sıfırdan ona kadar rakamlar verilmiştir. Şekil 3.14.'de Takım ucu aşınma miktarına göre puanlamanın yapılması gösterilmektedir. Çizelge 3.11.'de ise takım uçlarının aşınma miktarlarına göre verilen puanlar gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Takım ucu aşınma miktarının puanlanması

Çizelge 3.11. Aşınma miktarlarına göre takım uçlarına verilen puanlar

Deney No	Deney Sıra	Parametre Kodu	Takım Ucu Numarası						
			1	2	3	4	5	6	7
1	6	350-0750-0,20-033	3,5	3,0	2,0	2,0	0,0	2,0	0,0
2	3	350-1000-0,35-050	4,0	5,0	3,0	3,0	4,5	3,0	6,5
3	1	350-1250-0,50-100	5,0	4,0	3,5	6,0	10,0	2,5	3,0
4	5	500-0750-0,35-100	0,0	2,5	1,0	0,0	3,0	0,0	1,0
5	2	500-1000-0,50-033	6,0	7,0	4,5	6,5	8,0	6,0	5,0
6	8	500-1250-0,20-050	2,5	0,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,0
7	4	650-0750-0,50-050	7,0	5,0	1,0	8,0	4,5	6,5	4,5
8	7	650-1000-0,20-100	0,0	3,0	1,5	2,5	1,0	2,0	3,0
9	9	650-1250-0,35-033	3,5	7,0	4,0	3,5	4,0	4,0	5,0

Gerçekleştirilen ölçümler ve puanlama neticesinde yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu aşınma değerleri Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Yüzey pürüzlülük ve takım ucu aşınma değerleri

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ra	0,63	0,32	0,30	0,52	0,35	0,69	0,37	0,50	0,42
Vb	1,7857	4,1429	4,8571	1,0714	6,1429	2,6429	5,2143	1,8571	4,4286

4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)

4.1. Deney Sonuçlarının Analizi

Deney çalışması sonuçlarının analitik hesaplarının yapılması ve Minitab 18 istatistik yazılımının kullanılmasıyla, S/N (sinyal-gürültü) oranın analizi, ANOVA varyans analizi ve parametre etkileşim grafikleri oluşturulmuştur.

4.1.1 Sinyal-Gürültü Oranının Analizi

Çizelge 4.1., Ultra yüksek sertlikte zırh çeliği Protection 600T'nin Taguchi L9 deneysel tasarımı ile elde edilen S/N oranlarını ve deneysel Ra ve Vb sonuçlarını göstermektedir.

İlerleme hızı, kesme hızı, talaş derinliği ve yanal adım miktarının kontrol faktörleri arasında en etkili olanı, Taguchi tabanlı yanıt tablosu kullanılarak Ra ve Vb performans özelliklerinin en uygun seviyeleri belirlenmiştir. Çizelge 4.2., S/N yanıt çizelgesini vermektedir. Ra üzerindeki en etkili parametre olarak talaş derinliğini ve Vb üzerindeki en etkili parametre olarak talaş derinliğini göstermektedir. Şekil 4.1. ve 4.2.'deki grafikler, Protection 600T ultra yüksek sertlikteki zırh çeliğinin Ra ve Vb için S/N değerleri üzerindeki kontrol faktörü etkilerini göstermektedir.

Ra, yüzey pürüzlülüğü için optimal kesme parametreleri (Şekil 4.1), ilerleme hızının 1. seviyesi (A1- 350 mm/dak), kesme hızının 2. seviyesi (B2- 250 m/dk), talaş derinliğinin 3. seviyesi (C3- 0,5 mm) ve yanal adımın 3. seviyesi (D3- 100%) olarak saptanmıştır.

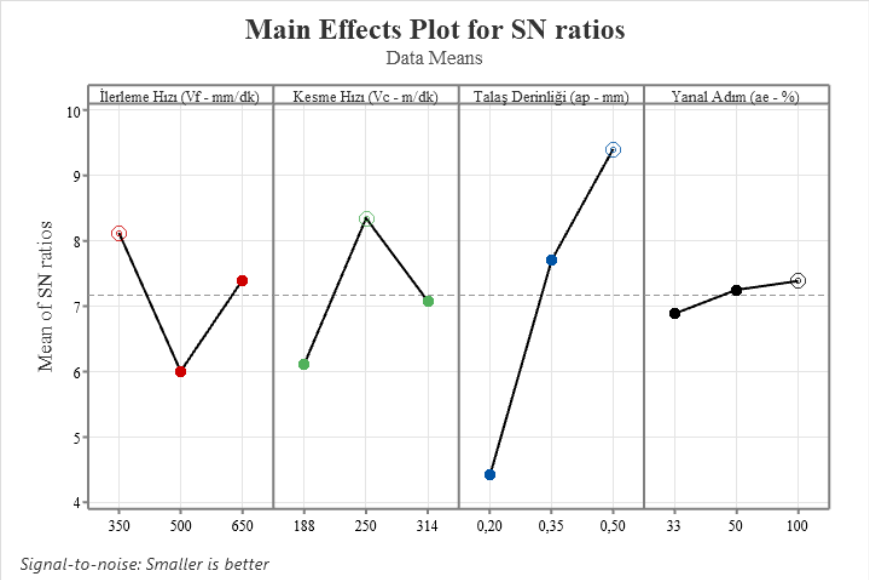
Vb, takım ucu aşınma miktarı için optimal kesme parametreleri (Şekil 4.2), ilerleme hızının 2. seviyesi (A2- 500 mm/dak), kesme hızının 1. seviyesi (B1- 188 m/dk), talaş derinliğinin 1. seviyesi (C1- 0,2 mm) ve yanal adımın 3. seviyesi (D3- 100%) olarak saptanmıştır.

Çizelge 4.1. L9 ortogonal dizisine göre elde edilen S/N oranları, Ra ve Vb sonuçları gösterilmektedir

Deney No	**Kontrol Faktörleri**				**Yüzey Pürüzlülüğü**	**Takım Aşınması**	**S/N Oranı**	**S/N Oranı**
	A (Vf)	**B** (Vc)	**C** (ap)	**D** (ae)	Ra (µm)	Vb (mm)	Ra (db)	Vb (db)
1	350	188	0,2	33	0,63	1,786	4,013	-5,036
2	350	250	0,35	50	0,32	4,143	9,897	-12,346
3	350	314	0,5	100	0,30	4,857	10,458	-13,728
4	500	188	0,35	100	0,52	1,071	5,680	-0,599
5	500	250	0,5	33	0,35	6,143	9,119	-15,767
6	500	314	0,2	50	0,69	2,643	3,223	-8,442
7	650	188	0,5	50	0,37	5,214	8,636	-14,344
8	650	250	0,2	100	0,50	1,857	6,021	-5,377
9	650	314	0,35	33	0,42	4,429	7,535	-12,925

Çizelge 4.2. Ra ve Vb değerleri için S/N önem ve sonuç çizelgeleri

Ra(µm)					Vb				
Seviye	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (mm)	Yanal Adım (%)	Seviye	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (mm)	Yanal Adım (%)
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	**8,123**	6,11	4,419	6,889	1	-10,37	**-6,66**	**-6,285**	-11,243
2	6,007	**8,345**	7,704	7,252	2	**-8,269**	-11,163	-8,623	-11,711
3	7,397	7,072	**9,404**	**7,386**	3	-10,882	-11,698	-14,613	**-6,568**
Delta	2,115	2,236	4,985	0,497	Delta	2,613	5,038	8,328	5,143
Rank	3	2	1	4	Rank	4	3	1	2

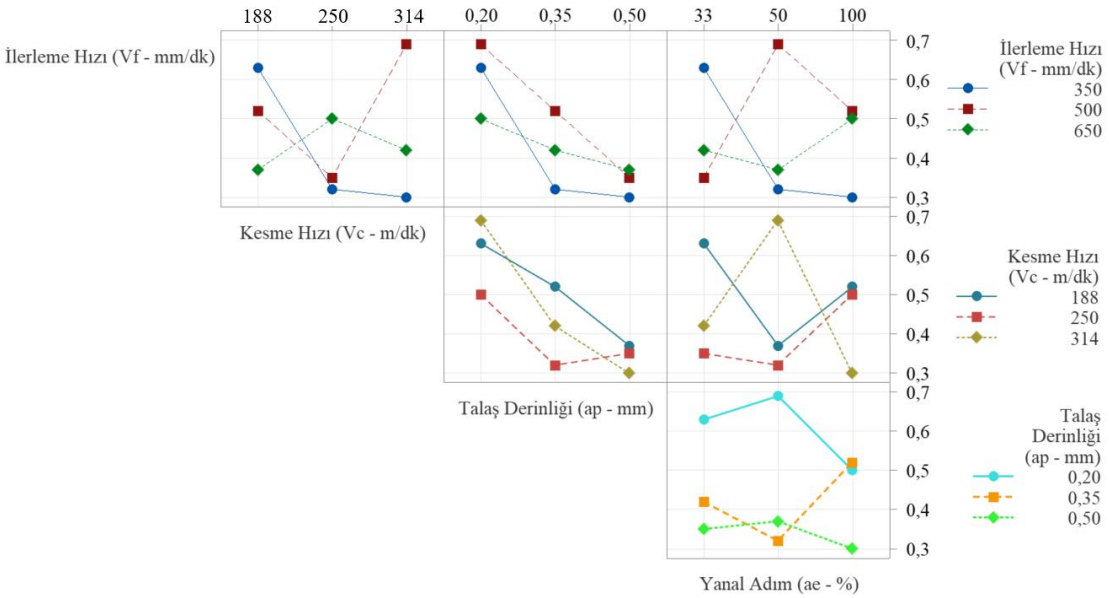


Şekil 4.1. Ra değerlerinin ortalama S/N oranındaki proses parametresi etkileri



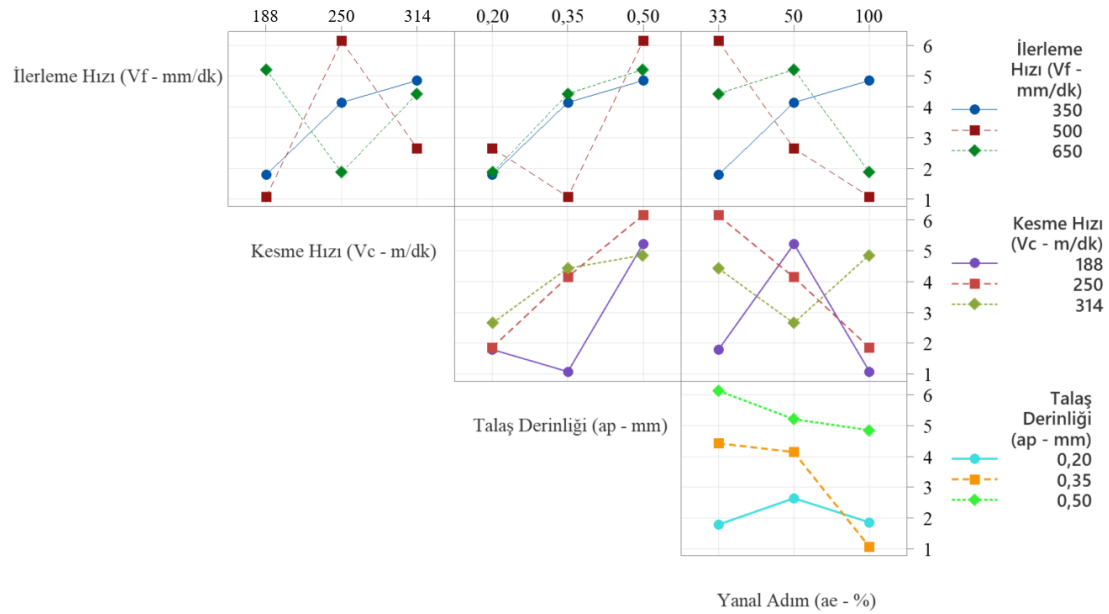
Şekil 4.2. Vb değerlerinin ortalama S/N oranındaki proses parametresi etkileri

Yüzey pürüzlülük ve parametre değerleri arasındaki etkileşimler aşağıda (Şekil 4.3.) bulunan grafikte verilmiştir.



Şekil 4.3. Ra ve parametre değerleri arasındaki etkileşim grafiği

Şekil 4.4.'de Takım ucu aşınması ve parametre değerleri arasındaki etkileşimler grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Vb ve parametre değerleri arasındaki etkileşim grafiği

4.2. Varyans Analizi

4.2.1. Ra değeri için varyans analizinin analitik hesaplanması

$A_1 = 0{,}63 + 0{,}32 + 0{,}30 = 1{,}25$ $\quad$ $C_1 = 0{,}63 + 0{,}69 + 0{,}50 = 1{,}82$

$A_2 = 0{,}52 + 0{,}35 + 0{,}69 = 1{,}56$ $\quad$ $C_2 = 0{,}32 + 0{,}52 + 0{,}42 = 1{,}26$

$A_3 = 0{,}37 + 0{,}50 + 0{,}42 = 1{,}29$ $\quad$ $C_3 = 0{,}30 + 0{,}35 + 0{,}37 = 1{,}02$

$B_1 = 0{,}63 + 0{,}52 + 0{,}37 = 1{,}52$ $\quad$ $D_1 = 0{,}63 + 0{,}35 + 0{,}42 = 1{,}40$

$B_2 = 0{,}32 + 0{,}35 + 0{,}50 = 1{,}17$ $\quad$ $D_2 = 0{,}32 + 0{,}69 + 0{,}37 = 1{,}38$

$B_3 = 0{,}30 + 0{,}69 + 0{,}42 = 1{,}41$ $\quad$ $D_3 = 0{,}30 + 0{,}52 + 0{,}50 = 1{,}32$

Çizelge 4.3.'de kademelere göre faktörlere ait toplam değerler gösterilmektedir. Bu veriler yardımıyla her faktörün kareler toplamı hesaplanabilmektedir.

Çizelge 4. 3. Faktör kademelerinin toplam değerleri

Faktör		A	B	C	D	T
	1	1,25	1,52	1,82	1,4	
Kademe	2	1,56	1,17	1,26	1,38	4,1
	3	1,29	1,41	1,02	1,32	

Her faktörün kareler toplamı:

$$SS_A = \frac{A_{1^2}}{nA_1} + \frac{A_{2^2}}{nA_2} + \frac{A_{3^2}}{nA_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{1{,}25^2}{3} + \frac{1{,}56^2}{3} + \frac{1{,}29^2}{3} - \frac{4{,}1^2}{9} = 0{,}018956$$

$$SS_B = \frac{B_{1^2}}{nB_1} + \frac{B_{2^2}}{nB_2} + \frac{B_{3^2}}{nB_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{1{,}52^2}{3} + \frac{1{,}17^2}{3} + \frac{1{,}41^2}{3} - \frac{4{,}1^2}{9} = 0{,}021356$$

$$SS_C = \frac{C_{1^2}}{nC_1} + \frac{C_{2^2}}{nC_2} + \frac{C_{3^2}}{nC_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{1{,}82^2}{3} + \frac{1{,}26^2}{3} + \frac{1{,}02^2}{3} - \frac{4{,}1^2}{9} = 0{,}112356$$

$$SS_D = \frac{D_{1^2}}{nD_1} + \frac{D_{2^2}}{nD_2} + \frac{D_{3^2}}{nD_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{1{,}40^2}{3} + \frac{1{,}38^2}{3} + \frac{1{,}32^2}{3} - \frac{4{,}1^2}{9} = 0{,}001156$$

Tüm verilerin kareleri toplamı:

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^{N} yi^2\right] - \frac{T^2}{N} =$$

$$= (0{,}63^2 + 0{,}32^2 + 0{,}30^2 + 0{,}52^2 + 0{,}35^2 + 0{,}69^2 + 0{,}37^2 + 0{,}50^2 + 0{,}42^2) - \frac{4{,}1^2}{9}$$

$$= 0{,}153822$$

Hata kareleri toplamı:

$$SS_e = SS_r - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_D)$$

$$= 0{,}1538 - (0{,}0189 + 0{,}0214 + 0{,}1123 + 0{,}0012) = 0$$

Her bir faktörün serbestlik derecesi:

$$VA = k_A - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$VB = k_B - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$VC = k_C - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$VD = k_D - 1 = 3 - 1 = 2$$

Toplam serbestlik derecesi:

$$VT = N - 1 = 9 - 1 = 8$$

Hatanın serbestlik derecesi:

$$v_e = VT - (VA + VB + VC + VD) = 8 - (2 + 2 + 2 + 2) = 8 - 8 = 0$$

Her bir faktörün varyansını hesaplarsak:

$$V_A = \frac{SS_A}{VA} = \frac{0{,}018956}{2} = 0{,}009478$$

$$V_B = \frac{SS_B}{VB} = \frac{0{,}021356}{2} = 0{,}010678$$

$$V_C = \frac{SS_C}{VC} = \frac{0{,}112356}{2} = 0{,}056178$$

$$V_D = \frac{SS_D}{VD} = \frac{0{,}001156}{2} = 0{,}000578$$

Hatanın varyansı:

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} = 0$$

Her bir faktörün F değeri:

$F_{A,B,C,D} = \frac{V_{A,B,C,D}}{V_e} = V_e$ Değeri sıfır olduğundan F değerleri de tanımsızdır.

Faktörlerin beklenen kareleri toplamının hesaplanması:

$SS'_A = SS_A - (V_e)(v_A) = 0{,}018956$

$SS'_B = SS_B - (V_e)(v_B) = 0{,}021356$

$SS'_C = SS_C - (V_e)(v_C) = 0{,}112356$

$SS'_D = SS_D - (V_e)(v_D) = 0{,}001156$

Hesaplanan kareler toplamından tüm değerlerin pozitif olduğu dolayısıyla tüm faktörlere ait yüzde katkı oranlarını aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} x100 = \frac{0{,}018956}{0{,}153822} x100 = 12{,}32$$

$$P = \frac{SS'_B}{SS_T} x100 = \frac{0{,}021356}{0{,}153822} x100 = 13{,}88$$

$$P = \frac{SS'_C}{SS_T} x100 = \frac{0{,}112356}{0{,}153822} x100 = 73{,}04$$

$$P = \frac{SS'_D}{SS_T} x100 = \frac{0{,}001156}{0{,}153822} x100 = 0{,}75$$

Hesaplanan SS, SS', v, V, F, P değerleri Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Ra, ANOVA analizinin analitik hesap sonuçları

Faktör	***v***	***SS***	***V***	***SS'***	***F***	***P***
A	2	0,01896	0,00948	0,01896	*	12,38
B	2	0,02136	0,01068	0,02136	*	13,88
C	2	0,11236	0,05618	0,11236	*	73,04
D	2	0,00116	0,00058	0,00116	*	0,75
e	0	*	*	*	*	0
T	8	0,15382				100

4.2.2. Vb değeri için varyans analizinin analitik hesaplanması

$A_1 = 1{,}786 + 4{,}143 + 4{,}857 = 10{,}786$ $\quad C_1 = 1{,}786 + 2{,}643 + 1{,}857 = 6{,}286$

$A_2 = 1{,}071 + 6{,}143 + 2{,}643 = 9{,}857$ $\quad C_2 = 4{,}143 + 1{,}071 + 4{,}429 = 9{,}643$

$A_3 = 5{,}214 + 1{,}857 + 4{,}429 = 11{,}5$ $\quad C_3 = 4{,}857 + 6{,}143 + 5{,}214 = 16{,}214$

$B_1 = 1{,}786 + 1{,}071 + 5{,}214 = 8{,}071$ $\quad D_1 = 1{,}786 + 6{,}143 + 4{,}429 = 12{,}358$

$B_2 = 4{,}143 + 6{,}143 + 1{,}857 = 12{,}143$ $\quad D_2 = 4{,}143 + 2{,}643 + 5{,}214 = 12$

$B_3 = 4{,}857 + 2{,}643 + 4{,}429 = 11{,}929$ $\quad D_3 = 4{,}857 + 1{,}071 + 1{,}857 = 7{,}785$

Çizelge 4.5.'de kademelere göre faktörlere ait toplam değerler gösterilmektedir. Bu veriler yardımıyla her faktörün kareler toplamı hesaplanabilmektedir.

Çizelge 4.5. Ra, faktör kademelerinin toplam değerleri

Faktör		A	B	C	D	T
	1	10,786	8,071	6,286	12,358	
Kademe	2	9,857	12,143	9,643	12	32,143
	3	11,5	11,929	16,214	7,785	

Her faktörün kareler toplamı:

$$SS_A = \frac{A_{1^2}}{nA_1} + \frac{A_{2^2}}{nA_2} + \frac{A_{3^2}}{nA_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{10{,}786^2}{3} + \frac{9{,}857^2}{3} + \frac{11{,}5^2}{3} - \frac{32{,}143^2}{9} = 0{,}452$$

$$SS_B = \frac{B_{1^2}}{nB_1} + \frac{B_{2^2}}{nB_2} + \frac{B_{3^2}}{nB_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{8{,}071^2}{3} + \frac{12{,}143^2}{3} + \frac{11{,}929^2}{3} - \frac{32{,}143^2}{9} = 3{,}500$$

$$SS_C = \frac{C_{1^2}}{nC_1} + \frac{C_{2^2}}{nC_2} + \frac{C_{3^2}}{nC_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{6{,}286^2}{3} + \frac{9{,}643^2}{3} + \frac{16{,}214^2}{3} - \frac{32{,}143^2}{9} = 17{,}003$$

$$SS_D = \frac{D_{1^2}}{nD_1} + \frac{D_{2^2}}{nD_2} + \frac{D_{3^2}}{nD_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{12{,}358^2}{3} + \frac{12^2}{3} + \frac{7{,}785^2}{3} - \frac{32{,}143^2}{9} = 4{,}311$$

Tüm verilerin kareleri toplamı:

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^{N} yi^2\right] - \frac{T^2}{N} =$$

$$= (1{,}7857^2 + 4{,}1429^2 + 4{,}8571^2 + 1{,}0714^2 + 6{,}1429^2 + 2{,}6429^2 + 5{,}2143^2 + 1{,}8571^2 + 4{,}4286^2) - \frac{32{,}143^2}{9} = 25{,}265$$

Hata kareleri toplamı:

$$SS_e = SS_r - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_D)$$
$$= 25{,}265 - (0{,}452 + 3{,}5 + 17{,}003 + 4{,}311) = 0$$

Her bir faktörün serbestlik derecesi:

$$VA = k_A - 1 = 3 - 1 = 2$$
$$VB = k_B - 1 = 3 - 1 = 2$$
$$VC = k_C - 1 = 3 - 1 = 2$$
$$VD = k_D - 1 = 3 - 1 = 2$$

Toplam serbestlik derecesi:

$$VT = N - 1 = 9 - 1 = 8$$

Hatanın serbestlik derecesi:

$$v_e = VT - (VA + VB + VC + VD) = 8 - (2 + 2 + 2 + 2) = 8 - 8 = 0$$

Her bir faktörün varyansını hesaplarsak:

$$V_A = \frac{SS_A}{VA} = \frac{0{,}452}{2} = 0{,}2262$$
$$V_B = \frac{SS_B}{VB} = \frac{3{,}5}{2} = 1{,}75$$
$$V_C = \frac{SS_C}{VC} = \frac{17}{2} = 8{,}5$$
$$V_D = \frac{SS_D}{VD} = \frac{4{,}309}{2} = 2{,}154$$

Hatanın varyansı:

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} = 0$$

Her bir faktörün F değeri:

$F_{A,B,C,D} = \frac{V_{A,B,C,D}}{V_e} =$ V_e Değeri tanımsız olduğundan F değerleri de tanımsızdır.

Faktörlerin beklenen kareleri toplamının hesaplanması:

$$SS'_A = SS_A - (V_e)(v_A) = 0{,}452$$

$SS'_B = SS_B - (V_e)(v_B) = 3{,}5$

$SS'_C = SS_C - (V_e)(v_C) = 17$

$SS'_D = SS_D - (V_e)(v_D)$=4,3

Hesaplanan kareler toplamından tüm değerlerin pozitif olduğu dolayısıyla tüm faktörlere ait yüzde katkı oranlarını aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} x100 = \frac{0{,}452}{25{,}266} x100 = 1{,}79$$

$$P = \frac{SS'_B}{SS_T} x100 = \frac{3{,}5}{25{,}266} x100 = 13{,}85$$

$$P = \frac{SS'_C}{SS_T} x100 = \frac{17}{25{,}266} x100 = 67{,}3$$

$$P = \frac{SS'_D}{SS_T} x100 = \frac{4{,}3}{25{,}266} x100 = 17{,}06$$

Hesaplanan SS, SS', v, V, F, P değerleri Çizelge 4.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Vb, ANOVA analizinin analitik hesap sonuçları

Faktör	***v***	***SS***	***V***	***SS'***	***F***	***P***
A	2	0,452	0,226	0,452	*	1,79
B	2	3,500	1,750	3,500	*	13,85
C	2	17,000	8,500	17,000	*	67,3
D	2	4,311	2,145	4,311	*	17,06
e	0	*	*	*	*	0
T	8	25,266				100

4.2.3. Ra ve Vb değerleri için S/N ANOVA analitik hesaplanması

Taguchi, sapma miktarlarının minimizasyonu için S/N oranını kullanmıştır. S/N oranı daha öncede belirtildiği gibi karakteristiğin tipine göre hesaplanmaktadır. Hedef değer sıfır olduğundan S/N oranı aşağıdaki formülle hesaplanacaktır.

$$S/N = -10log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right]$$

Deneme sayımız bir olduğundan $n = 1$'dir.

Tüm gözlem değerlerinin S/N oranlarını “En küçük en iyi” karakteristiğine göre hesaplarız. Hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.7.’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Ra, S/N gürültü oranlarının verilmesi

Deney No	Ra		Vb	
	yi	***S/N***	***yi***	***S/N***
1	0,63	4,013	1,786	-5,036
2	0,32	9,897	4,143	-12,346
3	0,30	10,458	4,857	-13,728
4	0,52	5,680	1,071	-0,599
5	0,35	9,119	6,143	-15,767
6	0,69	3,223	2,643	-8,442
7	0,37	8,636	5,214	-14,344
8	0,50	6,021	1,857	-5,377
9	0,42	7,535	4,429	-12,925

Hesaplanan S/N oranlarının her faktör için karelerini bulabilmemiz için, her faktörün kademesine göre S/N değerlerini hesaplamamız gerekmektedir. Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.9.’da faktörlerin kademelere göre Ra ve Vb için S/N değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4. 8. Ra, faktörlerin kademelere göre S/N değerleri gösterilmektedir

Faktör		A	B	C	D	T
Kademe	1	24,3678	18,3291	13,2568	20,6668	64,581
	2	18,0215	25,0362	23,1119	21,756	
	3	22,1916	21,2156	28,2122	22,1581	

Çizelge 4.9. Vb, faktörlerin kademelere göre S/N değerleri gösterilmektedir

Faktör		A	B	C	D	T
Kademe	1	31,1098	19,9791	18,8545	33,729	88,5638
	2	24,8081	33,4903	25,8704	35,1316	
	3	32,6459	35,0944	43,8389	19,7032	

Hesaplanan S/N oranlarının her faktör için karelerini bulalım.

Ra değerleri için hata kareleri;

$$SS_A = \frac{A_{1^2}}{nA_1} + \frac{A_{2^2}}{nA_2} + \frac{A_{3^2}}{nA_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{24{,}368^2}{3} + \frac{18{,}022^2}{3} + \frac{22{,}192^2}{3} - \frac{64{,}581^2}{9} = 6{,}932$$

$$SS_B = \frac{B_{1^2}}{nB_1} + \frac{B_{2^2}}{nB_2} + \frac{B_{3^2}}{nB_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{18{,}329^2}{3} + \frac{25{,}036^2}{3} + \frac{21{,}216^2}{3} - \frac{64{,}581^2}{9} = 7{,}445$$

$$SS_C = \frac{C_{1^2}}{nC_1} + \frac{C_{2^2}}{nC_2} + \frac{C_{3^2}}{nC_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{13{,}257^2}{3} + \frac{23{,}112^2}{3} + \frac{28{,}212^2}{3} - \frac{64{,}581^2}{9} = 38{,}532$$

$$SS_D = \frac{D_{1^2}}{nD_1} + \frac{D_{2^2}}{nD_2} + \frac{D_{3^2}}{nD_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{20{,}667^2}{3} + \frac{21{,}756^2}{3} + \frac{22{,}158^2}{3} - \frac{64{,}581^2}{9} = 0{,}395$$

Vb değerleri için hata kareleri;

$$SS_A = \frac{A_{1^2}}{nA_1} + \frac{A_{2^2}}{nA_2} + \frac{A_{3^2}}{nA_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{31{,}110^2}{3} + \frac{24{,}808^2}{3} + \frac{32{,}646^2}{3} - \frac{88{,}564^2}{9} = 11{,}5$$

$$SS_B = \frac{B_{1^2}}{nB_1} + \frac{B_{2^2}}{nB_2} + \frac{B_{3^2}}{nB_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{19{,}981^2}{3} + \frac{33{,}490^2}{3} + \frac{35{,}094^2}{3} - \frac{88{,}564^2}{9} = 45{,}942$$

$$SS_C = \frac{C_{1^2}}{nC_1} + \frac{C_{2^2}}{nC_2} + \frac{C_{3^2}}{nC_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{18{,}854^2}{3} + \frac{25{,}870^2}{3} + \frac{43{,}839^2}{3} - \frac{88{,}564^2}{9} = 110{,}7$$

$$SS_D = \frac{D_{1^2}}{nD_1} + \frac{D_{2^2}}{nD_2} + \frac{D_{3^2}}{nD_3} - \frac{T^2}{N} = \frac{33{,}729^2}{3} + \frac{35{,}131^2}{3} + \frac{19{,}703^2}{3} - \frac{88{,}564^2}{9} = 48{,}525$$

Ra için tüm S/N verilerinin kareleri toplamı;

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^{N} yi^2\right] - \frac{T^2}{N} =$$

$$= (4{,}013^2 + 9{,}897^2 + 10{,}457^2 + 5{,}679^2 + 9{,}118^2 + 3{,}223^2 + 8{,}636^2 + 6{,}020^2 + 7{,}535^2) - \frac{64{,}581^2}{9} = 53{,}408$$

Hata kareleri toplamı;

$$SS_e = SS_r - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_D)$$

$$= 53{,}408 - (6{,}932 + 7{,}445 + 38{,}532 + 0{,}395) = 0{,}104$$

Vb için tüm S/N verilerinin kareleri toplamı;

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^{N} yi^2\right] - \frac{T^2}{N} =$$

$$= (5{,}036^2 + 12{,}346^2 + 13{,}728^2 + 0{,}599^2 + 15{,}767^2 + 8{,}442^2 + 14{,}344^2 + 5{,}377^2 + 12{,}925^2) - \frac{88{,}564^2}{9} = 216{,}683$$

Hata kareleri toplamı;

$$SS_e = SS_r - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_D)$$

$$= 216{,}683 - (11{,}5 + 45{,}942 + 110{,}7 + 48{,}525) = 0{,}016$$

Serbestlik derecesi ve hata varyansının değeri sıfır olduğu için yüzey pürüzlülük (Ra) ve takım ucu aşınma (Vb) değerlerinin F testi yapılamamaktadır. Ra ve Vb S/N oranlarının ANOVA sonuçları Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Ra, S/N gürültü oranlarının ANOVA analizinin analitik hesap sonuçları

Faktör	***v***	***SS***	***V***	***F***
A	2	6,932	3,466	*
B	2	7,445	3,723	*
C	2	38,532	19,266	*
D	2	0,395	0,198	*
e	0	*	*	*
T	8	53,408		

Çizelge 4.11. Vb, S/N gürültü oranlarının ANOVA analizinin analitik hesap sonuçları

Faktör	***v***	***SS***	***V***	***F***
A	2	11,500	5,750	*
B	2	45,942	22,971	*
C	2	110,700	55,350	*
D	2	48,525	24,263	*
e	0	*	*	*
T	8	216,683		

4.3. Minitab 18 – ANOVA Analizi

Deneysel bir tasarımda tüm kontrol faktörlerinin bireysel etkileşimlerini ve etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmaktadır. Çizelge 4.12. ANOVA sonuçlarını, ilerleme hızı, kesme hızı, talaş derinliği ve yanal adımın kontrol faktörlerinin 95% güven aralığı ve 5% anlamlılık seviyesinde Ra ve Vb üzerindeki etkilerini vermektedir. Bu çalışmada ANOVA sonuçları, Ra üzerinde en etkili parametrenin 73.04% etki oranı ile faktör C (talaş derinliği) olduğunu ortaya koymuştur. Sırasıyla Faktör B (kesme hızı) 13.88% ve Faktör A (ilerleme hızı) 12.32% değerleriyle en etkili parametrelerdir. Faktör D'nin (yanal adım) etkisiz olduğu görülmüştür. Vb üzerindeki en etkili parametre, 67.3%'te bulunan (faktör C) talaş derinliğidir. Yanal adım (faktör D, 17.06%) ikinci ve kesme hızı (faktör B, 13,85%) üçüncü etkili parametrelerdir. İlerleme hızının (Faktör A, 1.79%) takım ucu aşınması üzerine etkisi oldukça düşüktür.

Çizelge 4.12. Ra ve Vb için ANOVA sonuç çizelgeleri

	Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi (Dof)	Karelerin Toplamı (SS)	Katkı Oranı	Ortalama Kare (MS)	F Oranı
Ra	İlerleme Hızı (Vf - mm/dk)	2	0,018956	12,32%	0,009478	*
	Kesme Hızı (Vc - m/dk)	2	0,021356	13,88%	0,010678	*
	Talaş Derinliği (ap - mm)	2	0,112356	73,04%	0,056178	*
	Yanal Adım (ae - %)	2	0,001156	0,75%	0,000578	*
	Hata	0	*	*	*	
	Toplam	8	0,153822	100,00%		
Vb	İlerleme Hızı (Vf - mm/dk)	2	0,45235	1,79%	0,2262	*
	Kesme Hızı (Vc - m/dk)	2	3,50011	13,85%	1,7501	*
	Talaş Derinliği (ap - mm)	2	17,00347	67,30%	8,5017	*
	Yanal Adım (ae - %)	2	4,30990	17,06%	2,1549	*
	Hata	0	*	*	*	
	Toplam	8	25,26582	100,00%		

5. SONUÇ

Frezeleme işleminde, farklı işleme parametrelerinin seçimi yüzey pürüzlülüğü kalitesi ve takım ömrü açısından oldukça önemlidir. Bu deneysel çalışmada farklı işleme parametrelerinin frezeleme işleminde Millux Protection 600T zırh plakasının yüzey pürüzlülüğü ve takım ucu aşınması üzerindeki etkisi analiz edilmektedir. Seçilen parametreler için Taguchi optimizasyon yöntemine dayalı olarak dokuz farklı deney çalışması yapılmıştır. Optimum seviyeyi ve katkı yüzdesini belirlemek için Sinyal-Gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için bireysel parametrelerin optimum seviyeleri, ilerleme hızı (A) seviye 1, kesme hızı (B) seviye 2, talaş derinliği (C) seviye 3 ve yanal adım (D) seviye 3 olarak tespit edilmiştir. Seçilen parametrelerin katkı yüzdeleri sırasıyla şu şekildedir: 73,04% ile talaş derinliği, 13,88% ile kesme hızı, 12,32% ile ilerleme hızıdır. Yanal dalmanın ise yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki yüzde katkı oranı ihmal edilecek kadar azdır. Takım ucu aşınma miktarı için bireysel parametrelerin optimum seviyeleri, ilerleme hızı (A) seviye 2, kesme hızı (B) seviye 1, talaş derinliği (C) seviye 1 ve yanal adım (D) seviye 3 olarak bulunmuştur. Seçilen parametrelerin katkı yüzdeleri sırasıyla şu şekildedir: 67,3% ile talaş derinliği, 17,06% ile yanal adım, 13,85% ile kesme hızıdır. İlerleme hızının takım ucu aşınması üzerindeki yüzde katkı oranı ise ihmal edilecek kadar azdır. Gerçekleştirilen her iki deneyin varyans analizi sonucunda talaş derinliği en yüksek katkı yüzdesine sahip en önemli parametre olmuş, bunu kesme hızı takip etmiştir. Fakat ilerleme hızı ve yanal adımın önem dereceleri farklılık göstermektedir. Seçilen malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını değerlendirmek için seçilen parametrelerin sayısı bu çalışmanın ana sınırlarını oluşturmaktadır. Yüksek aşınma direnci ve sertliğe sahip zırh çeliğinin işlenmesi aşamasında farklı proses parametrelerinin dikkate alınması, gelecekteki araştırmalar için önerilmektedir.