

**UZUN (Milisaniye) ve KISA ATIMLI (Nanosaniye)  
LAZERLER KULLANARAK POLİMER ve TAKVİYELİ  
KOMPOZİT POLİMERLER ÜZERİNDE AÇILAN  
MİKRO ÖLÇEKLİ DELİKLERİN OPTİMUM  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

**PROJE NO: 2008/027**

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ**

Timur CANEL

**DANIŞMAN**

Arif DEMİR

**YARDIMCI ARAŞTIRMACI**

Elif KAÇAR

**YARDIMCI ARAŞTIRMACI**

Levent CANDAN

**YARDIMCI ARAŞTIRMACI**

Belgin GENÇ

**YARDIMCI ARAŞTIRMACI**

Erhan AKMAN

HAZİRAN 2010

KOCAELİ

## **GİRİŞ**

Lazerlerin birçok parametrelerinin uygun şekilde değiştirilmesi ve uygun optik sistemlerle çok küçük alanlara odaklanabilmesiyle birçok farklı malzemenin işlenebilmesi mümkündür. Lazerlerin, endüstriyel, sağlık, askeri ve araştırma alanlarında kullanımının artmasına paralel olarak, yapılan işlemlerin de kalitesinde artış sürmektedir. Lazerlerin gerek kullanım alanındaki, gerekse işlem kalitesinin iyileştirilmesindeki yönündeki araştırmalar devam etmektedir.

Lazerle mikro düzeyde malzeme işleme, yarıiletkenler, elektronik, medikal, otomotiv, uçak ve haberleşme endüstrilerinde kullanılmaktadır. Lazerle metallerin, seramiklerin silikon ve polimerlerin kesip çıkartılma işlemi karmaşık bir işlemdir ve işlem kalitesini malzeme ve lazerde kullanılan işlem parametreleri belirler. Kesip çıkartma işlemi, genellikle, buharlaşma ve eriyik atılması olaylarının birleşimidir. Lazer ile malzeme işlemede temel parametre atım enerjisinin atım süresine oranı olan atım tepe gücüdür. Bu nedenle, mikro-boyutlu malzeme işlemede kısa atımlı lazer kullanımı en önemli gerekliliktir. Son yıllarda lazer teknolojisindeki hızlı gelişim, lazerlerin dalgaboyu, atım süresi, enerjisi ve atım frekansı gibi parametrelerini kontrol etme imkanı vermiştir. Bu parametrelerin farklı birleşimi ile lazerlerin mikro-ölçekli kullanım alanı genişlemiştir. Nanosaniye lazerler, hard-disk işlemleri, silikon tabaka işleme, IC tamiri, mikro-elektronik kesimleri, DRAM için UV baskı, delme yoluyla PCB, mürekkep püskürtmeli yazıcılar için delme, tıbbi cihaz üretimi, yakıt enjeksiyon ve filtre delikleri gibi üretim uygulamalarında kullanılmaktadır. Lazerle malzeme işleme yöntemi hızlı, temiz ve hassas olması nedeniyle tercih edilmektedir.

## **LAZER ve UYGULAMALARI**

Lazer, odaklanmış bir noktaya yüksek enerji transfer ederek odaklanmanın yapıldığı noktadaki malzemeyi eritmesi ve ardından hızla buharlaştırması ile malzemeleri kesebilmekte, delik açabilmekte, yüzey işleyebilmektedir. Lazer ışını malzeme üzerine düşürüldüğünde, soğurulan lazer enerjisi hedef malzemeyi ısıtır ve malzeme önce sıvı hale daha sonra da gaz hale geçer ve malzeme kaviteden dışarı tahliye olur. Bu işleme ablasyon denir [1,2,3,4].

Özellikle mikro ölçüde işlenmesi gereken elektronik, medikal ve endüstriyel parçaların imal edilmeleri sürecinde lazer temas etmeden ve diğer konvansiyonel işleme yöntemlerinin dezavantajlarını taşımadan yüksek hassasiyette ve sorunsuz olarak işlem yapabilmektedir.

Lazer, hızlı, hassas, temiz, verimli işleme olanağı sunduğundan, delme, kesme, yiv açma, kaynak ve ısı verme işlemi gibi işlemlerde kullanımı tercih edilir. Lazer delme işlemi, uçak sanayi, uzay sanayii, ve otomotive endüstrisi için çok önemli bir uygulamadır [5].

Özellikle mikroelektronik endüstrisinde; mikro-devre imalatında, manyetik hard disk yazılımında, video kafalarında ve elmas filmlerde, Havacılık ve gelişmiş otomotiv endüstrilerinde; soğutmada kullanılan gaz turbin pervanelerinde, yakıt enjeksiyonlarında, Mikromekanik endüstrisinde; saat, tıp, mücevherlerde birkaç mikrondan birkaç yüz mikron çapına kadar olan delikler kullanılmaktadır.

UV radyasyonu karmaşık organik ve inorganik katılarda olduğu kadar, polimerler ve aşırı sert seramikler gibi birçok malzeme tarafından soğurular. Nd:YAG lazerle yüksek yanal

çözünürlüklü, yüksek hassaslıklı ve kaliteli, tekrar üretilebilir sonuçlar elde edilebilir. Lazerle malzeme işlenmesinde temel sorun en uygun parametrelerin seçilmesidir.

Gelişen teknoloji ile geliştirilen lazer sistemleri sayesinde endüstride özellikle hassas delme işlemleri için lazerlerin kullanımı artmaktadır [5]. Seramik, silikon ve polimer katmanları lazerle delme elektronik endüstrisinde oldukça geniş kullanılır. Elektro erozyon ile işleme (Electrical Discharge Machining - EMD) ve mekanik delme yöntemlerine göre lazerle delme yöntemiyle oldukça küçük ve hassas delikler delmek mümkündür. Tablo 1’de bu yöntemlerin faydaları ve kusurları karşılaştırılmıştır [6].

Tablo 1. Lazerle delik delme yönteminin karşılaştırılması [6]

	<b>EMD</b>	<b>Mekanik Delme</b>	<b>Lazerle Delme</b>
<b>Faydaları</b>	Delik ucu düz, Büyük derinlik, Düşük donanım maliyeti,	Geniş delik çapı, Büyük derinlik, Düşük donanım maliyeti,	Yüksek iş/zaman oranı, Delikte aşınma ve çatlama yoktur, Uzaktan işlem, Düşük ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ), Çok çeşitli malzeme işleme, Düşük işlem masrafı
<b>Kusurları</b>	Düşük delme hızı, Uzun sistem kurulum zamanı, Yüksek işlem maliyeti, İşlem yapılan malzeme sayısı az	Delikte aşınma ve çatlama olur, Düşük iş/zaman oranı, Küçük delik delmek zor, İşlem yapılan malzeme sayısı az	Delik ucu sivriligi, Derinlik ve çap sınırlı, Delik girişinde tekrar katılma

Lazerle delme işlemi çok karmaşık bir işlemdir. Çünkü işlemde hem erime hem de buharlaşma olur. Bu fiziksel süreçler de ısı akısı, gaz dinamiği ve plazma etkisi gibi etkenleri içerir [7,8]. Delik delme için kullanılan lazerler kaynak için kullanılan lazerlerden biraz farklıdır. Delme ve kesme işlemlerinde kullanılan lazerlerin ısıya şiddeti daha fazla ve atım süreleri daha kısa olmalıdır [8].

Delme işleminde; metalik malzemeler için soğurmasına bağlı olarak yüksek güçlü lazerler (görünür bölge ve yakın kızılaltı bölgede ısıya yapan Nd:YAG, Nd:Glass, CO2 ve Diyot lazerler) kullanılmakta polimer benzeri malzemeler için ise bu malzemeler ısıdan fazla etkilendiğinden dolayı UV bölgesinde ve uzak kızılaltı bölgesinde ısıya yapan lazerler kullanılır (193 nm, 248 nm, 266 nm, 355 nm dalga boyunda ısıya yapan lazerler) [1,2,3,8].

Pratik olarak, delik delme işleminde delik derinliğine etki eden birkaç etken vardır: yüzeyden yansıtılan enerji kaybı, plazmadan soğurulan enerji kaybı, ısısal iletkenlik kaybı. Bu etkenler delik boyutunun malzeme içine doğru ilerlemesini azaltır. Eriyik malzeme boşaltılırken artan

delik derinliği için buharlaştırma işlemi tam olmaz. Dolayısıyla ilerleme yavaşlar ve durur. Lazerle delme işleminde dışarı atılan malzemenin tamamı buharlaştırılmaz. Delik yüzeyindeki eriyik malzeme sıcak kürecikler halinde dışarı atılabilir [9].

Hedef malzemede delik oluşmaya baslarken oluşan basınca sebep olan buhar kraterin çıkış ağzına doğru bir akış sağlar. Bu akış krater sınırları boyunca eriyik halinde taşınabilir. Bu akış işlemi buharlaştırılmamış malzeme damlacıkları şeklinde kütlelerin bir kısmı taşınır ve sonuçta eğer buharlaşmış malzeme malzemenin hepsi taşınırsa büyük bir kütle delikten taşınmış olur [7]. Özellikle sert malzemelerin delinmesi işleminde delik yüzeyi yakınlarında mikro çatlaklar oluşur [8].

Lazerle delme işlemi için demet kalitesi, dalga boyu, atım enerjisi ve frekans önemli değişkenlerdir [6,8].

Atımlı delme işlemi, atımların belirli bir düzende hedefte aynı noktaya odaklama işlemi olup odaklandığı bölgeden eriyik çıkarmayla sonuçlanıp delik oluşturma işlemidir. Bu işlemde, doğrusal olmayan lazer madde etkileşimi niteliğine göre eriyik çıkarma oranı ve mekanizma değişkenlik çeşitliliğine bağlı olarak değişim görülür. Bu değişkenler, deliğin seklini, lazer çıkısındaki düzensiz değişimi, plazma bulutundaki azalma ve saçılım ile demetin soğurulmasını içerir.

Lazer ile delme işleminde; atım süresi demetin malzeme ile etkileşmesinde deliğin kalitesi ve derinlik oranı bakımından çok önemli rol oynamaktadır. Örnek olarak metallerde, lazer enerjisi başlangıçta elektronlar tarafından soğurulur. Elektronların ısınması yaklaşık 100 femtosaniye civarındadır. Elektronlar ve fononlar arasındaki ısıl denge, elektron ve fononlar arasındaki etkileşme zamanından (0,5-50 pikosaniye) çok sonra gerçekleşir. Buradan anlaşılacağı gibi atım süresi elektron fonon etkileşme zamanından kısa olan bir lazer ile işlem yapıldığında, ısı örgülere aktarılmaz, bu nedenle malzemede erime veya ısıl zararlar görülmez. Ancak pratikte bu etkinin tam olarak gözlenmesi zordur. Kristal örgüler ısınırken buharlaşma baslar ve nanosaniye sürelerince devam eder. Malzeme onlarca nanosaniye eriyik halde kalır. Bundan dolayı çok kısa (ultrashort) atımlar (femtosaniye) kullanılırsa dahi ısıl işlem hala nanosaniye mertebelerindedir. Bundan dolayı erimis katmanlar asla sıfır yapılamaz ancak çok ince malzemelerin islenmesinde (mikron mertebelerinde) en aza indirilebilir [10].

Polimerlerin lazerle ablasyonu son yirmi yıl içinde birçok çalışmaya konu olmuştur [1,2]. Ablasyon için temel olarak, foto-termal ve foto-kimyasal olmak üzere iki model sunulmuştur. Her ikisinde de çıkarılan malzeme gaz halinde tahliye edilir. Lazerin dalga boyu, malzemenin termal özellikleri, lazer atım genişliği ve enerji yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak yöntem seçimi yapılır. Kısa dalgaboylu fotonlar daha yüksek enerjili olduğundan foto-kimyasal reaksiyonu başlatırlar [3]. Uygulamada en önemli parametre malzemede termal deformasyon olmaması ve uygulamanın tekrarlanabilir olmasıdır. Fotokimyasal ablasyon modeli, temel polimer zincirinin kovalent bağlarının kırılması veya polimer zincirinin molekülleri ile komşu zincirin molekülleri arasındaki daha zayıf bağların kırılması ile açıklanır. Foto-termal modelde yüzey ve malzeme ısıtılır. Moleküllerin elektronları lazer fotonlarını soğurarak uyarılır. Daha sonra soğurulan enerji, titreşim ve dönme enerjisi olarak sıcaklığı artırır ve kritik sıcaklık aşılınca bağlar kırılmaya baslar [1,2].

Lazerle malzeme işlemede yüksek derinlik-genişlik oranı elde etmek istendiği için termal etki istenmeyen bir durumdur. Delik civarında yanma oluştuğu zaman hem derinlik-genişlik

oranında istenilen değerlere hem de oluşan pürüzlülüğten dolayı istenilen delik kalitesine ulaşılamamaktadır. Polimer malzemenin delinmesi işleminde kullanılan Nd: YAG lazerin temel harmoniği olan 1064 nm dalgaboyu kullanıldığında gözlenen yanma etkisinin, lazerin ikinci harmoniği olan 532 nm dalgaboylu ışın kullanıldığında azaldığı gözlenmiştir. Üçüncü harmonik (355 nm) kullanılarak elde edilen deliklerde yanma etkisinin daha da azaldığı ve derinlik-genişlik oranının da arttığı gözlenmiştir. Bu gözlemler ve hesaplamalar yüksek çözünürlüklü optik mikroskopla yapılabilmektedir. Optik mikroskopla yapılan ilk gözlemler sonucu, elde edilen deliğin içinde ve etrafında pürüzlülük azalmıştır. Kullanılan ışının dalgaboyu azaldıkça, gönderilen ışın enerjisinin çoğu C-C bağlarını veya C-H bağlarını kırmak için kullanılır. PMMA gibi düşük soğurma katsayısına sahip malzemeler için düşük dalgaboylu (355 veya 266 nm) lazer için sıcaklık etkisi göz ardı edilebilir [1,2].

C-C bağları için ortalama bağ enerjisi yaklaşık 347 kJ/mol ve C-H bağları için yaklaşık 414 kJ/mol dür. Bu bağları kırmak için gerekli olan foton enerjileri sırasıyla 3.6014 eV (dalgaboyu 344 nm) ve 4.2967 eV (dalgaboyu 288 nm)[3]. Bu enerjiler Nd:YAG lazerin harmonikleri ile elde edilebilir.

## YÖNTEM

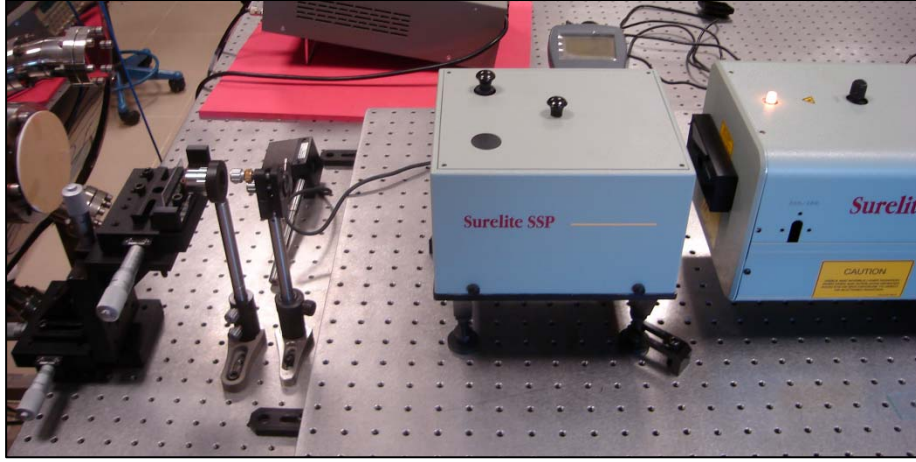
3 mm kalınlığındaki PVC örnekler ve 5 mm×85 mm boyutlarında kesilmiş ve yüzeyleri temiz olacak şekilde deneye alınmışlardır. Deneylerde kullanılan SURELITE CONTINUUM LAZER ile farklı parametrelerde malzeme üzerinde delikler açılmıştır. Deneyde kullanılan Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM)’nde bulunan ve deneysel çalışmada kullanılan 3 Harmoniğe sahip atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri

Özellikler		Değerler
Maksimum Ortalama Güç		10 W
Atım süresi		6 ns
Atım enerjisi	1064 nm	1 J
	532 nm	450 mJ
	355 nm	290 mJ
	266 nm	72.7 mJ
Tepe gücü	1064 nm	167 MW
	532 nm	75 MW
	355 nm	48.3 MW
	266 nm	12 MW
Lazer çıkış demet çapı		9,8 mm

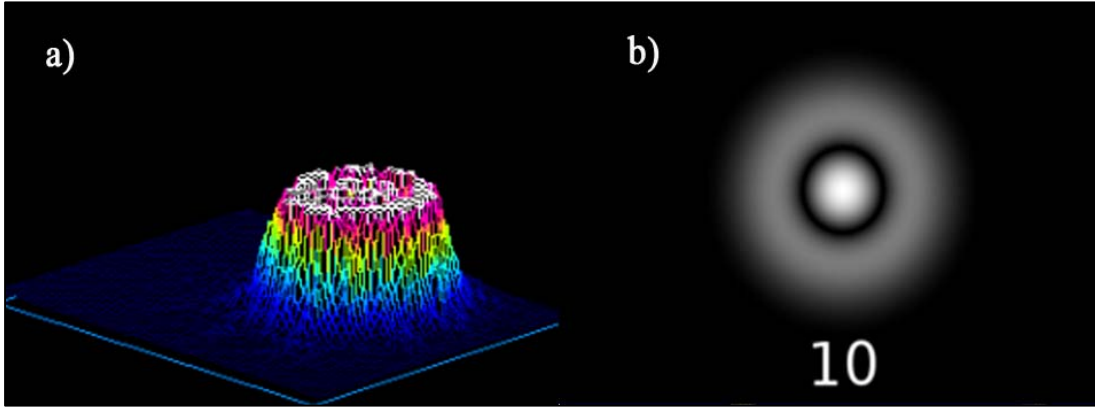
Çalışmada kullanılan lazerin 3 harmoniği bulunmaktadır. 1. harmonik 1064 nm dalga boyuna ışına yaparak, 1.41 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 1 J’ dur. 2. harmonik 532 nm dalga

boyunda ışına yaparak, 1,42 kV' luk gerilimde atım eneji 450 mJ' dur. 3. harmonikte ise 355 nm dalga boyunda ışına yaparak, 1,44 kV' luk gerilimde atım enerjisi 290 mJ' dur. Lazer çıkış demet çapı 9,8 mm olan bu lazer atım süresi 6 ns ve atım tekrarlama oranı 10 Hz' dir. Tetikleme (trigger) sistemi ile atım tekrarlama oranı 1 – 10 Hz aralığına genişletilebilmektedir.



Şekil 1: Atmosfer Basıncılı ortam görünümü

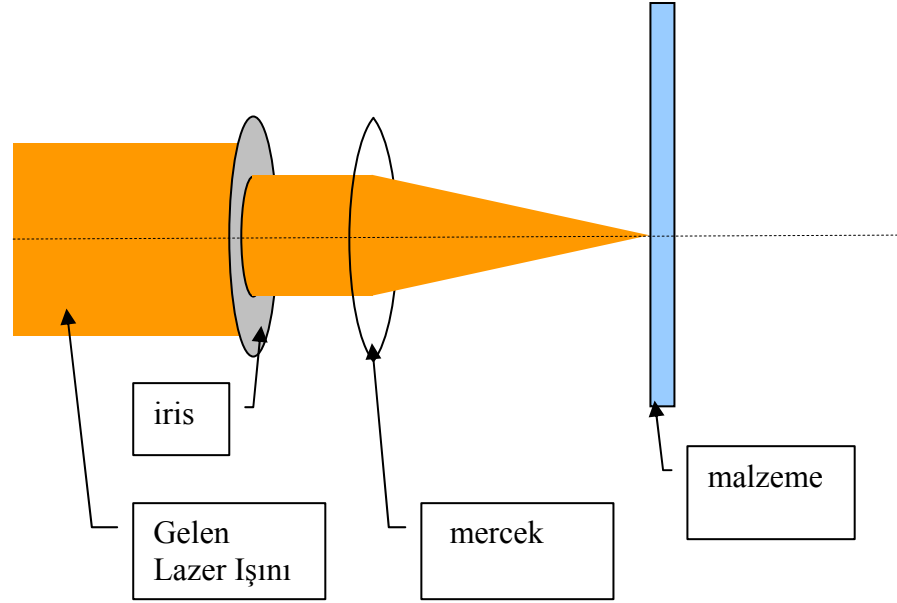
Lazer demetinin boyuna modu, demet şekil belirleyici (LPB serisi NEWPORT) kullanılarak  $TEM_{10}$  olarak belirlendi. Lazer demetinin TEM modu Şekil 2' deki gibidir.



Şekil 2. Lazer mod görüntüsü: a) Lazer demetinin  $TEM_{10}$  modunun demet şekil belirleyici ile elde edilen görüntüsü b) Bir  $TEM_{10}$  modu görüntüsü

Delme işleminde kullanılacak lazerin 1064 nm dalgaboylu temel harmoniğinin enerjisi, ikinci, üçüncü ve dördüncü harmoniklerinden 532 nm, 355 nm ve 266 nm dalgaboylarında elde edilen enerji seviyelerine kadar inemediğinden, yüksek enerjili ışın, bir iris yardımıyla daha azaltılmıştır. Her deney için aynı mercek sistemi kullanılarak lazer ışını malzeme üzerine minimum çapta odaklanmaya çalışılmıştır. Şekil 3' de odaklama sistemi gösterilmektedir. Odaklama sistemini gösteren Şekil 3' de sol taraftan gelen lazer ışını, hem gelen ışının çapını hem de gelen ışının enerjisini azaltmak için iristen geçirilmiştir. Çapı ve enerjisi azalan ışın ilk olarak ince kenarlı merceklerle kalın kenarlı mercek odakları çakışacak şekilde yerleştirilmiş olan mercek sisteminden geçmiştir. Gelen ışının çapı odak uzunluklarıyla orantılı olacak şekilde azaltılmıştır. Daha sonra daha uzun odaklı ince kenarlı bir mercek ile malzeme üzerine

odaklanmıştır. 532, 355 ve 266 nm harmonikleri için enerji lazer uyarma ile ayarlanmıştır. 1064 nm dalgaboyu için ise hem uyarma enerjisi hem de iris ile enerji ayarlanmıştır.



Şekil: Odaklama sistemi.

Deneylerde kullanılan lazerin atım süresi 6 ns olduğundan, 6 ns'lik atımlar malzeme üzerine üst üste gönderilerek malzeme üzerinde kavite olurturulmuştur. Lazer ışını malzeme üzerine gönderildiğinde, lazer ışını ile malzeme arasındaki etkileşim lineer olmadığından atım sayısı malzeme işlemede önemli bir parametredir. Daha önce yapılan çalışmada [9] atım sayısı artırıldıkça delik kavite derinliğinin de artırdığını göstermiştir.

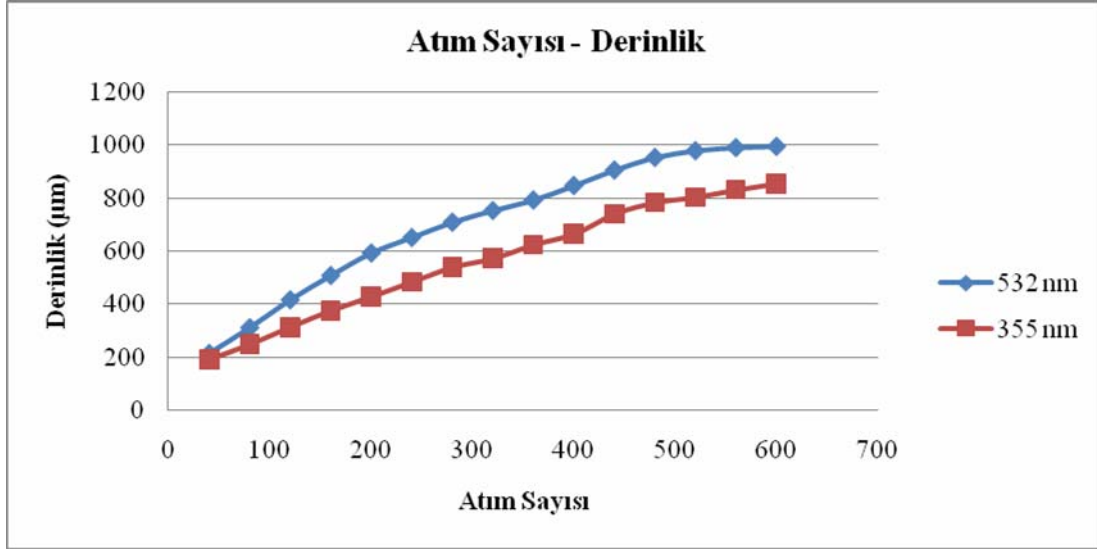
Yapılan bu çalışmada, atım sayısının delik veya kavite üzerine etkisi araştırıldı. 6 ns atım süreli, 532 nm dalgaboylu ışına 40 atımdan başlayarak 40, 80, 120, ..., 600 atım aralığında 5 Hz tekrarlama oranı ile malzeme üzerine gönderilmiştir. Polikarbon malzeme üzerinde yapılan bu ilk çalışmada atım sayısının derinliğe etkisi incelenmiş olup daha sonraki çalışmalara referans kabul edilmiştir. Şekil 4' de görüldüğü gibi atım sayısı arttıkça derinliğin arttığı gözlenmiştir. Derinliğin artması 160 atım sayısından sonra doğrusallığını kaybetmeye başladığından bu atım sayısını sonraki bütün çalışmalarda referans alınmıştır.

Fakat bu artış, malzeme tahliye mekanizmasının fiziksel özelliklerinden ve kavite üzerinde oluşan plazmanın etkisinden dolayı her zaman lineer değildir. Bunun için deneyler atım sayısı ile kavite derinliği ilişkisinin lineer olduğu bölgede yapılmıştır[9].

Deneylerde amaç delik elde etmek değil lazer parametrelerinin kavite üzerine etkisi veya muhtemel elde edilecek deliğin optimum parametrelerinin elde edilmesi olduğundan deneylerde kavite oluşumu istenmiştir.

İlk olarak, 532 nm dalgaboyuna sahip 2. harmoniği ile atım sayısı değiştirilerek, atım sayısının delik derinliğine ve genişliğine etkisi incelenmiştir. Atım sayısı 40 atımdan başlayarak 40'ar atım artırılmıştır. 600 atım da 1 mm kalınlığındaki polikarbon malzeme delindiği için atım sayısı 600 ile sınırlandırılmıştır. Her denemeden üçer tane örnek alınarak sonuçların güvenilirliği ve tekrar elde edilebilirliği ispatlanmıştır. Elde edilen deliklerin

görüntüleri yüksek çözünürlüklü optik mikroskop ile alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen verilerle, atım sayısının delik derinliği ve genişliği üzerine etkisi gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atım sayısı arttıkça deliğin derinliğinin de arttığı görülmüştür. Atım sayı 160 olana kadar atım sayısı-delik derinliği değişiminin lineer olduğu gözlenmiştir. Atım sayısı daha da artırınca lineerlikten uzaklaştığı gözlenmiştir. Lineerlikten uzaklaşma görüldüğü andaki atım sayısı sabit tutulmuştur.



Şekil 4. Atım sayısının derinliğe etkisi. Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ

Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunması için (kontrol edilemeyen faktörler de gözetilerek) deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek optimum şartlar tespit edilir. Bu yaklaşım çerçevesinde yapılan deneyler sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta ise doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasının gerekliliğidir [11].

Genelde yukarıda açıklanan durumlarda uygulanan soru sorma tekniği, her faktörü teker teker ele almak ve her faktörün sistem üzerindeki etkilerini ayrı ayrı tespit etmektir. Ancak böyle bir yaklaşımda faktörler arasındaki etkileşimler gözardı edilmiş olacaktır ve bir faktörün etkisinin değerlendirilmesi sırasında diğer faktörlerin buldukları seviyelerin sonuçlar üzerinde yarattığı etki yanıltıcı olacaktır. Bundan farklı bir yaklaşımla mümkün olan tüm kombinasyonların denenmesi ise yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacak, hatta çoğu kez uygulanması mümkün olmayan bir durumdur. Tüm bunların yanı sıra sadece gerekli deneyleri gerçekleştirmek ve sonuçları değerlendirmek değil, ayrıca sonuçların analizinde uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Çünkü doğal olarak gerçekleştirilecek her deney bir belirsizlik ve hata payı içerecektir [11].

Endüstriyel şartlar göz önüne alındığında hem bu deneyleri ekonomik şartlar ve zamansal kısıntıları gözetenek en verimli şekilde gerçekleştirebilmek, hem de sonuçları doğru yorumlayabilmek için (kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirebilmek için) deney tasarımı



yöntemlerinin uygulaması son derece verimli bir yaklaşımdır. Ayrıca kalite ve verimliliği artırmak amacıyla uygulanan tüm diğer yöntem ve metotları destekleyici, yönlendirici rolü vardır.

Bu modern yaklaşım çerçevesinde Taguchi Deney Tasarımı metodu optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı bir metot olarak ortaya çıkmaktadır.

Metal işleme sanayiinde delme işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Burada sağlanacak performans artışları (proses parametrelerinin optimizasyonu) maliyetlere ve kaliteye kayda değer katkılarda bulunacaktır.

## **TAGUCHİ METODU**

Temel olarak deney tasarımı yöntemleri yüzyıl başında tarımsal araştırmalarda kullanılarak Fischer tarafından geliştirilmiştir [12,13]. Ancak klasik deney tasarım yöntemleri kullanımları endüstriyel şartlar altında verimli ve sağlıklı olmayan yaklaşımlardır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı da çok hızlı şekilde artmaktadır. Genichi Taguchi, kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesindeki verimliliği artıracak bir çözüm getirmiştir [14]. Bu sayede deney öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olmuştur. Taguchi metodu bir deney tasarım tekniği olmanın ötesinde yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir tekniktir. Diğer taraftan deney sayısında elde edilen azalma, faktörler arasındaki etkileşimlerin belirli ölçüde gözardı edilmesinden kaynaklanmaktadır. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal/gürültü oranı değeri küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir.

Hangi S/N oranı değerlendirilmede kullanılırsa kullanılsın, sonuç olarak karşımıza çıkan değerlerde daha büyük olan S/N oranı daha iyi deney sonucunu ifade eder. Böylelikle deneylerde ele alınan faktörlerin seviyeleri içerisinde en yüksek S/N oranına sahip olan değerler en iyi performansı verecektir. Bunun yanı sıra varyans analizi (ANOVA) ile hangi proses üzerinde hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konulur [13]. Hem S/N oranı, hem de varyans analizi yardımı ile de faktörlerin, prosesi optimum performansa ulaştıracak kombinasyonu tespit edilir.

Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirebilmesini sağlaması ve bunun için de tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur [14].

Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir [13].

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanılarak).
2. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi.
3. Doğru dengeli tasarımın seçimi.
4. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi.

5. Deneylerin daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi.
6. Sonuçların analizi.
7. Onama deneylerinin yapılması.

Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için optimum performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve optimum deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir.

Üç değişik faktörden her biri en düşük, en yüksek ve orta değer olmak üzere 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Yapılacak deneylerde incelenilmesi düşünülen faktörler ve seviyeleri Tablo 3’ deki gibi öngörülmüştür.

Tablo 3. Deneylerdeki faktörler ve seviyeler.

		1	2	3	4
A	Dalgaboyu (nm)	266	355	532	1064
B	Enerji (mJ)	10	15	20	25
C	Frekans (Hz)	7	8	9	10

### Sinyal/Gürültü (S/N) oranı

Taguchi Deney Tasarımı metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. Sinyal/gürültü oranının hesaplamasında deneyler sonucunda ulaşılmaması hedeflenen kalite değerinin özelliği de önemlidir. Burada temel üç önemli kategori söz konusudur:

- **düşük değer iyi** (hedef en düşük değere ulaşmaktır)
- **yüksek değer iyi** (hedef en yüksek değere ulaşmaktır)
- **nominal değer iyi** (hedef nominal bir değere ulaşmaktır)

Yapılan araştırmaya söz konusu olan polimer malzeme üzerinde elde edilecek minimum delik çapı olduğu ve en düşük genişlik- derinlik oranının sağlanması istenildiği için deneylerin analizinde “düşük değer iyi” yaklaşımına göre hesaplanan sinyal/gürültü oranı kullanılacaktır [14,15].

Bu yaklaşıma göre S/N oranını hesaplamakta kullanılacak olan denklem:

$$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

şeklindedir.

Tablo 4. Taguchi L16 deney tasarımı.

DENEY	Dalgaboyu (nm)	Enerji (mJ)	Frekans (Hz)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

Her deney için ölçülen genişlik-derinlik oranı değeri üzerinden denklem 1 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları hesaplanır. Denklemde  $y$ , o deney şartlarında ölçülen karakteristik değeri (genişlik- derinlik oranını),  $n$  ise o deney şartlarında yapılan deney sayısını ifade etmektedir [13,14].

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kavitelerin optik mikroskopla alınan görüntüleri Şekil 5 den Şekil 16 ya kadar gösterilmiştir. Şekil 5 den Şekil 16'ya kadar olan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak kavite derinlikleri resimler üzerinden hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 5'de verilmiştir. Oluşan kavitenin genişliğini ölçmek için malzemenin üst tarafından alınan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılmıştır. Şekil 17 den Şekil 28' e kadar olan resimlerde malzeme üzerinde oluşan kavitenin üstten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



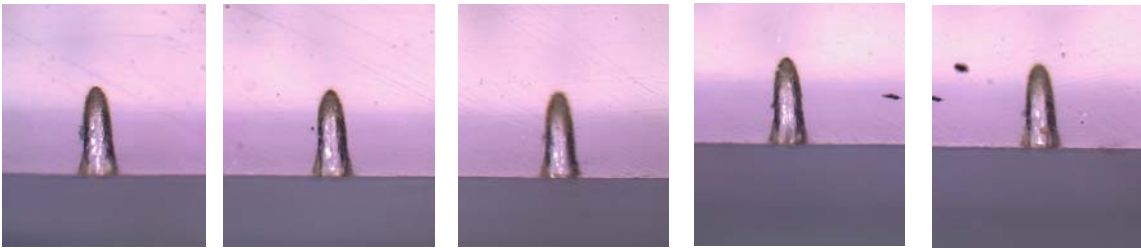
Şekil 5. Tablo 7 de verilen 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 10 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik derinliği 332.80  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



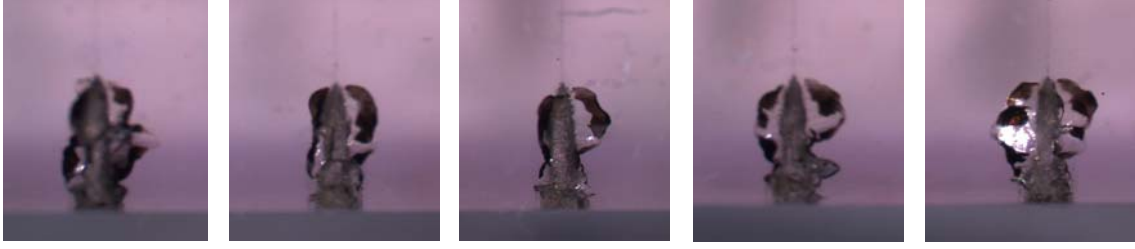
Şekil 6. Tablo 7 de verilen 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 15 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik derinliği 354.22  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



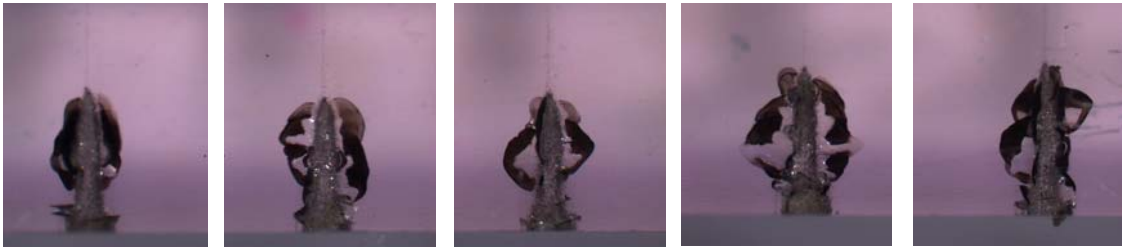
Şekil 7. Tablo 7 de verilen 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 20 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik derinliği 851.26  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Tablo 7 de verilen 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 25 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik derinliği 795.75  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



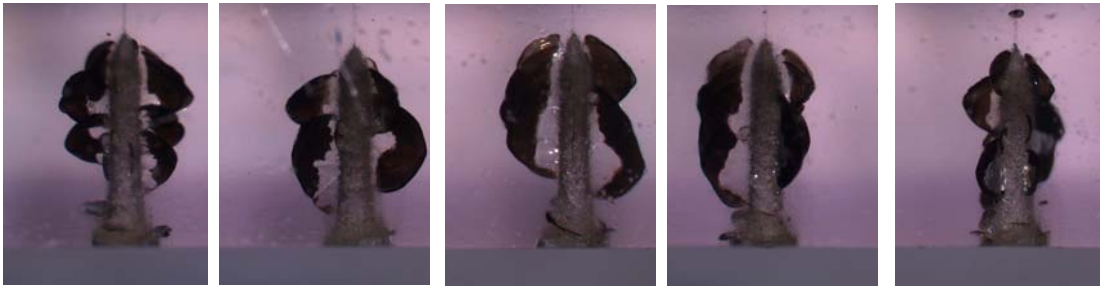
Şekil 9. Tablo 7 de verilen 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 10 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik derinliği 1179.8  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10. Tablo 7 de verilen 10 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 15 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik derinliği 1332.27  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



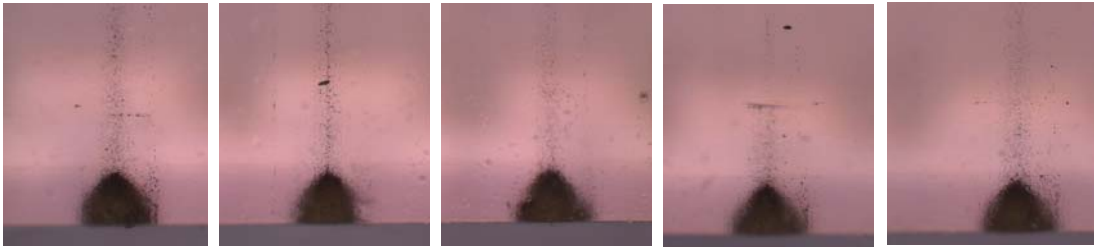
Şekil 11. Tablo 7 de verilen 11 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 20 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik derinliği 1075.2  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. Tablo 7 de verilen 12 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 25 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik derinliği 1924.29  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



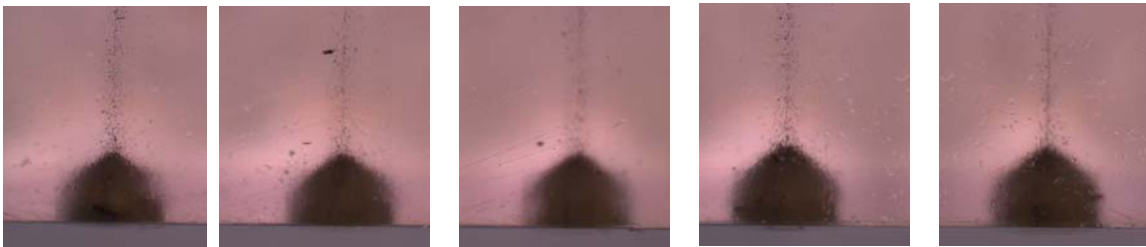
Şekil 13. Tablo 7 de verilen 13 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 10 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik derinliği 417.07  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 14. Tablo 7 de verilen 14 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 15 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik derinliği 161.53  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



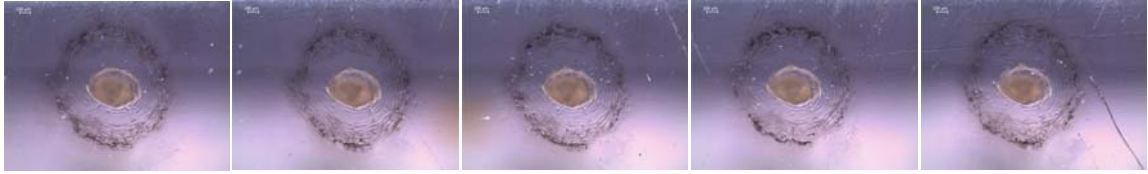
Şekil 15. Tablo 7 de verilen 15 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 20 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik derinliği 484.27  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 16. Tablo 7 de verilen 16 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 25 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik derinliği 692.27  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 17. Tablo 7 de verilen 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 10 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik çapı 307.65  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 18. Tablo 7 de verilen 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 15 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik genişliği 354.89  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 19. Tablo 7 de verilen 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 20 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik genişliği 261.79  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



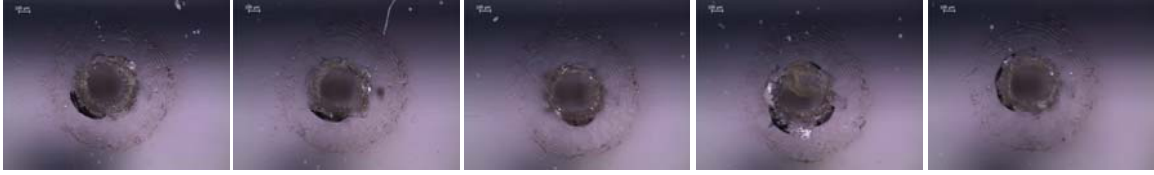
Şekil 20. Tablo 7 de verilen 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 25 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik genişliği 300.20  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



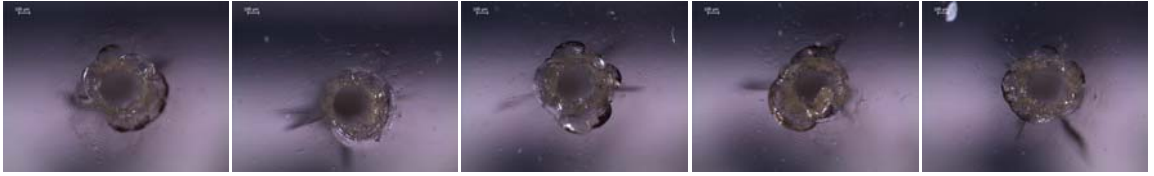
Şekil 21. Tablo 7 de verilen 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 10 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik genişliği 254.98  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Tablo 7 de verilen 10 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 15 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik genişliği 265.82  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 23. Tablo 7 de verilen 11 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 20 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik genişliği 386.37  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 24. Tablo 7 de verilen 12 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 25 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik genişliği 355.90  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 25. Tablo 7 de verilen 13 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 10 mJ, frekans 10 Hz. Ortalama delik genişliği 188.95  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 26. Tablo 7 de verilen 14 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 15 mJ, frekans 9 Hz. Ortalama delik genişliği 238.73  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.





Şekil 27. Tablo 7 de verilen 15 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 20 mJ, frekans 8 Hz. Ortalama delik genişliği 322.03  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 28. Tablo 7 de verilen 16 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 25 mJ, frekans 7 Hz. Ortalama delik genişliği 408.05  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Şekil 5 den Şekil 16'ye kadar olan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak hesaplanan kavite derinlikleri. Hesaplanan en küçük ve en büyük değerler çıkartılarak ortalama alınmıştır.

	DERİNLİK					GENİŞLİK				
	d1	d2	d3	d4	d5	g1	g2	g3	g4	g5
1										
2										
3										
4										
5	262,48	326,40	339,20	339,20	332,80	107,68	320,02	306,29	316,45	300,20
6	348,93	348,80	323,20	361,60	364,92	368,76	361,65	352,51	343,90	350,50
7	844,82	848,02	860,80	892,80	844,95	269,09	258,55	261,08	265,73	257,08
8	838,42	790,46	800,00	796,80	790,40	296,32	300,71	302,74	297,16	306,41
9	1248,00	1161,60	1177,78	1184,02	1177,60	258,03	246,86	250,92	256,00	311,88
10	1328,00	1248,00	1286,40	1382,40	1440,03	263,11	250,92	276,33	258,03	298,67
11	1068,80	995,20	1075,20	1081,60	1097,60	370,81	387,05	416,51	380,95	391,11
12	2000,00	1881,62	1964,86	1926,40	1872,00	392,13	344,38	360,64	361,65	345,40
13	412,80	435,20	377,60	419,20	419,20	198,09	172,70	206,22	167,62	196,06
14	163,56	165,59	158,48	158,48	162,54	213,33	248,89	233,65	233,65	273,28
15	512,00	473,60	489,60	473,60	489,60	310,86	321,02	334,22	299,37	336,25
16	656,00	646,40	678,40	758,40	742,40	416,51	381,97	391,12	416,51	531,75

Tablo 6. Tablo 5 de elde edilen kavite derinliği, kavite giriş genişliği ve derinlik-genişlik oranı.

	derinlik	genişlik	d/g
1			
2			
3			
4			
5	332,80	307,65	1,08
6	354,22	354,89	1,00
7	851,26	261,79	3,25
8	795,75	300,20	2,65
9	1179,80	254,98	4,63
10	1332,27	265,82	5,01
11	1075,20	386,37	2,78
12	1924,29	355,90	5,41
13	417,07	188,95	2,21
14	161,53	238,73	0,68
15	484,27	322,03	1,50
16	692,27	408,05	1,70

Bir sonraki aşamada ise her faktörün her seviyedeki etkisinin ayrıştırılması gerekir. Bunun için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınır. Örneğin enerjinin 70 mJ olduğu birinci seviyeye ait oranı belirlemek için 1, 5, 9, 13 numaralı deneyler için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması alınır.

Tablo 7. Tagucgi L16 Deney Tasarımına göre deney sonuçları ve S/N oranı

FAKTÖR SEVİYELERİ					
	A	B	C		
DENEY NO	Dalgaboyu (nm)	Enerji (mJ)	Frekans (Hz)	Derinlik-Genişlik oranı	S/N oranı dB
1	266	10	7		
2	266	15	8		
3	266	20	9		
4	266	25	10		
5	355	10	8	1.08	-35.193
6	355	15	7	1.00	-34.272
7	355	20	10	3.25	-33.915
8	355	25	9	2.65	-33.396
9	532	10	9	4.63	-32.501
10	532	15	10	5.01	-31.401
11	532	20	7	2.78	-29.597
12	532	25	8	5.41	-21.832
13	1064	10	10	2.21	-36.724
14	1064	15	9	0.68	-36.832
15	1064	20	8	1.50	-34.339

16	1064	25	7	1.70	-31.447
----	------	----	---	------	---------

Tablo 7’de tüm faktörler ve seviyeler için bu şekilde hesaplanmış ortalama sinyal/gürültü oranları verilmiştir. Bunların yanı sıra yapılan toplam 12 deneyin toplam sinyal/gürültü oranı da hesaplanır. Toplam ortalama sinyal/gürültü oranı denklem (2) ile elde edilir.

$$\eta_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek sinyal/gürültü oranı en iyi deney sonucuna, yani kesme kuvvetinin en düşük olduğu deney sonucuna işaret eder. Hesaplanan bu değerler her faktör için ayrı ayrı grafik halinde de gösterilir. Optimizasyon aşamasını sonuçlandırmak için ise hesaplanan sinyal/gürültü oranlarından yola çıkarak varyans analizi gerçekleştirilir.

### VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Varyans analizinde hedeflenen, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerini (kesme kuvvetini) ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını ortaya koyabilmektir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği de test edilir. Bu amaçla öncelikle denklem (3)’e göre sinyal/gürültü oranının toplam değişkenliğini belirten  $SS_T$  değeri (toplam karelerin toplamı) hesaplanır.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (3)$$

Burada;

$\eta_i$  = Ölçülen genişlik-derinlik oranları üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranı,

$\eta_m$  = Ölçülen genişlik-derinlik oranları üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması

$n$  = toplam deney sayısı

$SS_T$  değeri üç faktörün ayrı ayrı her faktörün karelerinin toplamı değerleri ( $SS_A$ ,  $SS_B$  ve  $SS_C$ ) ile hata payının karelerinin toplamı olan  $SS_e$  değerinin toplamından oluşmaktadır. Her faktörün karelerinin toplamının denklem (4) yardımıyla ayrı ayrı hesaplanması sonucu ortaya çıkan değerler Tablo 8’te gösterilir.

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} n_{A_i} * (\eta_{A_i} - \eta_m)^2 \quad (4)$$

$k_A$  = A faktörünün seviye sayısı,

$n_{A_i}$  = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı,

$\eta_A$  = A faktörünün i seviyesindeki S/N oranı,

$\eta_m$  = ortalama S/N oranı

Tablo 8. Taguchi L<sub>16</sub> deney tasarımına göre ANOVA tablosu

A									
Dalgaboyu									
B Enerji									
C Frekans									

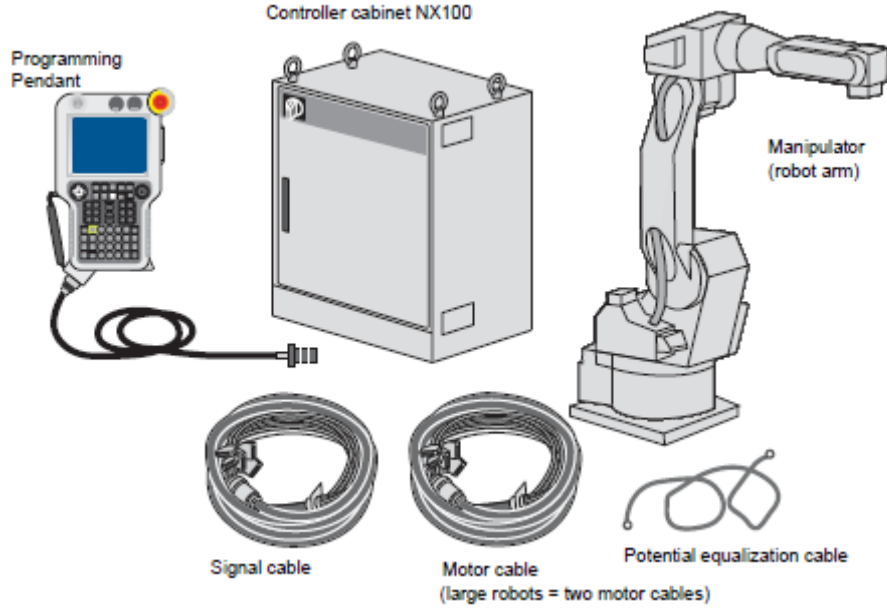
## ROBOT:

Teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişme kaydettiği günümüzde, teknolojinin getirmiş olduğu bu yenilikler insan hayatının bir parçası olmuştur. Bu yeniliklerden insanları haberdar etme ve yenilikleri insanlara sunma bir zorunluluk haline gelmiştir. Globalleşen dünyada iletişimin çok artması insanları değişik dünya pazarlarına yöneltmiştir. Artık kaliteli ürünü daha ucuza imal etmek rekabet piyasasında bir zorunluluk olmuştur. Bu da ancak otomasyon teknolojisini kullanarak üretim yapmakla mümkün olmaktadır [16]

Robotlar genellikle, üretim maliyetini düşürmek ve daha kaliteli üretim yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca insan sağlığının zarar görme riskinin olduğu işlerde (kimyasal enerji, nükleer enerji, çok yüksek ısı, titreşim, yüksek ses v.b) ve insan elinin ulaşamayacağı yerlerde robotlar kullanılmaktadır.

Bir robot, çeşitli işleri yerine getirmek üzere, malzeme, parça veya özel aletleri değişken programlanabilir hareketlerle taşımak üzere tasarlanmış, yeniden programlanabilir, çok fonksiyonlu bir aygıttır. Robot uygulamaları başlıca otomotiv, elektrik, elektronik ve mekanik olmak üzere endüstrinin hemen her alanında görülebilir[17].

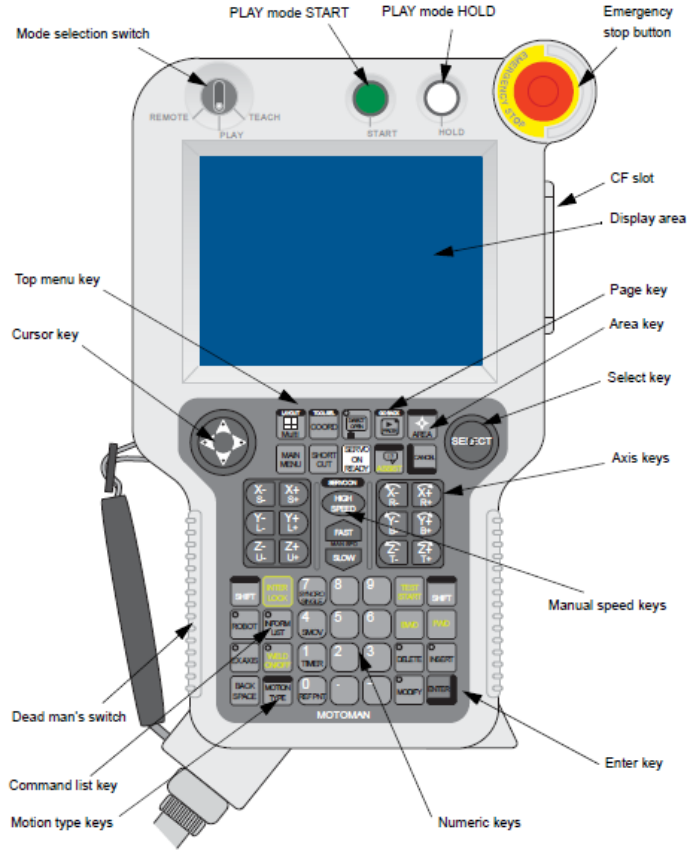
Proje kapsamında alınan MOTOMAN NX100 robot Şekil 28 de gösterilmiştir. Laboratuvarımızda bulunan robotun 6 eksenli bulunmaktadır. Robot 3 temel parçadan oluşmaktadır. Kontrol kabini robotun merkezidir. Güç kaynakları kontrol merkezinin içinde bulunmaktadır. Manüplatör ve Programlama pendant'ı kontrol merkezine bağlıdır. Robot programlama pendantından manuel olarak anlık kontrol edilebileceği gibi pendanta yazılan programlarla da kullanılabilir.



Şekil 28. Proje kapsamında alınan MOTOMAN NX100 robot

Şekil 29. da görülen programlama pendantı (öğretim kutusu) sayesinde robot istenilen noktaya hareket ettirilip bu pozisyonlar hafızaya alınabilir.

Ayrıca öğretim kutusu üzerindeki menüler kullanılarak robot programlarına bir bilgisayarın bulunmadığı yerlerde robotun programlanması ve bütün işlevleri öğretim kutusu kontrolü ile sağlanır. Özellikle pozisyonların belirlenmesi işleminde büyük kolaylık sağlamaktadır. Parça hangi pozisyondan alınacak veya bırakılacak ise bu pozisyonlara gelip pozisyonun koordinatları direk olarak hafızaya alınır ve program içerisinde kullanılabilir. Ayrıca robot kola ait bütün set değerleri öğretim kutusu üzerinden yapılmaktadır. Robot ile kullanıcı arasındaki iletişimi sağlayarak kontrolü kolaylaştırmaktadır [18].



Şekil 29. Programlama pendanti (öğretim kutusu)

Robotun kullanımı için iki gün robotun bulunduğu LATARUM’da eğitim alınmıştır. Eğitim sonunda, Robot koordinat seçimi, 6 eksen robot kontrolü, “home position” lar belirleme, “job” yaratma, yaralılan “job” lar içinde hareket özellikleri (hız, linner hareket dairesel hareket..vb.) belirleme. “Job” içinde “output” sinyali (lazer açma, gaz açma..vb) yollama, robotun 6 eksenine monte edilen “tool” u tanımlama, “tool” hareketi için önceden belirlenen koordinata yönlendirme, “tool” un hareket sırasında pozisyonunu belirleme, ilave koordinatlar tanımlama, birim değiştirme gibi özellikleri öğrenilmiştir. Amaca yönelik bilgi alışverişi “TEKNODROM” firmasından gerekli görüldüğünde alınmaktadır. Lazer kesim kafasının “tool” olarak kullanılması için lazer kesim kafasını robotum ucuna ekleyecek bir adaptör tasarlanmıştır. Bu adaptör sayesinde lazer kesim kafası robotun 6 eksenine monte edilmiştir. Lazer demeti rezanatörden lazer kesim kafasına fiber optik kablo ile taşınabildiğinden lazer ışınının hareket yeteneği, robotun bütün hareket kabiliyetlerine sahip olmaktadır. Ayrıca lazer kaynağı sabit tutulup, robotun 6. eksenine malzeme yerleştirerek, malzemeyi de 6 eksenle hareket ettirilebilmektedir. Bunun için malzemenin tutturulabileceği bir “fixtür” tasarlanması gerekmektedir.

## REFERANSLAR:

1. Tokarev, V., N., Lopez, J., Lazare, “Modelling of High-Aspect Ratio Microdrilling of Polymers With UV Laser Ablation”, Applied Surface Science, 168, 75-78, (2000)
2. Tokarev, V., N., Lopez, J., Lazare, S., Weisbuch, F., “High-Aspect-Ratio Microdrilling Of Polymers With UV Laser Ablation: Experiment With Analytical Model”, Applied Physics A - Materials Science & Processing, 76, 385-396, (2003)
3. Yalukova, O., Sárady, I., “Investigation Of Interaction Mechanisms In Laser Drilling Of Thermoplastic And Thermoset Polymers Using Different Wavelengths”, Composites Science and Technology 66, 1289 – 1296, (2006)
4. Lazare, S., Lopez, J., Weisbuch, F., “High-aspect-ratio microdrilling in polymeric materials with intense KrF laser radiation”, Appl. Phys. A 69 [Suppl.], S1–S6 (1999)
5. Candan, L., Demir, A. and Akman, E., “Effect of Pulsed Nd:YAG Laser Powers On 304 Stainless Steel Welding”, Sixth International Conference of The Balkan Union BPU-6, (2006)
6. Combined Research and Curriculum Development Nontraditional Manufacturing (NTM) - Laser Machining Processes [online], 2007, <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Haziran 2007)
7. Charschan, S., S., “Guide to Laser Materials Processing”, Laser Institute of America, 44-55, (1993)
8. Han, W., “Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging”, Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, (2004)
9. Candan L., “Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler Ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008)
10. Knowles, M. R. H., Rutterford, G., Karnakis, D., Ferguson, A., “Micromachining Of Metals, Ceramics And Polymers Using Nanosecond Lasers”, Int. J. Manuf. Technol. 33:95-102, (2007)
11. Scheffler, E., (1997). Statistische Versuchsplanung und -auswertung, Eine Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, ISBN 3- 342-00366-9, 1-50.
12. Montgomery, D. C., (2001). Design and analysis of experiments, 5th Edition, John Wiley, Wiley & Sons, New York, 1-19.
13. Yang W. H., Tarn Y. S., (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, Journal of Materials Processing Technology, 84, 122- 129.

14. Ross, P. J., (1989). Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, McGraw-Hill International Book Company, ISBN 0-07-053866-2, 1-66, 167-202.
15. Taguchi, G., (1990). Introduction to quality engineering, Asian Productivity Organisation, Japan, ISBN 92-833-1083-7, 97-132.
16. 6. Sosyal Planlama Genel Müdürlüğü “Sanayide Robot Teknolojisi, Uygulaması Ve Önemi”Aralık 1991.
17. Browne et al.1998 Browne, I.W.A., et al. 1998 MNRAS 293, 257 Interferometer phase calibration sources – II
18. Bekir ÇENGELCİ, Hasan ÇİMEN, Endüstriyel Robotlar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2005 (2) 69-78