

Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini

Burhan DUMAN¹, M. Cengiz KAYACAN²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Uluborlu S. Karasoy MYO Bilgisayar Teknolojileri, Isparta

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, Isparta

Özet: Eklemeli İmalat (Eİ) Teknolojilerinden biri olan Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme (DMLS/E), katmanlar halinde metal tozlarını sererek ve lazer ışını ile birleştirerek parça imalatını gerçekleştiren bir yöntemdir. Bu yöntemde, imal edilecek parçanın mekanik özelliklerini etkileyen lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı gibi birçok giriş (işlem) parametresi bulunmaktadır. Belirtilen parametreler donanımın müsaade ettiği ölçüde kontrol edilmekte ve değerleri ayarlanabilmektedir. Giriş parametreleri doğrudan imal edilecek parçanın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Farklı ihtiyaçlar doğrultusunda imal edilecek parçada istenen mekanik özellikler, giriş parametre değerlerinin değiştirilmesi ile ayarlanabilmektedir. En uygun değerde giriş parametrelerinin seçilmesi ile de çok iyi mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Çalışmada, girilen işlem parametre değerlerine göre imal edilecek parçanın mekanik özelliklerini tahmin etmek amacıyla bir Bulanık Mantık modeli oluşturulmuştur. Böylece, mekanik özellikleri tespit etmek için araştırmacıların makina üzerinde çok sayıda gerçek denemeler yapması gerekmeden işlem parametrelerinin değerleri belirlenebilecek, zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS), Seçmeli Lazer Ergitme (SLE), Bulanık Mantık (BM), Mekanik Özellikler

Predicting The Mechanical Properties Of The Part Produced By Direct Metal Laser Sintering/Melting Method

The Direct Metal Laser Sintering/Melting (DMLS/M) which is one of the Additive Manufacturing (AM) technologies, is a method through which direct parts are manufactured by spreading a layer of metal powder and combining them through the laser beam. There are lots of input (process) parameters that affect the mechanical properties of the part to be manufactured by this method such as laser power, scan speed, hatching distance and layer thickness. These parameters are controlled and adjusted as long as the hardware allows. The input parameters affect the mechanical properties of the part to be manufactured directly. The desired mechanical properties of the part to be manufactured in line with different requirements can be adjusted by changing the values of input parameters. In the study, a Fuzzy Logic model has been created allowing to predict the mechanical properties of the part to be manufactured according to the process parameter values. Thus, it will be possible to determine the operation parameter values without requiring many real trials on the machine by the researchers which means saving in time and money.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting, Fuzzy Logic, Mechanical Properties

1. Giriş

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan eklemeli imalat (Eİ) teknikleri, 80'li yılların sonlarına doğru gelişmeye başlamıştır. Bu teknik, başlangıçta prototip yapmak için kullanıldığından "Hızlı Prototipleme" adıyla anılmıştır (UT, 1883). Sonraları 90'lı yıllarda hızlı prototipleme sistemlerindeki gelişmelerle prototip yapmak amaçlı kullanımının yanında son kullanım doğrudan fonksiyonel parçaların imalatında kullanılmaya başlanması ile "prototip" kelimesinin yerini "imalat" almıştır (Yarkınoglu, 2007; Kochan vd., 1999; Sofu, 2006).

1989-1990 yıllarında Teksas Üniversitesinde Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) için başlayan araştırmalar 1990'ların başlarında pek çok enstitünün bu konuda çalışmaları ile devam etmiştir (Shellabear vd., 2004). 1990'ların başlarında Katolik Leuven Üniversitesinde (Belçika) metal sinterleme makinesi geliştirilmiş (CUL, 1425) ve 1995'de Fraunhofer İmalat Teknolojileri Enstitüsünde de deneysel amaçlı doğrudan metal ergitme yapan lazer sinterleme tipi cihaz imal edilmiştir (Das, 2003; Casalino vd., 2015).

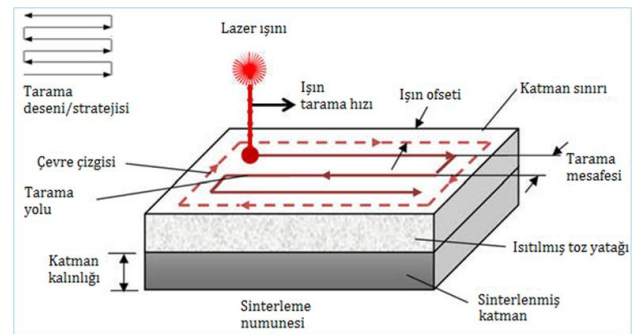
Özellikle metal parçaların eklemeli imalatında, son kullanıma uygun imalat yöntemlerinin başında Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/E) yöntemi gelmektedir. SLS/E tekniğinde, ısıtıldığında kaynaşabilen toz halindeki bir inşa hammaddesi ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılarak yüzeydeki seçilen bölgeler lazer ışınıyla taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda oluşan sıcaklıkla toz malzeme kısmen eriyerek veya sinterlenerek temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır. Bu işlemden sonra inşa zarfının tabanında bulunan platform, bir katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Her katmanın inşası için bu işlemler gerektiği kadar (katman sayısına) tekrarlandıktan sonra, inşa süresince doğal bir destek görevi üstlenmiş olan serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile manuel

olarak temizlenerek imal edilen parça inşa zarfından alınır (Deckard, 1989; King ve Tansey, 2002; Partee vd., 2006; Neğiş, 2014).

SLS/E işleminde lazer enerji kaynağı olarak genellikle Fiber lazer, Karbon dioksit (CO₂) lazer ve Neodmiyum:Yttrium-alüminyum-garnet (Nd:YAG) lazer; inşa kabini içerisindeki atmosferik ortamın sağlanmasında koruyucu gaz olarak da Azot ve Argon kullanılmaktadır (Wen vd., 2014)

SLS/E yöntemi ile çok karmaşık geometri ve küçük parçaların imal edilebilirlik kısıtlarının ortadan kaldırılmasında istenilen hedefe çok yaklaşılmaktadır. Ayrıca bu yöntemle imal edilen parçalardaki mekanik özellikler geleneksel yöntemlerle imal edilen parçalardaki mekanik özellikler ile kıyaslandığında aynı değerlere ulaşıldığı ve hatta bu değerlerden büyük olduğu da görülmektedir (Song vd., 2014).

SLS/E ile metal parça imalatında birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, giriş ve çıkış parametreleri adı altında ikiye ayrılabilir. Giriş parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, tarama deseni (stratejisi), katman kalınlığı, imalat atmosferi ve toz karakteristiği olarak belirtilebilir. Çıkış parametreleri ise bağıl yoğunluk, sertlik, yüzey kalitesi, dayanım, metalurjik yapı, şekil ve boyut doğruluğu gibi parametrelerdir (Klocke vd., 2003; Chatterjee vd., 2003). Giriş parametrelerinin bazıları şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Giriş parametrelerinin şematik gösterimi (Senthilkumaran vd., 2009'dan uyarlama)

Çalışmalarda en etkili işlem parametresi olarak, enerji yoğunluğu belirtilmektedir. Aslında enerji yoğunluğu; lazer gücünün, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı parametrelerine oranı ile ifade edilmekte ve Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır (Kruth vd., 2005);

$$E = P / (v.s.t) \quad (1)$$

Eşitlikte; E enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (Watt), v tarama hızını (mm/s), s tarama mesafesini (mm), t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

SLS/E süreci ile üretilen bir parçanın performansı sinterleme/ergitme olgusunu ve işlem için gerekli enerji yoğunluğunun miktarını etkileyen parametrelerin tam bir kontrolünü ve optimizasyonunu gerektirmektedir. Bu nedenle, çeşitli toz malzemeler kullanılarak işlem parametrelerini en iyilemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

İşlem parametrelerinin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk gibi nihai ürün çıkış özellikleri üzerine etkilerini araştıran çalışmaların özeti alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

Bağlı Yoğunluk

İmal edilen parçanın bağlı yoğunluğu ile mekanik dayanım, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü pozitif olarak ilişkilidir (Casalino vd., 2015). SLS/SLE tarafından işlenen demir tozlarının sinterleme/ergitme yoğunluğu, lazer ışınının enerji yoğunluğuna bağlıdır. Belirlenecek olan en uygun enerji yoğunluğunu sağlayan işlem parametreleri ile imal edilen parçada, %100'e çok yakın göreceli yoğunluk elde edilmektedir (Kempen vd., 2011; Laohaprapanon vd., 2011; Yang vd., 2012; Jia ve Gu, 2014). Morgan vd. (2004), çalışmalarında darbe ve sürekli mod lazer kullanarak 316L paslanmaz çelik tozundan %87 yoğunlukta (100mm/s tarama hızı, 80W lazer gücü, 75 µm tarama

mesafesi, sürekli mod 100µm ışın çapı) numuneler elde etmişlerdir. Tarama hızı arttıkça yoğunluğun azaldığını ve tarama mesafesinin 25, 50, 75µm değerlerine göre yoğunluğu çok az etkilediğini belirtmişlerdir. Jia ve Gu (2014), çalışmalarında Inkonel 718 tozu için enerji yoğunluğu artışının parçanın göreceli yoğunluğunu yüzde yüz' e yakın bir seviyeye getirdiğini bildirmişlerdir.

Sinterleme/ergitme yoğunluğunu etkileyen bir başka faktör de lazer tarama desenidir. Tarama vektör uzunluğu 10mm'den 60mm'ye arttırıldığında %6 daha düşük bağlı yoğunluk elde edilmiştir (Simchi, 2006). SLE cihazında 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V tozlarında Lazer yeniden-ergitme yöntemi ile imal edilen numunelerde, sadece ergitme ile imal edilenlere göre önemli ölçüde yoğunluk artışı elde edilmiştir (Yasa ve Kruth, 2011; Yasa vd., 2011).

Wang vd. (2014), SLE yöntemi ile argon, nitrojen ve helyum atmosferinde Al-12Si tozundan çekme numuneleri imal etmişlerdir. Atmosferin parça yoğunluğunu veya sertliğini etkilemediği sonucuna ulaşılmış ve bütün parçalarda %97 üzerinde bağlı yoğunluk elde edilmiştir.

Bazı çalışmalarda, parçada gözeneklilik (porozite) oluşturma amaçlanmıştır. Gözeneklilik, yoğunluk ile doğrudan ilişkilidir ve ters orantılıdır. Eğer bir parça tam yoğun ise burada gözeneklilik yoktur denilebilir. İmalatta gözeneklilik elde etmek için ise yoğunluğun tam tersi parametre değeri kullanmak gerekir. Yapılan bir çalışmada, tarama hızı geçişli olarak değiştirildiğinde gözenekliliğin de değiştiği görülmüştür. Lazer gücü, tarama mesafesi ve katman kalınlığı sabit tutulduğunda, tarama hızı arttıkça gözeneklilik de artmıştır (Li vd., 2010).

Yüzey Pürüzlülüğü

İyi bir yüzey kalitesi için lazer gücü, lazer ışın odak çapı, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı, tarama stratejisi gibi giriş

parametrelerinin daha iyi bilinmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir (Kempen vd., 2011; Calignano vd., 2013; Song vd., 2014; Erzincanlı ve Ermurat, 2014).

Joo vd. (2010), takım çeliği tozu kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında, güç artışı ya da katman kalınlığının azaltılması ile tarama çizgi kalınlığının azaltılmış olduğunu ve çizgi yüzey kalitesinin tarama hızı optimizasyonu ile iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Optimize edilmiş şartlarda katman kalınlığı 0.1mm, güç 200W, tarama hızı 146.4mm/s' dir ve bu şartlarda çizgi genişliği 0.177mm gerçekleşmiştir.

Yüzey kalitesi üzerinde önemli etkenlerden biri de enerji seviyesidir. Sinterleme sırasında tarama hızı aynı zamanda enerji seviyesi miktarına karar vermekte ve dolayısıyla parçanın yüzey kalitesine katkıda bulunmaktadır (Calignano vd., 2013). Daha düşük lazer gücü ve daha yüksek tarama hızı değerleri kullanılması durumunda gözenekli bir yüzey elde edilmektedir (Bineli vd., 2011). Ayrıca lazer gücünün artırılması ile de yüzey pürüzlülüğünde artma görülmektedir (Erzincanlı ve Ermurat, 2014). SLS işleminde tarama mesafesi, imal edilecek parçaların da yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Calignano vd., 2013). Tarama mesafesinin azaltılması ile oldukça dalgalı yüzeyden pürüzsüz bir yüzeye aşamalı geçiş oluşmaktadır (Simchi ve Pohl, 2003).

316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V tozları ile Lazer yeniden-ergitme stratejisi ile, hem yüksek tarama hızı (640mm/s) ve yüksek lazer gücünde (256W) hem de orta tarama hızı (320mm/s) ve orta lazer gücünde (128W) pürüzlülük değerlerinde %90 oranında gelişme olmuştur (Yasa vd., 2011). Bir başka çalışmada, lazer yeniden-ergitme ile bir kişisel diş protezi, %99'a kadar yoğunlukta yüksek dayanım ve yüzey kalitesi ile imal edilmiştir (Yang vd., 2012).

Yüzey kalitesini etkileyen bir başka faktör de imalat yönü' dür. İmalat yönü boyutsal hata

ve yüzey pürüzlülüğü açısından parça kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hatalı parça yönü ve katman kalınlığı DMLS parçalarında merdiven basamağı etkisine neden olur ve pürüzlü yüzey imalatına yol açar (Delgado vd., 2012; Calignano vd., 2013). Yüzeyin pürüzlü olması, boyutsal hassasiyette azalma oluşturması sebebi ile parça kalitesinde azalma meydana getirmektedir (Tumer vd., 1996).

Çekme dayanımı

SLS/E işleminde lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi gibi giriş parametreleri imal edilen parçadaki dayanımı etkilemektedir. Fakat inşa yönünün mekanik özellikleri etkilemediği bildirilmiştir (Delgado vd., 2012). Lazer gücü ve tarama hızı gibi SLE işlem parametreleri, demir tozlarından imal edilen parçaların yoğunluğunu, üst yüzey morfolojisini, yatay kesit mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Sabit lazer gücünde (100W) artan tarama hızı (0.27m/s'den 0.4m/s' ye) çekme dayanımını ve akma dayanımını artırmıştır. Tarama hızının 0.4m/s değerinde çekme dayanımı 354MPa' dan 412MPa'ya ve akma dayanımı 246MPa' dan 305MPa'ya yükselmiştir (Song vd., 2014). Lazer gücü (100W), tarama mesafesi (0.1mm) ve katman kalınlığın (0.06mm) sabit tutulduğu durumda tarama hızının 90mm/s olduğu değerinde çekme dayanımı 650MPa iken tarama hızı 180mm/s' ye artırıldığında ise çekme dayanımı 50MPa' ya düşmüştür (Li vd., 2010).

Yapılan çalışmalar dikkate alındığında, işlem parametrelerinin en uygun değerlerinin seçilmesi durumunda SLS/E işlemi ile imal edilen bir parçadaki en iyi dayanım elde edilebilecektir. Yang vd. (2012), çalışmalarında SLE işlem parametrelerinin en uygun değerlerinde (lazer gücü 120W, tarama hızı 200mm/s, P/v 0.6 J/mm) imal edilen parçaların, dışılık alanındaki üretimin gereksinimlerini karşıladığını ve döküm parçalarından daha iyi mekanik özelliklere (dayanım ve sertlik) sahip olduğunu bildirmiştir. Döküm ile imal edilen parçanın

çekme dayanımı 480MPa, mikrosertliği 220HV durumunda iken SLE ile imal edilen parçanın çekme dayanımı 636MPa, mikrosertliği 265HV elde edilmiştir.

Sertlik

SLS/E yöntemi ile imal edilen parçalarda sertlik özelliği diğer özelliklerde de olduğu gibi lazer gücü, tarama mesafesi ve tarama hızı ile kontrol edilebilmekte ve bağlı yoğunlukla doğru orantılı olmaktadır. Bertol vd. (2010), lazer gücünü 195W'da sabitlenmiş ve bazı işlem parametrelerini (tarama mesafesi 0.05mm, 0.075mm, 0.1mm; lazer tarama hızı 50mm/s ve 100mm/s) en iyi mekanik özellikler elde etmek için kombine etmişlerdir. Parametrelerin kombinasyonu ile imal edilen modellerde en iyi sonuç (%97.6 yoğunluk ve 515HV sertlik), tarama mesafesi 0.05mm ve tarama hızı 50mm/s seçildiğinde elde edilmiştir. Başka bir çalışmada lazer gücü 120W değerinde sabit iken tarama hızı değerlerinin 200, 400, 600, 800mm/s olarak denenmesi sonucunda tarama hızı 200mm/s değerinde imal edilen parçaların mikro sertliği 265HV olarak elde edilmiştir. Bu değer in döküm ile imal edilen parçanın sertliğinden (220HV) yüksek olduğu bildirilmiştir (Yang vd., 2012).

Laohaprapanon vd. (2011), çalışmalarında, SLE ile 316L paslanmaz çeliğin işlenmesini araştırmışlardır. Deneylerden, düzgün izler üretecek en iyi işlem parametreleri elde edilerek, bu en iyi işlem şartları ile işlenen iş parçası kalite karakteristiği 220 ± 6 HV (94-96HRB) sertlik ile gösterilmiştir. Bir başka çalışmada, en iyi parametrelerle inkonel-718 malzemedan imal edilen tam yoğunlukta parçalarda, mikro sertlik ortalama değeri 395.8HV elde edilmiştir (Jia ve Gu, 2014).

Literatür çalışmalarından da anlaşılacağı üzere SLS/E yönteminde işlem parametrelerinin en iyisini bulmaya yönelik deneyler ve testlerin yapıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fakat SLS/E işlem parametrelerinin tahminine yönelik ise çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Çok çeşitli

mühendislik alanlarında işlem parametrelerinin tahmini akıllı yöntemler kullanılarak yaptırılılabilmektedir.

Akıllı yöntemler

Akıllı sistemler, eldeki verileri veya uzman bilgilerini kullanarak karmaşık problemleri çözmek için oluşturulmuş bilgisayar destekli karar verme mekanizmalarıdır. Akıllı sistemler; bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar gibi yapay zekâ tekniklerini içermektedir. Bu teknikler özellikle tahmin (Shahin, 2016; Ali vd., 2015; Ramesh vd., 2004), kontrol (Jamal ve Syahputra, 2016) ve optimizasyon (Fister vd., 2013) işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Farklı imalat ve işleme yöntemlerinde giriş-çıkış parametrelerinin tahminine yönelik çalışmalarda genetik programlama (Brezocnik vd., 2004), gen ifadeli programlama (Taylan ve Kayacan, 2011), bulanık mantık (Taşdemir vd., 2011), yapay sinir ağları (Parmar ve Makwana, 2012) ve genetik algoritma (Gholaminezhad vd., 2016) gibi yöntemler kullanılmıştır.

Bu yöntemler içerisinde, işlem parametrelerinin tahmininde yaygın olarak kullanılanlardan birisi de ilk olarak Lütfi Aliasker Zade tarafından 1965' de ortaya atılan bulanık mantıktır (Zadeh, 1965). Bulanık mantık, giriş-çıkış işlem parametreleri arasında doğrusal olmayan karmaşık bağlantıların olduğu durumlarda kullanılabilir.

Hossain vd. (2016), lazer ışını ile işlemede giriş parametrelerine göre son ürünün CO₂ lazer kesmedeki çap genişliği tahminini yaptırmışlardır. Çalışmada, tahmin işlemi bulanık mantık modeli ile gerçekleştirilmiştir. Barzani vd. (2015), çalışmalarında işlenmiş Al-Si-Cu-Fe döküm alaşımının yüzey pürüzlülüğünün tahmini için bulanık mantık modeli kurmuşlardır. Yalçın vd. (2007), mermer kesme testerelerinde oluşan kesme kuvveti değerleri

tahminini bulanık mantık metoduyla yapmışlardır. Bir başka çalışmada, ferromangan tozu ile alaşımlandırılan döküm bakır alaşımının aşınma karakteristiğinin bulanık mantıkla modellenmesi gerçekleştirilmiştir (Özel vd., 2008)

Önceki çalışmalarda SLS/E işlem parametrelerinin belirtilen bir değeri için imal edilecek parçada oluşacak çıkış özelliklerinin tahminine yönelik az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Garg vd. (2014), çalışmalarında SLS için parametre tahmini ve uygun işlem parametresi bulmaya yönelik deneysel modelleme tekniklerinin uygulamalarını tablo olarak vermişlerdir. Tabloda belirtilen çalışmalarda geri yayılım ile ileri beslemeli sinir ağı (BP-NN), regresyon ve varyans analizi (ANOVA) teknikleri kullanılmıştır.

Ning vd. (2004), çalışmalarında akıllı parametre seçimine yönelik geri yayılım ile ileri beslemeli sinir ağı öğrenme algoritmasını kullanan bir sistem önermişlerdir. Geliştirilen sistem işlem parametrelerini içeren en uygun parametre ayarlarını belirleyebilmekte ve farklı süreç gereksinimlerine göre oluşturulmuş veri tabanından otomatik olarak sonuç özelliklerini tahmin edebilmektedir. Çalışmada bakır alaşım tozu için işlem zamanı, dayanım, boyut doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğü %ağırlık olarak seçilerek; lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı parametre değerlerinin tahmini yaptırılmıştır.

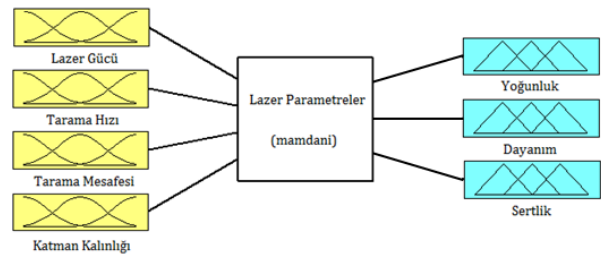
Bu çalışmada, SLS/E işlem parametre değerlerine göre 316L metal tozundan imal edilecek parçanın mekanik özelliklerini tahmin etmek amacıyla bir Bulanık Mantık modeli oluşturulmuştur. Modelin oluşturulmasın kullanılan veriler SLS/E cihazlarında 316L paslanmaz çelik tozu ile yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı değerleri modele girilerek; imal edilecek parçada

oluşacak bağıl yoğunluk, çekme dayanımı, sertlik değerlerinin tahmini yaptırılmıştır. İmal edilecek parçada, istenen mekanik özellikleri elde etmeye yönelik işlem parametrelerinin belirlenmesi için bir dizi denemeler yapılmakta ve bunun sonucunda parametrelere karar verilmektedir. Bunun dışında SLS/E cihazı üreticileri kullanıcılara, kendi belirlemiş oldukları en iyi işlem parametrelerine göre imalatı mümkün kılmışlardır. SLS/E cihazlarında verilen parametreler ile imalatta, parçanın çıkış özellikleri her zaman üreticinin katalog değerleri ile uyuşmamakta ve bunun için akademik çalışmalarda farklı parametrelerin denenmesi ihtiyacı doğmaktadır. Araştırmacıların çalışmalarındaki farklı gereksinimlerini karşılamak için de çeşitli işlem parametrelerinin kullanılması gerekliliği kaçınılmaz bir durumdur.

Belirtilen nedenlerle çalışmada, 316L metal tozundan imal edilecek parçaların mekanik özelliklerini tespit etmek için araştırmacıların makine üzerinde çok sayıda gerçek denemeler yapmasını en aza indirmek ve imal edilecek parçada farklı mekanik özellikler elde etmek için kullanılacak işlem parametrelerinin değerlerini yaklaşık olarak belirleme amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın amacına yönelik olarak, işlem parametrelerine göre mekanik özelliklerin tahmini için Matlab R2008a programında bir bulanık mantık modeli oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. İşlem parametrelerinin tahminine yönelik kurulan bulanık mantık modeli şematığı

Genel olarak bir bulanık mantık modelinin aşamaları; bulanıklaştırma, kural değerlendirme, kümeleme, durulama ve net çıktılar elde edilmesidir (Dereli vd., 2010). Çalışmada, bu aşamaların uygulanması aşağıda belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen bulanık mantık modelinde lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı giriş değişkenleri olarak; parça yoğunluğu, dayanım ve sertlik çıkış değişkenleri olarak belirlenmiştir. Belirtilen giriş ve çıkış değişkenlerinin kaç üyelik fonksiyonundan oluştuğu ve kural tabanı oluşturulurken değerlendirmeye alınan en düşük-en yüksek değer aralıkları Çizelge 1 ve 2' deki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Giriş değişkenlerinin kural tabanı için değerlendirilmeye alınan en düşük-en yüksek değer aralıkları

	Lazer Gücü (Watt)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Mesafesi (ışın çapının %)	Katman Kalınlığı (µm)
seviye1	50-90	50-100	%25-%50	25-50

seviye2	90-130	100-400	%50-%75	50-75
seviye3	130-175	400-700	%75-%100	75-100
seviye4	175-225	700-1000		

Çizelge 2. Giriş değişkenlerinin kural tabanı için değerlendirilmeye alınan en düşük-en yüksek değer aralıkları

	Yoğunluk (%)	Dayanım (Mpa)	Sertlik (HRB)
seviye1	60-65	150-300	70-75
seviye2	65-70	300-450	75-85
seviye3	70-75	450-550	85-95
seviye4	80-85	650-800	95-105
seviye5	85-90		
seviye6	90-98		
seviye7	98-99,9		

Her bir değişkenin üyelik fonksiyonları için sözel olarak farklı seviyeler kullanılmıştır. Bu seviyeler giriş değişkenlerinde “düşük”, “normal”, “orta”, “yüksek”, “çok yüksek” gibi ifadelerle, çıkış değişkenlerinde de “s1”, “s2”, “s3” gibi ifadelerle kodlanmıştır. Modelde kullanılan üyelik fonksiyonları değer aralıkları ve parametrelerin birbiri arasındaki ilişkiler SLS/E cihazlarında 316L paslanmaz çelik tozu ile yapılmış deneysel çalışmalara göre belirlenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. SLS/E cihazında 316L paslanmaz çelik tozu ile yapılmış çalışmalarda kullanılan giriş ve çıkış parametreleri

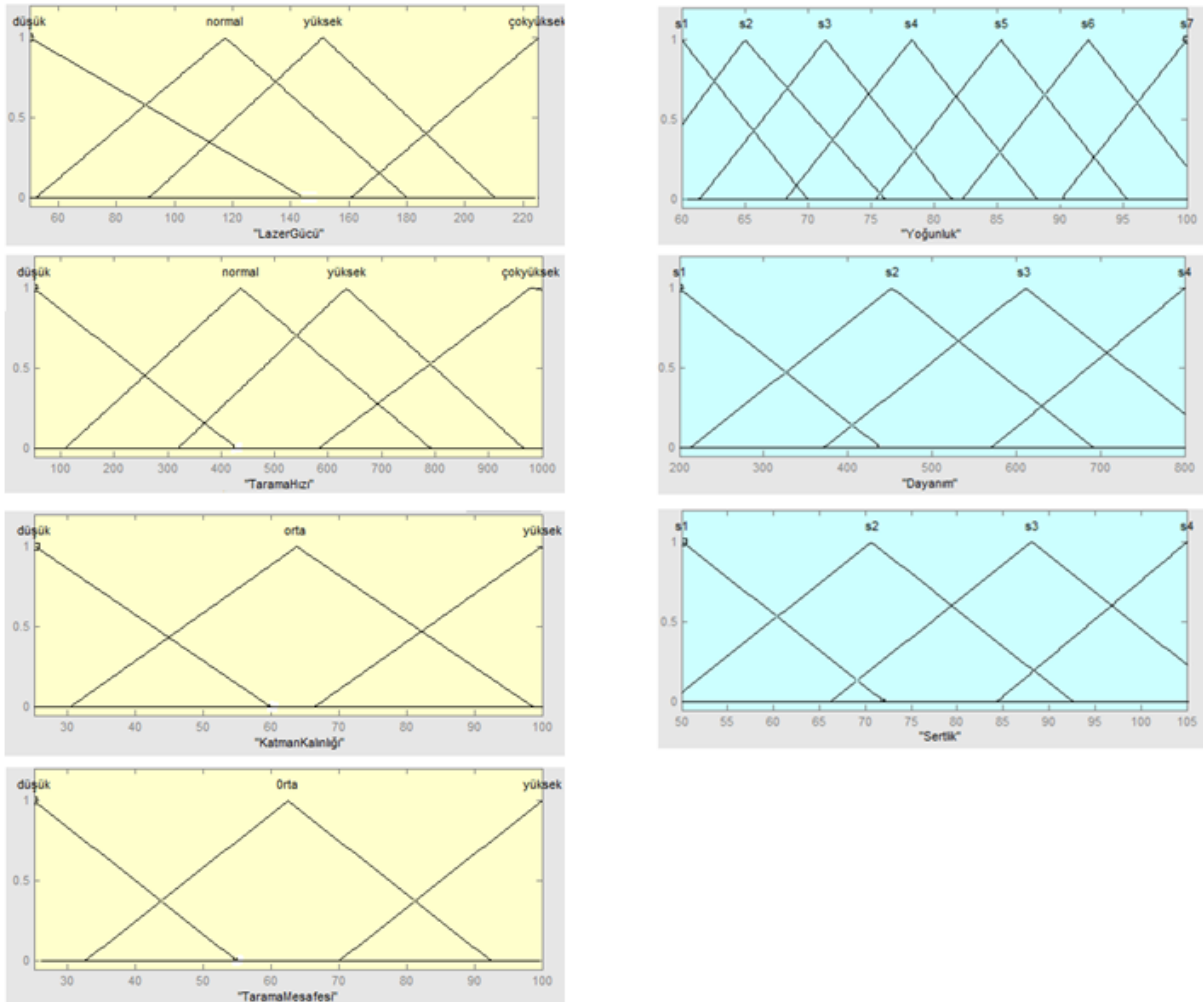
	Giriş Değişkenleri					Çıkış Değişkenleri		
	Lazer gücü	Tarama hızı	Tarama mesafesi	ışın çapı	Katman Kalınlığı	Yoğunluk	Sertlik	Dayanım
Yasa vd., 2011	x	X	x		x	x		
Kiran, 2011	x	X	x	x	x		x	x
Yang vd., 2012	x	X	x	x	x	x	x	x
Morgan vd., 2004	x	X	x	x	x	x		
Delgado vd., 2012	x	X	x		x		x	x
Delgado-Kruth	x	X					x	x
Delgado-Meier ve Haberland	x	X			x			x
Delgado-Li vd.								x
Spierings vd., 2009	x	X	x	x	x	x		
Simchi, 2006	x	X	x	x	x	x		
Razvan vd., 2011	x	X		x	x	x		
Sun vd., 2014	x	X	x	x	x		x	
Spierings vd., 2013	x	X	x	x	x			x
Li Vd., 2010; Li Vd., 2011	x	X	x	x	x	x		x
Yadroitsev vd., 2009	x	X	x	x	x			x
Laohaprapanon vd., 2011	x	X	x		x	x	x	
Yadroitsev ve Smurov, 2010	x	X	X	x	x			x

Bulanık mantık modelindeki giriş parametreleri üyelik fonksiyonlarının sayıları ve ayak genişlikleri ile çıkış parametreleri üyelik fonksiyonlarının sayıları ve ayak genişlikleri Şekil 3.' de gösterilmiştir. Modeldeki parametrelerin üyelik fonksiyon tipi üçgen olarak seçilmiştir. Farklı üyelik fonksiyon tipleri de (gauss, gbell, sig) denenmiş fakat uzman görüşünü yansıtan en doğru yüzey grafikleri üçgen tipinde elde edilmiştir.

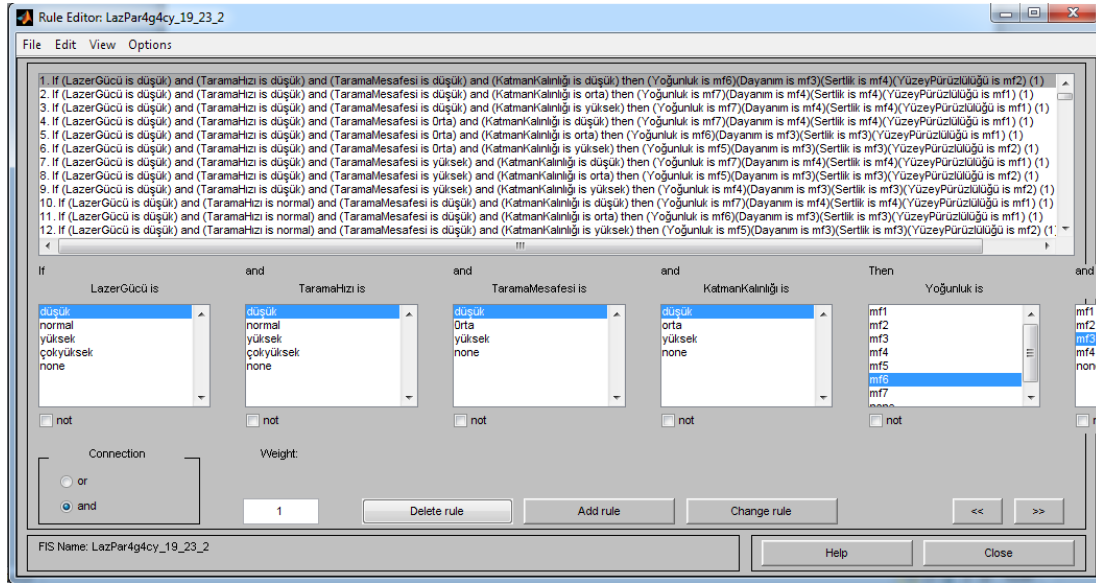
Literatürden edinilen bilgilere ve uzman görüşüne dayalı olarak, giriş-çıkış parametrelerinin birbirlerine etkilerini belirleyen toplam 159 kural yazılarak kural

tabanı oluşturulmuştur. Kural tabanı oluşturulurken, işlem parametrelerinin çıkış özelliklerine etkisi hem ayrı ayrı hem de hacimsel enerji yoğunluğu olarak dikkate alınmıştır. Çünkü birçok çalışmada işlem parametreleri enerji yoğunluğuna göre ayarlanmaktadır. Oluşturulan kural tabanı Matlab programı fuzzy arabirimine (Şekil 4) girilmiştir.

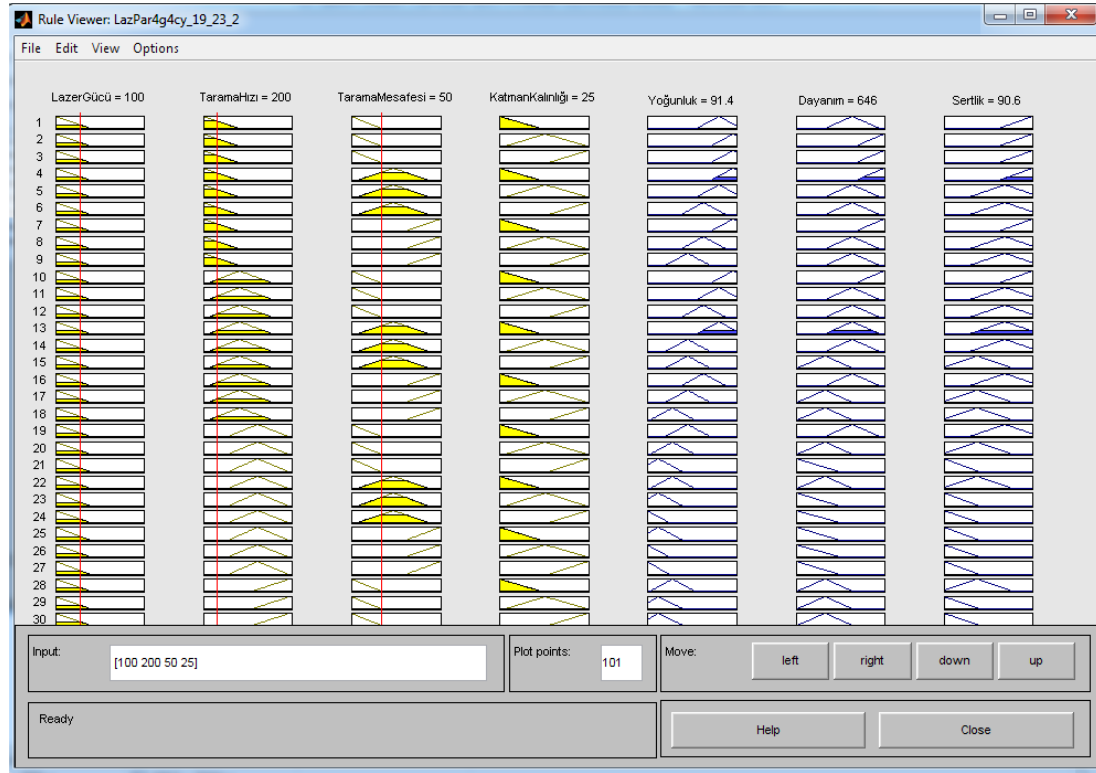
Matlab Fuzzy arabirimi “kural görüntüleyicisi” aracına (Şekil 5) giriş değerleri girilerek veya çizgiler konumlandırılarak, mamdani çıkarım metodundan durulaştırılmış sayısal değerler elde edilmiştir.



Şekil 3. Giriş-çıkış parametreleri üyelik fonksiyonlarının sayıları ve ayak genişlikleri



Şekil 4. Bulanık mantık modeli kural editörü



Şekil 5. Bulanık mantık modeli kural görüntüleyicisi

3. Bulgular ve Tartışma

Lazer ergitme işleminde en etkili giriş parametreleri lazer gücü ve tarama hızı, en önemli çıkış parametresi ise yoğunluk olarak bilinmektedir. İmal edilen parçada tıma yakın (%100) yoğunluk elde edilmesi ile en

iyi dayanım ve sertlik değerleri elde edilmektedir. Dolayısıyla, imal edilecek parçada elde edilecek dayanım ve sertlik yoğunlukla doğru orantılı olarak değişmektedir. Çok iyi mekanik özelliklerde bir parça elde etmek için en iyi yoğunluk

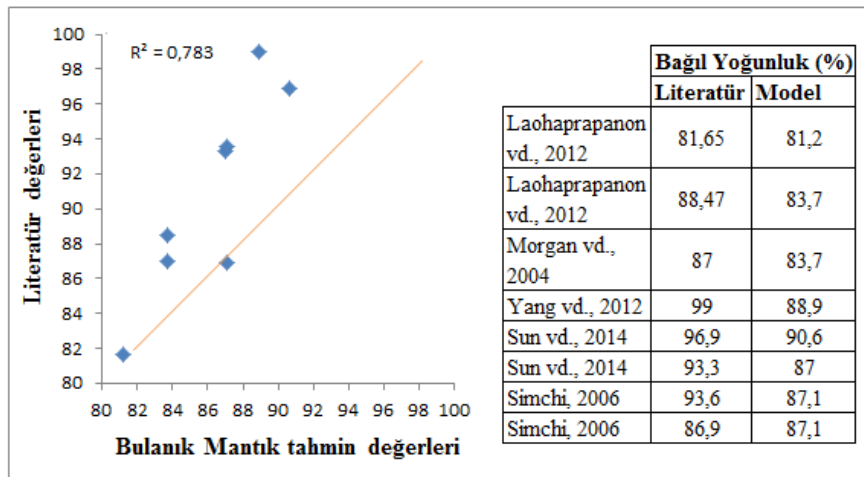
değerini sağlayacak işlem parametre değerleri seçilmelidir.

Oluşturulan bulanık mantık modelinin, istenilen çıkış özelliklerini sağlayacak işlem parametre değerlerinin seçilmesine hizmet etmesi hedeflenmiştir. Bulanık mantık modeli bağıl yoğunluk, dayanım ve sertlik tahmini için ayrı ayrı test edilmiştir. Oluşturulan bulanık mantık modeli bağıl yoğunluk tahmini için, literatürdeki çalışmalarda yer alan giriş parametrelerine göre test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile çalışmalardaki sonuçların karşılaştırma

grafığı Şekil 6’ da gösterilmiştir. Belirtilen değerlere göre literatür ile model arasındaki korelasyon katsayısının karesi (R^2), Eşitlik 2 ile 0,78 olarak bulunmuştur.

$$R^2 = \left\{ \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \Sigma [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{(\sigma_x \cdot \sigma_y)} \right\}^2 \quad (2)$$

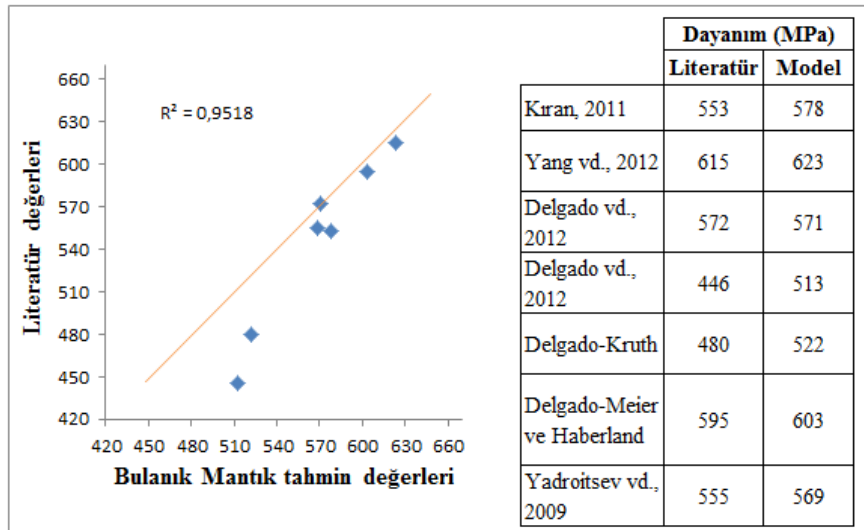
Eşitlikte; N gözlem sayısı, Σ toplam sembolü, x_i i. gözlemin x değeri, \bar{x} ortalama değer (x), σ_x standart sapma (x), y_i i. gözlemin y değeri, \bar{y} ortalama değer (y), σ_y standart sapma (y) olarak ifade edilmektedir.



Şekil 6. Bağıl yoğunluk için literatür çalışmalarındaki sonuçlar ile model çıktılarını karşılaştırma grafiği

Bulanık mantık modeli “çekme dayanımı” tahmini için, literatürdeki çalışmalarda yer alan giriş parametrelerine göre test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7’ de

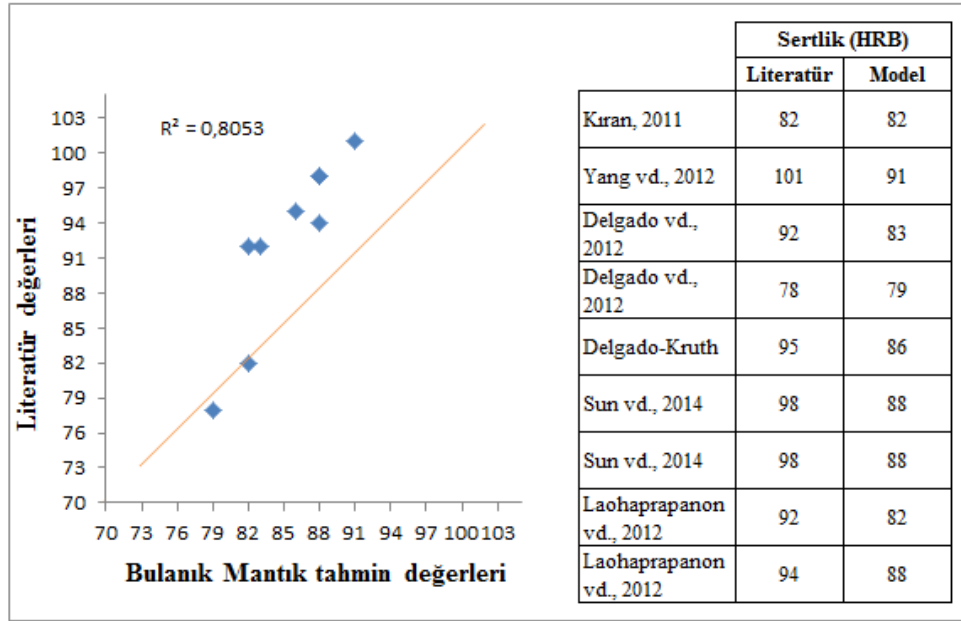
gösterilmiştir. İfade edilen değerlere göre literatür ile model arasındaki R^2 değeri 0,95 olarak bulunmuştur.



Şekil 7. Çekme dayanımı için literatür çalışmalarındaki sonuçlar ile model çıktıları karşılaştırma grafiği

Diğer bir aşama olarak bulanık mantık modeli “sertlik” tahmini için, literatürdeki çalışmalarda yer alan giriş parametrelerine göre test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile model çıktıları karşılaştırma grafiği Şekil 8’

de gösterilmiştir. Belirtilen değerlere göre literatür ile model arasındaki R^2 değeri 0,80 olarak bulunmuştur.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Sertlik için literatür çalışmalarındaki sonuçlar ile model çıktıları karşılaştırma grafiği

Bağlı yoğunluk, çekme dayanımı ve sertlik için literatür ile karşılaştırma sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen modelin bağlı yoğunluk için %78, çekme dayanımı için %95, sertlik için %80 başarı ile tahminler gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu anlamda, elde edilen oranlar geliştirilen

modelin güvenilirliğinin tatmin edici seviyede olduğunu ortaya koymaktadır.

Oluşturulan bulanık mantık modeline, işlem parametrelerinin farklı değerleri için çıkış parametrelerinin tahminleri yaptırılmış ve sonuçlar Çizelge 4’ de verilmiştir.

Çizelge 4. Bulanık mantık modeli işlem parametrelerinin farklı değerleri için çıkış parametre değerleri tahminleri

Lazer gücü (W)	Giriş Parametreleri				Çıkış Parametreleri		
	Tarama hızı (mm/s)	Tarama mesafesi (ışın çapı %)	Katman kalınlığı (µm)	Enerji yoğunluğu (j/mm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HRB)
50	1000	100	100	5	63,2	297	57,2
50	500	50	50	40	77,1	461	77,4
50	100	25	25	800	92	582	98,1
100	1000	100	100	10	63,5	304	57,8
100	100	100	25	400	95,9	733	97,8
100	100	25	25	1600	88,7	541	87,6
125	1000	100	100	12,5	63,2	298	57,3
125	500	25	25	400	89,8	634	89,7
125	100	25	25	2000	85,3	493	87,6
125	100	25	100	500	96,1	736	98,1
150	1000	100	100	15	63,2	297	57,2
150	100	25	25	2400	83,8	472	87,6
150	100	50	50	600	90,2	628	89
175	1000	100	100	17,5	63,6	309	58,2
175	500	25	25	560	88,5	539	88,7
175	100	25	25	2800	79,4	413	87,5
175	100	50	100	350	91,4	624	87,6
200	100	25	25	3200	78,2	396	87,6
200	500	25	25	640	88,4	510	87,6
200	1000	100	100	20	63,5	307	58
225	100	25	25	3600	78,2	396	87,6
225	1000	25	25	360	85,3	582	87,7
225	1000	100	100	22,5	63,2	297	57,2

SLS/E yöntemi ile imalatta son kullanım parçanın dayanımı ve sertliği bağlı yoğunluk ile pozitif yönde ilişkilidir (Casalino vd., 2015). Bağlı yoğunluk da lazer enerji yoğunluğuna bağlıdır. En uygun enerji yoğunluğu ile imal edilen parçalarda %100'e yakın yoğunluk elde edilmektedir (Kempen vd., 2011; Laohaprapanon vd., 2011; Yang vd., 2012; Jia ve Gu, 2014)

Simchi (2006), DMLS makinesinde 316L paslanmaz çelik tozları kullanarak bağlı yoğunluk ve mikroyapı değerlendirmesi için bir çalışma yapmıştır. Lazer enerji yoğunluğunun artırılması ile (yüksek lazer gücü; düşük tarama hızı; düşük tarama mesafesi; düşük katman kalınlığı) daha iyi yoğunluk (%86,9' dan %93,6' ya)

sağlanmıştır. Ancak belirli bir doygunluk seviyesinde çok yoğun lazer enerjisinde tam yoğunluk elde edilememiştir. Yüksek lazer enerji yoğunluğu, ergime havuzunda buharlaşmaya sebep olmakta ve buhar geri tepme basıncı nedeni ile eriyik sıçraması meydana gelmektedir (Rombouts, 2006). Bu durum da yoğunluğu düşürmektedir.

Çizelge 4, hacimsel lazer enerji yoğunluğunun en düşük ve en yüksek değerlerine göre örnekleme yapılarak hazırlanmıştır. Düşük enerji yoğunluklarında metal tozlarında yeterli ergime ve kaynaşma sağlanamadığı için çıkış parametre değerleri de düşük çıkmaktadır. Enerji yoğunluğu arttıkça ergime ve kaynaşma da yeterince sağlanmakta böylece çıkış parametre

değerleri de artmaktadır. Fakat çok yüksek enerji yoğunluklarında da aşırı ergime dolayısı ile kısmen buharlaşma meydana gelmektedir. Bunun sonucunda çıkış parametre değerleri tekrar düşüşe geçmekte ve düşük enerji yoğunluğunda çıkan değerlere doğru yaklaşmaktadır. Belirli enerji yoğunluğu sınırları dışındaki değerlerde bağlı yoğunluk ve neticesinde çekme dayanımı ile sertlik negatif etkilenmektedir.

Çizelge 4' e göre, hacimsel enerji yoğunluğunun $350-800\text{J/mm}^3$ arasında olmasını sağlayan giriş parametre değerleri ile %90 üzerinde bağlı yoğunluk, 582-736MPa arasında çekme dayanımı ve 87-98HRB arasında sertlik değerleri tahmin edilmiştir. Yang vd. (2012), çalışmalarında 480J/mm^3 enerji yoğunluğunda (120W, 200mm/s, 0.050mm, 0.025mm) ortalama 615MPa dayanım, 101HRB sertlik ve %99 yoğunluk değeri elde etmişlerdir. Belirtilen değerler, modelde öngörülen hacimsel enerji yoğunluğu aralığında tahmin edilen çıkış özellikleri değerlerine uymaktadır.

Sun vd. (2014), 166J/mm^3 enerji yoğunluğu (150W, 200mm/s, 0.09mm, 0.05mm) ile imal edilen parçalarda %93.3 yoğunluk elde etmişlerdir. Simchi (2006) ise imal edilen parçalardaki %93.6 yoğunluk değerini 286J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde etmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere aynı enerji yoğunluğu kullanarak imal edilecek parçalarda eşit çıkış özelliği değerleri elde edilir gibi bir yargıya varılamamaktadır. Benzer şekilde giriş bölümünde verilen önceki çalışmalarda da aynı enerji yoğunluklarında değişik çıkış özellikleri elde edildiği görülmektedir.

Geliştirilen bulanık mantık modelinde meydana gelen hata paylarının sebebi olarak, giriş parametrelerinden elde edilen hacimsel enerji yoğunluğu ile çıkış özellikleri arasında doğrusal bir bağlantının olmayışı düşünülebilir.

4. Sonuç

Çalışmada, her hangi bir SLS/E makinesinde istenen lazer parametre değerlerine göre imalatı yapılacak metal parçanın mekanik özelliklerin tahminini gerçekleştiren bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Böylece lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı gibi işlem parametreleri parçada istenen mekanik özellikler için uygun bir şekilde seçilebilmektedir. Bulanık mantık modelinden elde edilen parametre değerleri makine yazılımına girilerek, bağlı yoğunluk, çekme dayanımı ve sertlik mekanik özellikleri için istenen değerlere yakın parça imalatı yapılabilecektir.

Bulanık mantık modeli sayesinde araştırmacıların makine üzerinde, imalat için en uygun işlem parametrelerini bulmaya yönelik denemeler yapmaları en aza indirilerek zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olacaktır.

Modelin literatüre göre test edilmesi sonucu geliştirilen modelin bağlı yoğunluk %78, çekme dayanımı için %95, sertlik için %80 doğrulukla tahminler yapıldığı görülmüştür.

SLS/E işleminde, hacimsel enerji yoğunluğunun $350-800\text{J/mm}^3$ arasında olmasını sağlayacak giriş parametre değerlerinin seçilmesiyle yapılacak olan bir imalatta, geleneksel yöntemler ile imal edilmiş 316L paslanmaz çelik parçadan daha iyi çekme dayanımına ve sertliğe sahip mekanik özelliklerde son kullanım parça elde edilebilecektir.

Teşekkür

Yazarlar, çalışmayı 2668-D-11 nolu Proje ile maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür eder.

Kaynaklar

- Ali, J.M., Hussain, M.A., Tade, M.O., Zhang, J., 2015. Artificial Intelligence techniques applied as estimator in chemical process systems- A literature survey. *Expert Systems with Applications*, 42, 14, 5915-5931.
- Barzani, M.M., Zalnezhad, E., Sarhan, A.A.D., Saeed, F., Ramesh, S. 2015. Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al-Si-Cu-Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, 61, 150-161.
- Bertol, L.S., Júnior, W.K., Silva, F.P., Aumund-Kopp, C. 2010. Medical design: Direct Metal Laser Sintering of Ti-6Al-4V. *Materials and Design*, 31, 3982-3988.
- Bineli, A.R.R., Peres, A.P.G., Jardini, A.L., Filho, R.M. 2011. Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of Microreactors. 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, 11-15 April 2011, Caxias do Sul, Brazil.
- Brezocnik, M., Kovacic, M., Ficko, M. 2004. Prediction of surface roughness with genetic programming, *J Mater Process Techno*, 157-158, 28-36.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L., Fino, P. 2013. Influence Of Process Parameters On Surface Roughness of Aluminum Parts Produced by DMLS. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67, 2743-2751.
- Casalino, G., Campanelli, L., Contuzzi, N., Ludovico, A.D. 2015. Experimental Investigation And Statistical Optimisation Of The Selective Laser Melting Process Of A Maraging Steel. *Optics&Laser Technology*, 65, 151-158.
- Catholic University of Leuven (CUL) 1425. <http://www.mech.kuleuven.be/pp/facilities/ms2> (Erişim Tarihi: 18.12.2014).
- Chatterjee, N., Kumar, S., Saha, P., Mishra, P.K., Choudhury, A.R. 2003. An Experimental Design Approach To Selective Laser Sintering Of Low Carbon Steel. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, India.
- Das, S. 2003. Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. *Advanced Engineering Materials*, 5,10, 701-711.
- Deckard, C. 1989. Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering. US Patent 4,863,538, filed 17 October 1986, published 5 September 1989.
- Delgado, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A. 2012. Influence Of Process Parameters On Part Quality And Mechanical Properties For DMLS And SLM With Iron-Based Materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 60, 601-610.
- Dereli, T., Durmuşoğlu, A., Ulusam, S., Avlanmaz, N. 2010. A fuzzy approach for personnel selection process. *Turkish Journal of Fuzzy Systems*, 1, 2, 126-140.
- Erzincanlı, F., Ermurat, M., Comparison Of The Direct Metal Laser Fabrication Technologies. Gebze Institute of Technology. <http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/comparison-metal-laser-sintering.pdf> (Erişim Tarihi: 24.12.2014).
- Fister, I.-Jr., Yang, X.-S., Fister, I., Brest, J., Fister, D. 2013. A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization. *Elektrotehniski Vestnik*, 80, 3, 1-7.
- Garg, A., Tai, K., Savalani, M.M. 2014. State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes, *Rapid Prototyping Journal*, 20, 2, 164-178.
- Gholaminezhad, I., Assimi, H., Jamali, A., Vajari, D.A. 2016. Uncertainty quantification and robust modeling of selective laser melting process using stochastic multi-

- objective approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86, 5, 1425-1441.
- Hossain, A., Hossain, A., Nukman, Y., Hassan, M.A., Harizam, M.Z., Sifullah, A.M., Parandoush, P. 2016. A Fuzzy Logic-Based Prediction Model for Kerf Width in Laser Beam Machining. Materials and Manufacturing Processes, 31, 5, 679-684.
- Jamal, A., Syahputra, R. 2016. Heat Exchanger Control Based on Artificial Intelligence Approach. International Journal of Applied Engineering Research, 11, 16, 9063-9069.
- Jia, Q., Gu, D. 2014. Selective Laser Melting Additive Manufacturing Of Inconel 718 Superalloy Parts: Densification, Microstructure and Properties. Journal of Alloys and Compounds, 585, 713-721.
- Joo, B.D., Jang, J.H., Lee, J.H., Son, Y.M., Moon, Y.H. 2010. Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology. J. Mater. Sci. Technol., 26(4), 375-378.
- Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W., Kruth, J.-P., 2011. Process Optimization And Microstructural Analysis For Selective Laser Melting Of AlSi10Mg. Catholic University of Leuven, Departement of Mechanical Engineering, Belgium, 484-495. <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsarchive/pubs/Manuscripts/2011/2011-37-Kempen.pdf> (Erişim Tarihi: 12.10.2014).
- King, D., Tansey, T. 2002. Alternative materials for rapid tooling. Journal of Materials Processing Technology, 121, 313-317.
- Klocke, F., Wagner, C., Ader, C. 2003. Development Of An Integrated Model For Selective Metal Laser Sintering. Progress In Virtual Manufacturing Systems: Proceedings. 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarland University, 03-05 June 2003, Saarbrücken, Germany.
- Kochan, D., Kai, C.C., Zhaohui, D. 1999. Rapid Prototyping Issues In The 21st Century. Computers in Industry, 39, 3-10.
- Kruth, J.-P., B. Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Naert, I. 2005. Rapid Manufacturing of Dental Prostheses by means of Selective Laser Sintering/Melting. Proceedings of the AFPR, 4.
- Laohaprapanon, A., Jeamwathanachai, P., Wongcumchang, M., Chantarapanich, N., Chantawerod, S., Sitthiseripratip, K., Wisutmethangoon, S. 2011. Optimal Scanning Condition of Selective Laser Melting Processing with Stainless Steel 316L Powder. Advanced Materials Research, 341-342, 816-820.
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Du, M., Xie, Z. 2010. 316L Stainless Steel with Gradient Porosity Fabricated by Selective Laser Melting. JMEPEG, 19, 666-671.
- Morgan, R., Sutcliffe, C.J., O'Neill, W. 2004. Density Analysis Of Direct Metal Laser Re-Melted 316L Stainless Steel Cubic Primitives. Journal Of Materials Science, 39, 1195-1205.
- Neğiş, E. 2014. <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/> (Erişim Tarihi: 09.09.2014).
- Ning, Y., Fuh, J. Y. H., Wong, Y. S., Loh, H. T. 2004. An intelligent parameter selection system for the direct metal laser sintering process, International Journal of Production Research, 42:1, 183-199.
- Özel, S., Yalçın, B., Turhan, H., Somunkıran, İ. 2008. Yüzeyi Ferromangan Toz Alaşımıyla Kaplı Dökümlerin Aşınma Karakteristiğinin Bulanık Mantıkla Modellenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 23, 1, 33-39.

- Parmar, J.G., Makwana, A. 2012. Prediction of surface roughness for end milling process using Artificial Neural Network. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2, 3, 1006-1013.
- Partee, B., Hollister, S.J., Das, S. 2006. Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds. *Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME)*, 128, 531-540.
- Ramesh, A.N., Kambhampati, C., Monson, J.R.T., Drew, P.J. 2004. Artificial intelligence in medicine. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, 86, 334-338.
- Rombouts, M. 2006. Selective laser sintering/melting of iron-based powders. Katholieke Univesiteit Leuven, Ph.D thesis, 241p, Leuven.
- Senthilkumaran, K., Pandey, P.M., Rao, P.V.M. 2009. Influence Of Building Strategies On The Accuracy Of Parts In Selective Laser Sintering. *Materials and Design*, 30, 2946-2954.
- Shahin, M.A., 2016. State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations. *Geoscience Frontiers*, 7, 1, 33-44.
- Shellabear, M., Nyrrhilä, O. 2004. DMLS – Development History and State of the Art. LANE 2004 conference, Sept., Erlangen, Germany, 21-24.
- Simchi, A. 2006. Direct Laser Sintering Of Metal Powders: Mechanism, Kinetics And Microstructural Features. *Materials Science and Engineering*, A428, 1-2, 148-158.
- Simchi, A., Pohl, H. 2003. Effects Of Laser Sintering Processing Parameters On The Microstructure And Densification Of Iron Powder. *Materials and Engineering*, A359, 119-128.
- Sofu, M.M. 2006. Hızlı Direkt İmalatta Kullanılan Seçici Lazer Sinterleme Ve Ergitme Cihazının Gövde Tasarımı Ve İmalatı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 71s.
- Song, B., Dong, S., Deng, S., Liao, H., Coddet, C. 2014. Microstructure And Tensile Properties Of Iron Parts Fabricated By Selective Laser Melting. *Optics & Laser Technology*, 56, 451-460.
- Sun, Y., Moroz, A., Alrbaey, K., 2014. Sliding Wear Characteristics and Corrosion Behaviour of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel. *JMEPEG*, 23, 518-526.
- Taşdemir, Ş., Neşeli, S., Sarıtaş, İ., Yıldız, S. 2011. Bulanık Yaklaşım İle Tornalama İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6, 1, Article Number: 1A0136.
- Taylan, F., Kayacan, M.C. 2011. Genetic Evolutionary Approach for Cutting Forces Prediction in Hard Milling. *Zeitschrift Fur Naturforschung Section A-A Journal of Physical Sciences*, 66a, 675 – 680.
- The University of Texas at Austin (UT) 1883. http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php#x3dp2 (Erişim Tarihi: 29.10.2014).
- Tumer, I.Y., Thompson, D.C., Wood, K.I., Crawford, R.H. 1996. Quantification Of Part Surface Quality: Application To Selective Laser Sintering. *The 1996 World Automation Conference Proceedings*, May, Montpellier, France, 731-736.
- Wang, X.J., Zhang, L.C., Fang, M.H., Sercombe, T.B. 2014. The Effect Of Atmosphere On The Structure And Properties Of A Selective Laser Melted Al–12Si Alloy. *Materials Science & Engineering A*, 597, 370-375.

Wen, S.F., Yan, C.Z., Wei, Q.S., Zhang, L.C., Zhao, X., Zhu, W., Shi, Y.S. 2014. Investigation And Development Of Large-Scale Equipment And High Performance Materials For Powder Bed Laser Fusion Additive Manufacturing, Virtual and Physical Prototyping, 9,4, 213-223.

Yang, Yongqiang, Lu, J.-B., Luo, Z.-Y., Wang, D., 2012. Accuracy And Density Optimization In Directly Fabricating Customized Orthodontic Production By Selective Laser Melting. Rapid Prototyping Journal, 18, 6, 482-489.

Yalçın, B., Uçun, İ., Koru, M. 2007. Mermer Kesme Testerelerinde Oluşan Kesme Kuvvetinin Bulanık Mantık (BM) yöntemiyle Modellenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 22, 2, 329-336.

Yarkınoğlu, O., 2007. Computer Aided Manufacturing (CAM) Data Generation For Solid Freeform Fabrication. Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Master Thesis, 110p, Ankara.

Yasa, E., Kruth, J-P., 2011. Microstructural Investigation Of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel Parts Exposed To Laser Re-Melting. Procedia Engineering, 19, 389-395.

Yasa, E., Deckers, J., Kruth, J-P. 2011. The Investigation Of The Influence Of Laser Re-Melting On Density, Surface Quality And Microstructure Of Selective Laser Melting Parts. Rapid Prototyping Journal, 17, 5, 312-327.

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Set, Information Control , 8-1, 338-353.