

Eklemeli İmalat ile Üretilen Latis Yapılardaki Geometrik Değişimlerin Konuma Bağlı İstatistiksel Modellenmesi

Recep M. Görgülürslan* 

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

O. Utku Güngör 

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 04-01-2021

Kabul: 21-02-2021

*Sorumlu Yazar: Recep M. Görgülürslan
Email: rgorguluarslan@etu.edu.tr

Bu çalışmanın temel içeriği, latis yapıların temel bileşenleri olan çubuk elemanların üzerinde, bir eklemeli imalat tekniği olan malzeme ekstrüzyonu yöntemi kullanılarak üretimi sürecinde meydana gelen geometrik değişimlerin, gelişmiş istatistiksel yöntemler kullanarak konuma bağlı olarak modellenmesi ve simülasyon modellerine dahil edilebilirliğinin incelenmesidir. Bu amaçla, çubuk eleman numuneleri farklı çap değerlerinde malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numuneler dijital kameralı ışık mikroskobu altında incelenmiş ve üretim sonrasında gözlemlenen çapta oluşan değişimlerin ölçümleri yapılarak deneysel veriler elde edilmiştir. Söz konusu değişimler, belirli bir uzay içerisinde konuma bağlı değişimlerin modellenmesinde sıkça kullanılan rassal alan (random field) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Rassal alan yöntemiyle modellenen değişimler, voksel elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar modellerine dahil edilmiştir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çubuk elemanların tek eksenli çekme testleri yapılarak, değişimleri içeren, üretilene benzer sonlu elemanlar modellerinin analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu incelenmiştir. Geliştirilen bu yöntem farklı eklemeli imalat yöntemlerine genişletilebilir, üretim sürecinde geometri özellikleri ve malzeme özelliklerinde gözlemlenen değişimler karakterize edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Malzeme Ekstrüzyonu, Latis Yapı, Sonlu Elemanlar Analizi, Rassal Alan

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, farklı birçok alanla beraber imalat yöntemlerine de önemli yenilikler getirmiştir. Bu yenilikler, özgün ileri imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasına imkân sağlamıştır. Söz konusu yöntemlerin bir grubu eklemeli imalat olarak tanımlanmıştır. Bu gelişmelerle birlikte, geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmesi güç veya mümkün olmayan karmaşık hiyerarşiye sahip geometrilerin üretilebilirliği mümkün kılınmıştır. Nispeten olgunlaşma sürecinde olan eklemeli imalat yöntemleri, sağladığı özgün avantajlar nedeniyle gerek akademik çalışmalar gerekse endüstriyel uygulamalarda çarpıcı bir gelişme elde etmiştir.

Latis yapılar, birbirine bağlı karmaşık çubuk, plaka veya matematiksel yüzey ağı içeren milimetre veya daha küçük seviyelerdeki kafes yapılar olarak bilinmektedir. Atomların diziliminden ilham alınarak oluşturulan bu yapılar hafif ve dayanımı yüksek yapılar olarak da bilinmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte üretimleri mümkün kılınan bu yapılar, ağırlık kısıtının önem arz

ettiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Latis yapıların sağladığı avantajlara rağmen, eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak bu yapıların üretimi sırasında oluşan kusurlar, geometri ve malzeme özelliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Mikro ve milimetre seviyelerinde oluşan bu değişimler, makro seviyede tüm latis yapının mekanik özelliklerini ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, latis yapıları oluşturan elemanların üretim sürecinde yüzey ve kesit alanlarında oluşan değişimlerin tasarım ve analiz süreçlerine dahil edilmesi gerekmektedir [1].

Bir metal eklemeli imalat tekniği olan seçmeli lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen latis yapılardaki malzeme özelliklerindeki değişimlerin sonlu elemanlar analizine (SEA) dahil edilmesinin, simülasyon sonuçlarının hassasiyetini artırdığı gösterilmiştir [2]. Çubuk elemanların bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri için belirlenen çap değerlerinin, eklemeli imalat sürecinde farklı üretim parametrelerinin kullanılmasına bağlı olarak iki katına kadar çıkabileceği gösterilmiştir [3]. Polimer

malzemelerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir eklemeli imalat tekniği olan malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis hücreler için üretim sürecinde oluşan geometrik değişimler de incelenmiştir [4]. Bu değişimler, kafes yapılarıdaki farklı açılara sahip çubuk elemanlar üzerinden elde edilen deneysel verinin olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak modellenmesi ile rassal değişkenler (random variable) yöntemi kullanılarak SEA'ya dahil edilebilmiştir [5]. Bir başka modelleme tekniğinde, SLM yöntemiyle üretilen latis yapının, mikro bilgisayarlı tomografi (micro-computed tomography - μ CT) cihazı ile elde edilen resimleri kullanılarak, üretimde meydana gelen kusurları içeren simülasyon modeli oluşturulmuş ve mekanik özellikler hassas bir şekilde karakterize edilebilmiştir [6]. Benzer diğer bir çalışmada [7], SLM yöntemiyle üretilen iki farklı latis hücre tipinin μ CT ile oluşturulan modelleri kullanılarak, çubuk elemanlarda gözlemlenen çap değişimleri ve kesit alanının olasılık dağılım fonksiyonları modellenmiştir. Üretilen latis yapıların basma sınır koşulları altında testleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar olasılık dağılım fonksiyonları oluşturularak karakterize edilen bu değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

Yazarların son çalışmasında ise [8], malzeme ekstrüzyonu ile üretilen çubuk elemanlardaki geometrik çap değişimlerinin konuma bağlı modellenmesi rassal alan kullanılarak gerçekleştirilmiş ve önceki çalışmalarda rassal değişken kullanılarak yapılan modellemelere göre, üretilen geometriye daha yakın sonuçların rassal alan modellemesi ile elde edildiği gösterilmiştir. Fakat bu çalışmada modellenen çubuk elemanların SEA sonuçları ve deneylerle doğrulanması irdelenmemiştir.

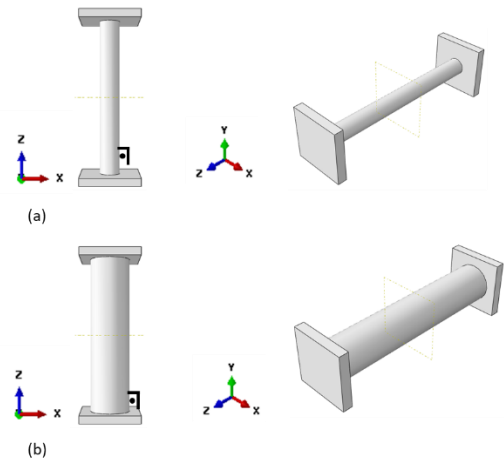
Bu çalışmanın amacı, rassal alan ile modellenen değişimlerin dahil edildiği SEA sonuçlarının elde edilmesi, çubuk elemanların çekme testlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak incelenmesidir. Bu amaçla, farklı latis hücre tiplerini oluşturabilecek dikey (90°) çubuk elemanlar, iki farklı çap değerinde malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen çubuk eleman modelleri dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenerek çap değişimleri ve çubuk elemanın kesit alanında görülecek değişimler (merkez sapmaları, boşluklar), mikroskop görüntüleri üzerinden alınan ölçümlerle elde edilmiştir. Ölçüm işlemi Matlab™ yazılımında geliştirilen görüntü işleme algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler, rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kesit üzerinde dört noktadaki yarıçaplar için rassal alan modellemesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu değişimler voksel elemanlar kullanılarak çubuk elemanların SEA modellerine dahil edilmiştir. Çubuk elemanların çekme testi numuneleri üretilerek tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar, çubuk

elemanların üzerindeki değişimlerin dahil edildiği SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Üretim ve Ölçümler

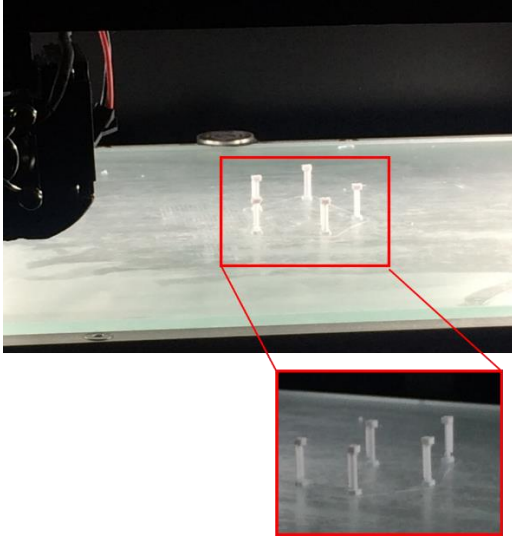
Latis yapıların en küçük bileşenleri olan çubuk elemanlar, 2 farklı model çapı olan $D_m = 1$ mm ve $D_m = 2$ mm değerleri kullanılarak, çubuk boyları 10 mm olacak şekilde modellenmiştir. Ayrıca, üretimden sonra numunelerin mikroskop tablasına yerleşimini sağlayacak ve farklı kesit noktalarından ölçüm alınmasını sağlayacak alt ve üst karesel çerçeveler de Şekil 1'de gösterildiği gibi eklenmiştir. Çubuk eleman numuneleri, malzeme ekstrüzyonu tekniği ile çalışan ArtıBoyut™ A1 Pro makinesi kullanılarak Esun marka PLA malzeme ile üretilmiştir. Çubuk elemanların üretiminde kullanılan üretim parametreleri Tablo 1'Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de verilmiştir. Çubuk elemanların üretim sürecine ait görüntüler ise Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çubuk elemanların bilgisayar modelleri (a) 90° , $D_m=1$ mm (b) 90° , $D_m=2$ mm

Tablo 1. Üretim parametreleri

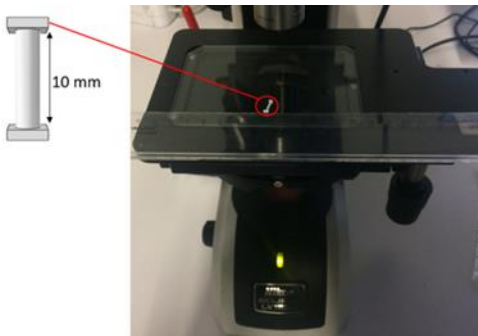
Parametre	
Katman kalınlığı (mm)	0,2
Doluluk oranı (%)	100
Üretim sıcaklığı (C°)	215
Alt tabla sıcaklığı (C°)	60
Baskı hızı (mm/s)	50
Filament kalınlığı (mm)	1,75
Destek yapı kullanımı	Yok



Şekil 2. Üretimi tamamlanan 90° açılı numune örnekleri

Bu çalışmada, 10 mm uzunluğundaki her bir çubuk eleman için 0,2 mm katman kalınlığı aralıklarında olmak üzere yaklaşık 50 katman üzerinden ölçümler alınmıştır. Bu işlem, 3 adet üretilen her bir çubuk eleman için gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir çubuk eleman modeli için yaklaşık 150 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Merkezi sınır teoremine (Central limit theorem) [9] göre bir veri kümesinin istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için veri sayısının en az 30 olması gerekmektedir. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan veri sayısı gerekli şartı sağlamaktadır.

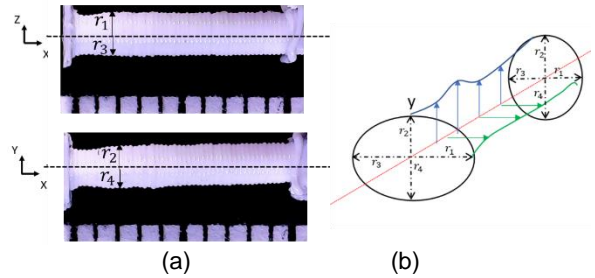
Malzeme ekstrüzyonu üretim sürecinde oluşan çap değişimleri, kesit alanlarındaki değişimler ve boşlukların gözlemlenebilmesi için çubuk eleman numuneleri Nikon Eclipse LV150N dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenmiştir. Kesit alanlarında gerçekleşen değişimlerin eleman boyunca hassas bir şekilde ölçülebilmesi için, üretilen çubuk elemanlar mikroskop tablasında yatay bir şekilde Şekil 3'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Çubuk eleman numunelerinin dijital kameralı ışık mikroskobu altında incelenmesi

Numunenin alt ve üstündeki kare çerçeveler sayesinde, numune, uzunluk ekseninde 90°'lik açıyla döndürülerek, kesit çapı etrafında

Şekil 4(a)'da görüldüğü gibi mikroskop görüntüleri alınmıştır. Çubuk numunelerin bilgisayar modelleri dairesel kesite sahip olmasına rağmen, üretimdeki belirsizliklerden dolayı, üretilen numunelerin kesitleri Şekil 4(b)'de gösterildiği gibi her katmanda farklı elips şeklinde kesitlere sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, elips şeklindeki kesit r_1, r_2, r_3, r_4 ile gösterilen 4 farklı yarıçaptan oluşacağı düşünülmüştür. Bu yüzden, Şekil 4(a)'daki gibi, mikroskop görüntüleri üzerinden, elips kesiti oluşturacak 4 farklı yarıçap için ölçümler alınmıştır.

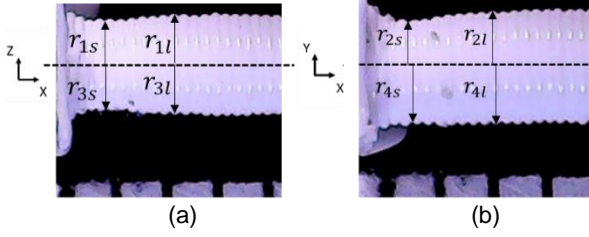


Şekil 4. Mikroskop görüntüleri üzerinden alınan yarıçap ölçümleri (a) r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçaplarının xz - xy eksenleri üzerinde karşılıkları (b) Yarıçap değerlerinin çubuk eleman boyunca değişimine ait şematik

Ayrıca, Şekil 5'te daha net görüleceği gibi, malzeme ekstrüzyonu yönteminde, üretilen her bir katmanın alt ve üst noktalarındaki yarıçaplar, katmanın orta noktasındakilere göre daha kısa olmaktadır. Bu yüzden, üretilen geometriyi hassas bir şekilde temsil edebilecek modellerin oluşturulabilmesi için, Şekil 4(a)'da gösterilen r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçap değerleri katmanların orta noktalarından ölçülen uzun yarıçaplar ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}$) ve katmanların alt ve üst noktalarından ölçülen kısa yarıçaplar ($r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) için alınmıştır. Dolayısıyla, her bir çubuk eleman için ölçülen 8 yarıçap değişkenleri sırasıyla (Şekil 5)

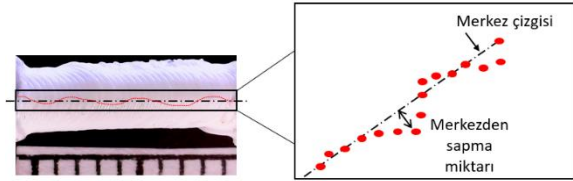
- i) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{1l} ve r_{3l} .
- ii) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{2l} ve r_{4l} .
- iii) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{1s} ve r_{3s} .
- iv) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{2s} ve r_{4s} .

şeklinde.



Şekil 5. 8 farklı yarıçap değişkeninin çubuk eleman kesitleri üzerinde karşılıkları (a) xz düzlemi görüntüsü, (b) xy düzlemi görüntüsü.

Katmanlı imalat yöntemi her bir katmanın birbiri üzerine yığılması stratejisine dayanmaktadır. Bu nedenle, üretilen çubuk elemanların merkez noktalarında eleman boyunca değişimler meydana gelmektedir. Söz konusu değişimler Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu çalışmada, merkez sabit kabul edilerek elde edilen 8 farklı yarıçap ölçümü (r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l} , r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s}) sayesinde bu merkezlerdeki sapmalar yarıçaplardaki değişimler olarak modellere dahil edilebilmiştir.



Şekil 6. Katmanlı imalat ile üretilen çubuk elemanların kesitlerinde görülen merkez eksen sapmalar

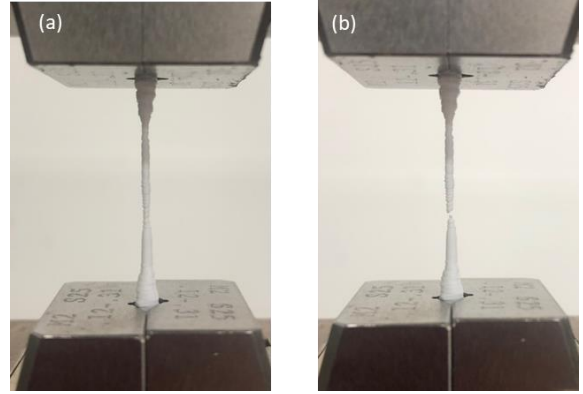
Çekme Testleri

90° açı ile üretilen 1 ve 2 mm çap boyutlarındaki çekme testi numuneleri ayrı olarak hazırlanmıştır; çünkü çekme testi için çubukların üst ve alt taraflarında, Şekil 7'de gösterildiği gibi, daha büyük çaplardaki kesitler ile köpek kemiği şeklindeki numunelerin oluşturulması gereklidir. Üretilen çekme testi numunelerinin boyutları literatürde gerçekleştirilen benzer bir çalışmadan alınmıştır [10,11]. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çekme testi numunelerinin tek eksenli çekme testleri Instron 400LX çekme testi cihazı ile 1 mm/dk gerinim oranıyla (strain rate) gerçekleştirilmiştir.

RASSAL DEĞİŞKEN MODELLEMESİ

Mühendislik uygulamalarında yükler, geometri, malzeme özellikleri, üretim süreçleri ve operasyon ortamlarındaki değişkenlikler, sistemin yanıtı üzerinde belirsizlikler oluşturur. Belirsizlik altındaki sistemlerin olasılık özelliklerini belirlemede farklı yöntemler kullanılmaktadır. Rassal değişken yöntemi, belirsizliklerin konum ve zamandan bağımsız olduğu varsayımı ile basit bir şekilde belirsizlikleri modelleyebildiğinden sık kullanılan bir yöntemdir. Rassal değişkenler, ilgili problemin olasılık

dağılımlarının altında yatan özellikler incelenerek analiz edilir [12]. Diğer bir deyişle, bir rassal değişken, ilgili olasılık uzayındaki ölçülebilir değerlerdir. Rassal değişken X , olasılık dağılım aralığı içerisinde farklı x_1 , x_2 , x_3 ... x_n değerleri alabilir.

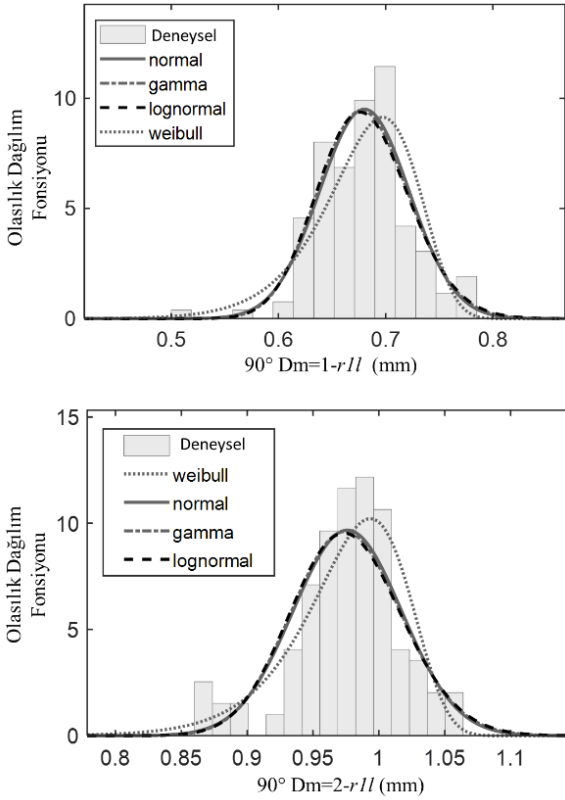


Şekil 7. 90°- $D_m = 1$ mm çap değerinde üretilen çekme testi numunesi (a) test öncesi (b) test sonrası

Bu çalışmada gerçekleştirilen rassal değişkenlerle değişimlerin modellenmesi için ilk adım olarak, elde edilen deneysel verilerin histogram ve olasılık dağılım fonksiyonları belirlenir. Deneysel verinin dağılımını temsil edebilecek en iyi olasılık dağılım fonksiyonu eğri uydurma yöntemiyle belirlenmiştir. Deneysel verinin histogram eğilimi üzerine uydurulan farklı olasılık dağılım fonksiyonlarından (normal, gamma, weibull) hata metriği en küçük değere sahip olanlar, veri kümesinin olasılık dağılımını en iyi şekilde temsil edecektir. Örnek olarak, 90° açılı $D_m = 1$ ve 2 mm çaplı üretilen çubuk eleman numunelerinden r_{1l} yarıçap değişkeni için alınan ölçümlerin histogramı ve uyarlanan olasılık dağılımları Şekil 8'de gösterilmiştir. Her bir 8 yarıçap değişkeni için aynı işlemler tekrarlanarak, deneysel ölçümlerden elde edilen çap değişimlerine en uygun dağılım fonksiyonları elde edilmiş, rassal değişkenler X , elde edilen olasılık dağılım aralığında oluşturulmuştur.

RASSAL ALAN MODELLEMESİ

Rassal değişken modellemesi, konuma ve zamana bağlı belirsizlik değişimini ihmal ettiğinden hassas çözüm sunmayabilir. Uzay içerisinde konuma ve zamana bağlı olarak değişen verilerin belirsizlik tahmini ve temsili, farklı matematiksel modeller kullanılarak rassal alan yöntemiyle temsil edilebilir. Rassal alan yönteminde, problemin çözüleceği uzay içerisinde noktalar kümesi oluşturularak, farklı konumlar korelasyon parametreleriyle ilişkilendirilir ve uzay içerisindeki konuma bağlı değişimler temsil edilebilir [12].



Şekil 8. 90° açılı, 1 ve 2 mm çaplı çubukların $r_{//}$ değişkeni için histogram eğilimi ve olasılık dağılım fonksiyonları

Rassal alan içerisindeki değişimlerin seri açılımı cinsinden temsil edilmesi literatürde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Böylece, uzay içerisindeki farklı konumlara bağlı veya zamana bağlı değişkenler temsil edilebilir. Örneğin, eklemeli imalat alanında, Inconel 718 malzemesi ile doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile üretilen malzemelerin üzerindeki yüzey pürüzlülüğü Fourier seri açılımı kullanarak temsil edilmiştir [13]. Bir diğer çalışmada ise [14], Stereolitografi (SLA) yöntemi ile, sıvı polimer kullanılarak, 60°, 75° ve 90° açılar ile üretilen çubuk numunelerin yan kenar profilleri Gaussian rassal alan yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

Rassal alanın temsil edilmesinde, Spektral gösterim, Karhunen-Loeve (KL) açılımı, Polynomial Chaos açılımı ve Wavelets gösterimi gibi farklı yöntemler kullanılabilir [12]. Bu yöntemler arasında, KL seri açılımı kullanılarak kovaryans fonksiyonunun açılımı en verimli yöntemdir [15]. O yüzden, bu çalışmada, malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretimde oluşan çap belirsizlikleri, durağan (stationary) ve Gaussian rassal alan varsayımlarıyla, Karhunen-Loeve seri açılımı kullanılarak modellenmiştir.

Rassal alan modellemesi için ilk aşama, ilgilenilecek rassal alanın belirlenmesidir. Bu çalışmada ilgilenilen problem için rassal alan,

deneysel çubuk eleman numuneleri için belirlenen uzunluk değeri olan $L=10$ mm'dir. İkinci aşamada, çubuk eleman numuneleri üzerinden alınan deneysel ölçümlerin belirlenen rassal alan içerisindeki değişimleri elde edilir. Bu aşamada, alan boyunca değişimler bir sinyal verisine benzetilerek, zamana bağlı değişimler otokorelasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilir. N adet veri noktasına sahip veri kümesi için otokorelasyon fonksiyonu

$$R_{xx}(\tau_j) = \frac{\gamma_{xx}(\tau_j)}{\sigma_x^2} = \frac{1}{n\sigma_x^2} \left(\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \mu_x)(x_{i+j} - \mu_x) \right) \quad j = 0, 1, \dots, n-1$$

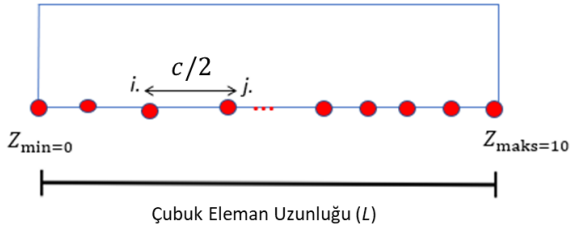
ile elde edilir. Bu eşitlikte, τ iki veri noktası arasındaki (lag) gecikme miktarını, n veri sayısını, μ_x ve σ_x değişkenleri n adet veriye ait ortalama ve standart sapmayı ve γ_{xx} otokovaryans fonksiyonunu temsil etmektedir [16].

Çubuk eleman boyunca sabit mesafe aralıklarıyla (katman kalınlığı) ölçümü gerçekleştirilen 8 yarıçap değişkeni rassal alan modellemesi sürecinde sinyal verisi veya zaman serisine benzetilerek incelenir. Burada veri kümesinin sahip olduğu eğilime bakılarak, söz konusu veri kümesi durağan (stationary) veya durağan olmayan (non-stationary) olarak sınıflandırılır. Genellikle fiziksel olayların gerçekleşmeleri durağan olmayan eğilimdedir. Buna rağmen durağan olmayan sınıfta incelenen verilerin istatistiksel modellenmesi zorlu ve karmaşıktır, nümerik işlem yükü gerektirir. Bu nedenle, ilgilenilen probleme durağan varsayımıyla yaklaşımları literatürde sıkça rastlanan bir yöntemdir. Bu çalışmada da deneysel veriler durağan (stationary) sınıfta incelenmiştir. Durağan, sabit ortalama ve standart sapmaya sahip bir rassal alan için gecikme (lag) miktarı (τ), doğrudan iki veri noktası arasındaki mesafeye ($\tau = \tau_1 - \tau_2$) eşit olmaktadır [17]. Eş. (1)'de elde edilen deneysel otokorelasyon fonksiyonlarının eğilimleri üzerine, farklı otokorelasyon modelleri eğri uydurma yöntemi kullanılarak eşleştirilir. Bu çalışmada kullanılan otokorelasyon fonksiyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Otokorelasyon fonksiyonları ($R(\tau)$) [18]

Model No	Eşitlik	Model İsmi
I	$R(\tau) = \exp\left(-\frac{ \tau }{c}\right)$	Ekspansiyel
II	$R(\tau) = \exp\left(-\left(\frac{ \tau }{c}\right)^2\right)$	Gauss
III	$R(\tau) = \left(1 - \frac{ \tau }{c}\right)$	Küresel (1.derece)
IV	$R(\tau) = \left(1 - \frac{3 \tau }{2c} + \frac{1}{2}\left(\frac{ \tau }{c}\right)^3\right)$	Küresel (3.derece)

Burada, τ ve c bileşenleri; iki veri arasındaki mesafeyi ve korelasyon mesafesini temsil etmektedir. Yukarıda adımları sıralanan deneysel otokorelasyon eğrisinin elde edilmesi ve otokorelasyon modellerinin bu eğriyle eşleştirilmesi sonucunda her bir çubuk eleman numunesi için korelasyon mesafesi (c) elde edilmiş olur. Rassal alan modellemesinin sonraki aşamasında, elde edilen korelasyon mesafesi (c) kullanılarak, rassal alanın ayrıklaştırılması işlemi gerçekleştirilir. Boyutları belirlenen rassal alan, iki nokta arasında ($c/2$) mesafesi olacak şekilde ayrıklaştırılır. Burada rassal alanın ayrıklaştırılmasında kullanılacak çözüm ağı boyutu ($c/2$) literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalardan elde edilmiştir [19,20]. Ayrıklaştırma işlemine ait şematik Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Rassal alanın ayrıklaştırılması şematiği

Ayrıklaştırılan rassal alan noktaları arasındaki mesafeler, $\tau = \tau_1 - \tau_2$ ve korelasyon mesafesi (c) değerlerinin hesaplanmasıyla birlikte, Tablo 2'de gösterilen otokorelasyon fonksiyonlarının bileşenleri elde edilmiştir. Bu sayede rassal alan noktaları arasındaki korelasyon ilişkisi elde edilebilir. Yapılan işlemlerdeki amaç, çubuk eleman boyunca üretim sürecinde meydana gelen değişimleri konuma bağlı olarak modellemektir. Bu işlem, farklı konumdaki noktalar arasındaki korelasyon ilişkisi elde edilerek mümkün olmaktadır.

Rassal alan modellemesi için kullanılan KL seri açılımı yöntemi, kovaryans matrisinin bir seri açılımı cinsinden temsil edilmesine dayanmaktadır. Bu nedenle, rassal alan sürecinin diğer aşaması her bir çubuk eleman modeli için kovaryans matrislerinin elde edilmesidir. Gaussian varsayımı, rassal alanın ortalama değerinin sıfır, varyans değerinin ise 1 olduğu ($\mu = 0, \sigma^2 = 1$) varsayımına dayanmaktadır. Diğer bir taraftan, korelasyon ve kovaryans arasında

$$\gamma_{xx} = \sigma_{xx}^2 R_{xx} \quad (2)$$

ilişkisi bulunmaktadır. Bu eşitlikte, x , rassal alan içerisinde gerçekleşen olasılık sürecini, γ_{xx} , otokovaryans matrisini, R_{xx} , otokorelasyon matrisini temsil etmektedir. Eş. (2)'de gösterilen ilişkinin bulunması, KL açılımı için gerekli kovaryans matrislerinin elde edilmesinde kolaylık sağlar. Tablo 2'de verilen korelasyon fonksiyonları, ayrıklaştırılan rassal alan noktaları arasındaki mesafeler ($\tau = \tau_1 -$

τ_2) ve korelasyon mesafesi (c) kullanılarak Eşitlik 2'de verilen korelasyon matrisi elde edilir. Gaussian rassal alan için $\sigma_{xx}^2 = 1$ değeri kullanılarak elde edilen korelasyon matrisleri ile kovaryans matrisleri hesaplanabilir. Böylece KL açılımının bileşenleri belirlenmiş olur.

Rassal alanın son aşamasında, KL seri açılımı kullanılarak rassal alan modellemesi tamamlanır. KL açılımı

$$g(x, \theta) = \bar{g}(x) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} g_i(x) \xi_i(\theta) \quad (3)$$

ile tanımlanır. Bu eşitlikte, $\bar{g}(x)$, rassal alanın ortalamasını, λ_i ve $g_i(x)$ sırasıyla öz değer ve öz fonksiyonları, $\xi_i(\theta)$ rassal değişkenleri göstermektedir. Standart normal dağılımlı rassal değişkenler $\xi_i(\theta)$, rassal alanın ortalama değeri $\bar{g}(x)$, elde edilen öz değer ve fonksiyonlar λ_i ve $g_i(x)$, Eş. (3)'te uygulanarak KL açılımı ve rassal alan modellemesi tamamlanmıştır. Bu aşamayla birlikte, 8 farklı yarıçap değişkeni ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}, r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) KL açılımı kullanılarak modellenmiştir. Diğer bir deyişle, matematiksel modeller kullanılarak deneysel verilerin değişimlerini konuma bağlı olarak ilişkilendirerek, üretim sürecinde meydana gelen değişimler istatistiksel olarak modellenmiştir.

BELİRSİZLİKLERİ İÇEREN DETAY MODELLERİN OLUŞTURULMASI

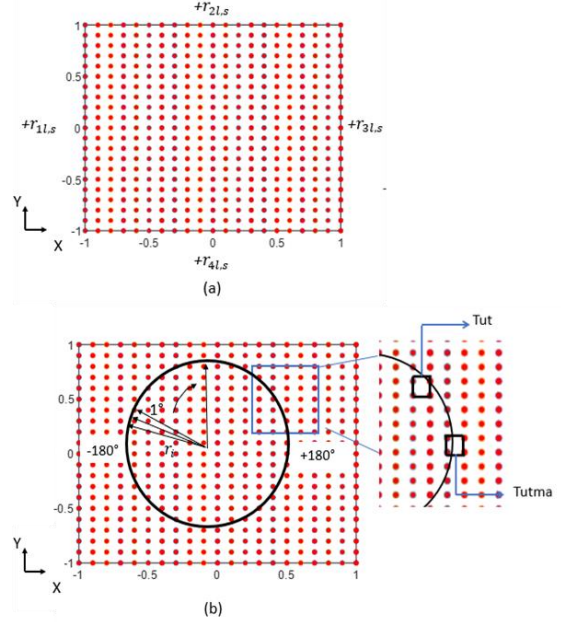
Rassal alan yöntemiyle modellenen latis yapıda üretimden kaynaklanan değişimlerin SEA modellerine dahil edilmesi, yapının farklı sınır ve yüklemeye koşulları altında davranışlarının incelenmesinde avantaj sağlamaktadır. Literatürde, değişim ve belirsizliklerin dahil edildiği özgün SEA modellerinin oluşturulmasında voksel elemanlar yaygın şekilde kullanılmaktadır [21, 22]. Voksel elemanlar basitçe hacimsel piksel (volumetric pixel) elemanlardır. Bu elemanlar kullanılarak tüm parça geometrisi modellenebilir ve değişimler (çap değişimleri, kesit alanında gözlemlenen farklılıklar, boşluklar) mevcut geometrilere dahil edilebilirler. Bu çalışmada, voksel elemanlar kullanılarak detay modellerin oluşturulmasında izlenen aşamalar şu şekildedir:

- Modellenecek numune üzerinden ölçülen ve rassal alan yöntemiyle modellenen yarıçap değerleri ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}, r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) sınır oluşturacak şekilde kare bir alanda noktalar kümesi oluşturulur. Bu aşama Şekil 10(a)'da gösterilmiştir.
- Çubuk eleman kesiti 4 farklı yarıçap değişkeninden oluştuğu için, bir önceki adımda oluşturulan nokta kümesi içerisinde kesitin oluşturulabilmesi için $\pm 180^\circ$ aralığında 4 bölge oluşturularak her 1° 'ye karşılık gelen yarıçap değerleri hesaplanır. Bu aşama Şekil 10(b)'de gösterilmiştir.

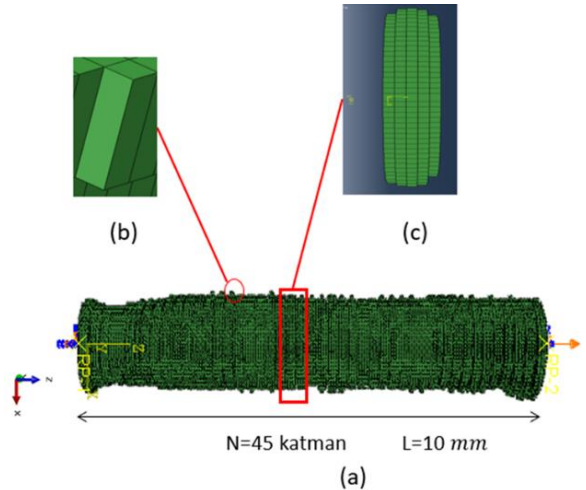
- iii. Şekil 10(a)'da gösterilen her bir nokta x ve y koordinatlarına sahiptir. O yüzden, x ve y ekseninde her bir nokta sırasıyla seçilerek farklı kombinasyonlarda nokta ikilisi oluşturulur. Noktaların birbirine olan uzaklıkları norm işlemiyle, aralarındaki açı basit geometrik ilişkilerle hesaplanır.
- iv. Bir önceki adımda oluşturulan noktalar kümesi içerisinde belirlenen iki nokta arasındaki mesafe uzaklığı L_1 , ii. adımda rassal alan yöntemiyle modellenen ve deneysel çap değerlerinin 1° açılara karşılık gelen mesafesi ise L_2 olarak tanımlanmıştır. L_1 uzaklığının L_2 uzaklığından küçük ve eşit olduğu durumlar, noktalar kümesi içerisinde seçilen herhangi bir noktanın, rassal alan ile modellenen yarıçap değerlerinin oluşturduğu çap kesiti içerisinde olduğunu gösterir. Bu nokta oluşturulması istenilen çap sınırının içerisinde yer almaktadır ve istenilen koşulu sağlamaktadır.
- v. Şekil 10(a)'da verilen noktalar kümesine ait her bir nokta kombinasyonu denendikten sonra, adım iv'te elde edilen ve istenilen koşulu sağlayan noktaların oluşturduğu matris üzerinden 4'lü noktalar seçilir. Burada bir koşul kontrolü daha yapılır. Matris içerisinde seçilen birbirine komşu 4'noktanın en az 2'si sınır içerisindeyse bu 4'lü nokta voksel elemanın XY ekseninde sınırını oluşturur. Bu işlem Şekil 10(b)-sağ üst kısımda gösterilmiştir.
- vi. Bir önceki adımın tamamlanmasıyla voksel kare elemanların x ve y eksenlerinde, 2 boyut (2B) üzerinde sınırları belirlenmiş olur. Seçilen 4 nokta yükseklik (z) ekseninde katman kalınlığı kadar ötelenerek 8 nokta küp voksel eleman oluşturulur. Oluşturulan voksel elemanlar katmanlı imalat yöntemine benzer olarak üretim yönünde (Z eksen) üst üste N adet yığılarak çubuk elemanların voksel modelleri oluşturulur (Şekil 11).

Voksel modellerin oluşturulmasında diğer bir aşama kenar profillerinin üretilene benzer elde edilmesidir. Mikroskop altında incelenen çubuk elemanlarının kenar bölgelerinin eliptik formda olduğu gözlemlenmiştir, bu durum Şekil 12(a)'da gösterilmiştir. Gözlemlenen kenar formun çubuk eleman modeline aktarılabilmesi için, tek bir katman Şekil 12(b)'de gösterildiği birden fazla voksel elemana bölünmüştür. Bu amaçla, Şekil 12(c)'de, rassal alan modellemesinden elde edilen, katmanın merkezinde konumlanan ve kırmızı ile gösterilen uzun yarıçap değerleri (r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l}) ve katmanın alt ve üst taraflarındaki siyah ile gösterilen kısa yarıçap değerleri (r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s}) arasına, elips formunu verecek ve mavi ile gösterilen iki ek uzunluk eklenmiştir. Bu ek uzunlukları hesaplamak için, uzun

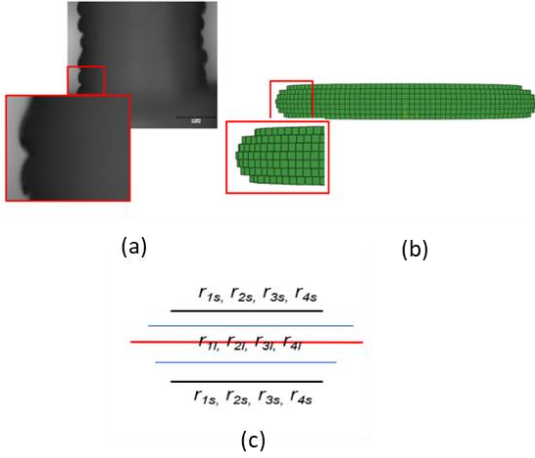
ve kısa yarıçap arasında analitik elips formülü uygulanmıştır. Söz konusu voksel elemanlar, belirlenen kesit sınırları içerisinde yerleştirilerek katman kenarlarının formu deneysel çubuk eleman numunelerini temsil edebilecek şekilde elde edilmiştir.



Şekil 10. Sınırları yarıçap değişkenleriyle belirlenen voksel elemanları oluşturacak noktalar kümesi (a) Modellenen yarıçap değişkenleri kullanılarak oluşturulan noktalar kümesi (b) Çubuk eleman kesiti içerisinde kalan voksel elemanların oluşturulmasına şematik

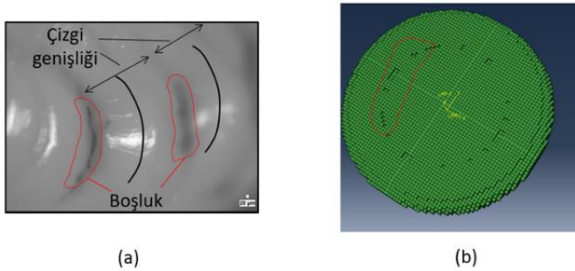


Şekil 11. Voksel elemanlar ile oluşturulan çubuk modeli (a) Çubuk eleman modeli (b) Tek bir voksel eleman (c) Çubuk eleman içerisinde belirlenen N'inci katmanın XZ ekseninde görünümü



Şekil 12. Elips formunda katman kenarlarının vksel elemanlar kullanılarak detay çubuk modellerine dahil edilmesi (a) Katman kenarının mikroskop altında görüntüsü (b) Elips formunda kenarların vksel elemanlar kullanılarak oluşturulması (c) Süreçte kullanılan yönteme ait şematik

Detay vksel modelin geliştirilmesine yönelik diğer bir aşama malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretim sırasında oluşan boşlukların çubuk modellerine dahil edilmesidir. Üretilen çubuk eleman kesitleri incelendiğinde iki filament arasında mikro boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum Şekil 13'te gösterilmiştir. Burada, söz konusu mikro boşlukların bölge-bölge oluştuğu ve çubuk eleman kesitinin yaklaşık %0,1'lik kısmına karşılık geldiği görülmüştür. Boşlukların vksel elemanlara dahil edilmesi işleminde, kesit üzerinde iki filamentin birleşim noktalarına karşılık gelen bölgelerde ölçülen boşluk miktarı kadar bir hat oluşturulur, hat içerisinde kalan vksel elemanlar silinir. Boşlukların dahil edilmesiyle elde edilen vksel model kesiti Şekil 13(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Katmanlı imalat sırasında oluşan mikro seviyede boşlukların detay vksel modellerine dahil edilmesi (a) Üretilen çubuk eleman kesitlerinin mikroskop altında incelenmesi (b) Kesit üzerinde gözlemlenen çizgisel boşluklarının vksel modellere dahil edilmesi

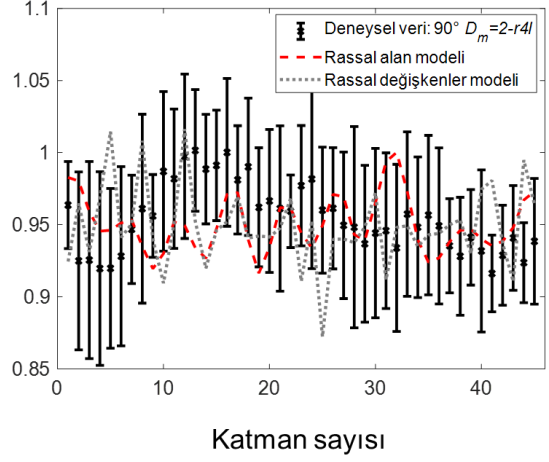
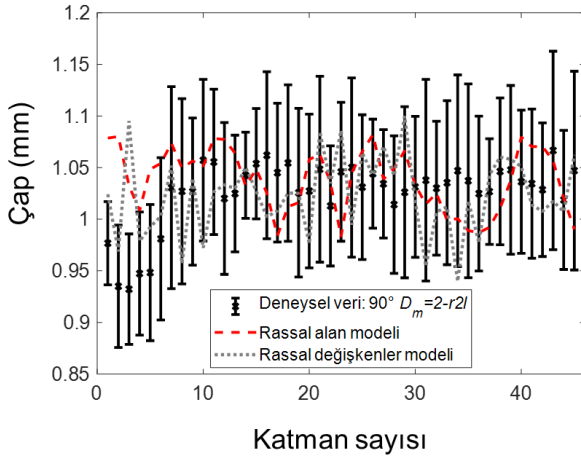
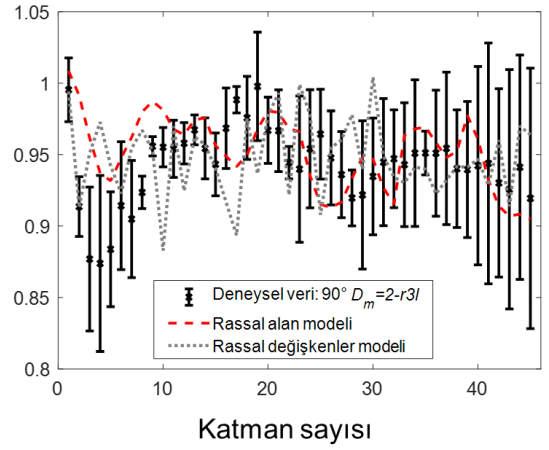
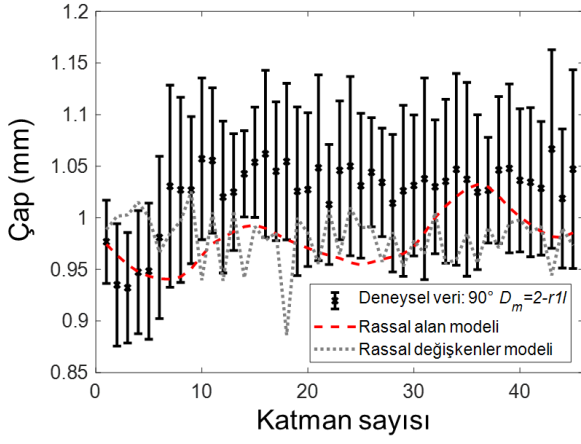
SONUÇLAR

Bu bölümde, rassal alan modellemesi yönteminin sonuçları ve bir önceki başlık altında aşamaları verilerek elde edilen değişimleri içeren sonlu eleman modelleri gösterilmiş ve SEA sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

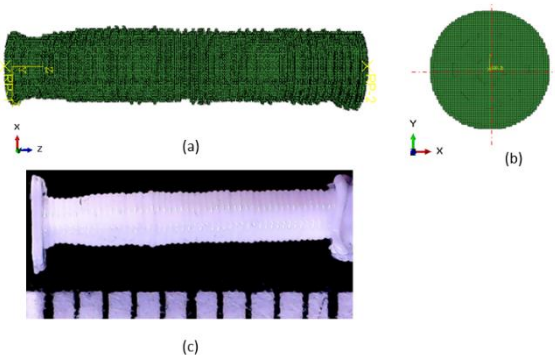
Şekil 14'te 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l} yarıçapları için rassal alan modellemesinden elde edilen sonuçlar incelenmiştir. 3 tekrar olarak üretilen çubuk eleman ölçümlerinden elde edilen çap ölçümleri, ortalama ve standart sapma aralıklarıyla birlikte verilmiştir. Ayrıca, rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleriyle modellenen çap değişimleri de benzer şekilde 3 örneklem olarak elde edilerek ortalaması alınmış, deneysel veri üzerinde ortalama eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 14'te görüldüğü üzere, rassal alan modellemesiyle elde edilen çap değerleri deneysel verilerin ortalama \pm standart sapma aralığındadır. Rassal alan modelinin deneysel verinin eğilimini ve değişim noktalarını yakalayabildiği de gözlemlenmiştir. Deneysel verinin değişkenliği, hesaplanan korelasyon mesafesi (c) ve otokorelasyon modeli rassal alan içerisindeki davranışta rol belirleyicidir. Diğer bir taraftan, rassal değişkenler yöntemiyle modellenen çap değerlerinin, çubuk eleman boyunca yüksek değişkenlikte olduğu ve konuma bağlı değişimlerin karakterize edilmesinde yetersiz kalabileceği görülmektedir. Ayrıca, 1 mm ve 2 mm çaplı çubuklar için vksel modelleme yöntemi ile oluşturulan SEA modelleri sırasıyla Şekil 15 ve 16'da üretilen numuneler ile karşılaştırmalı gösterilmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis yapılar da üretimden kaynaklanan değişim ve belirsizliklerin çubuk eleman seviyesinde karakterize edilebildiği gösterilmiştir.

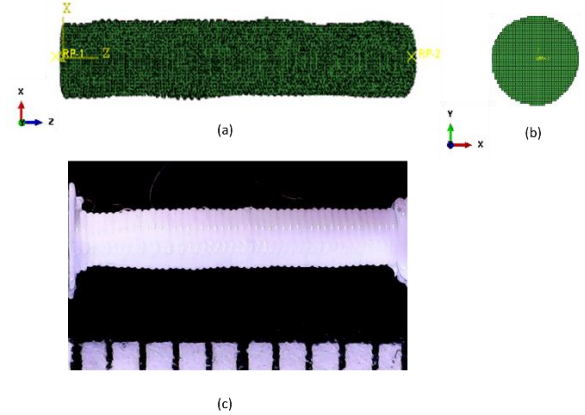
Bunlara ek olarak, 90° açıda $D_m = 1$ mm ve 2 mm çap değerinde her birinden 3 adet çubuk çekme testi numuneleri üretilmiş ve tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilmiştir.



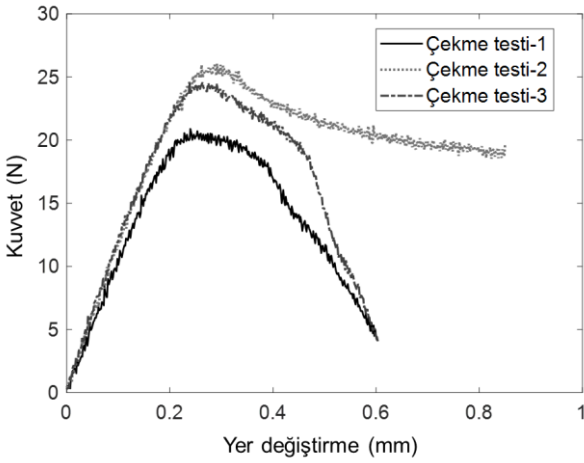
Şekil 14. 90° açı ve 2 mm çubuk elemanın çap değişimlerinin rassal değişkenler ve rassal alan modelleri sırasıyla; (a) r_{1l} , (b) r_{2l} , (c) r_{3l} , (d) r_{4l} değişkenleri



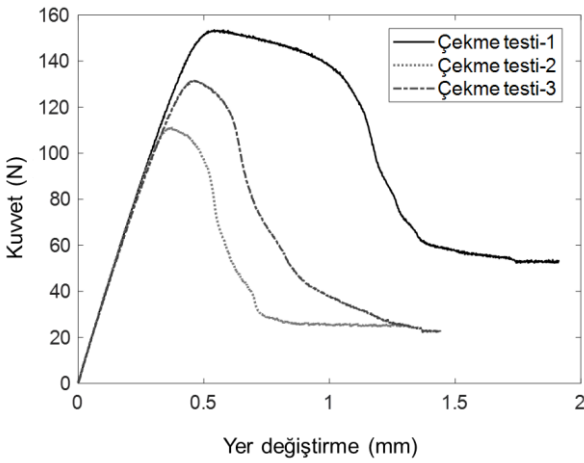
Şekil 15. 90° açı ve 1 mm çap için (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) üretilen numunenin mikroskop görüntüsü



Şekil 16. 90° açı ve 2 mm çap için (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) üretilen numunenin mikroskop görüntüsü



Şekil 17. 90° açı ve $D_m = 1$ mm çaplı numuneler için Kuvvet(N) – Yer değiştirme (mm) eğrileri

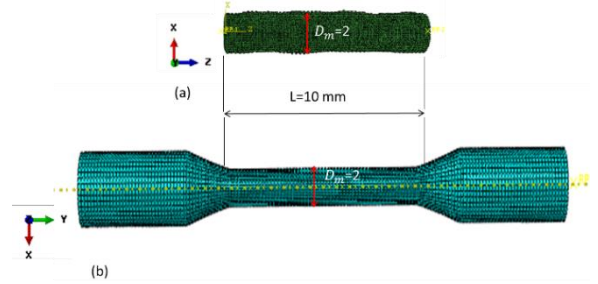


Şekil 18. 90° açı ve $D_m = 2$ mm çaplı numuneler için Kuvvet (N) – Yer değiştirme (mm) eğrileri

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, $D_m = 1$ mm çap değerinde üretilen çubuk elemanlar üzerinde oluşan reaksiyon kuvvetlerinin, beklenildiği üzere daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, üretilen çubuk elemanlarda çap değerinin azalmasıyla birlikte boyut hassasiyetinin düşmesi ve kenar profillerinde görülen değişkenliğin artması, $D_m = 1$ mm çubuk elemanın eğrilerinde dalgalanma ve süreksizliklere neden olmuştur (Şekil 17). Çap değerinin $D_m = 2$ mm değerine artırılmasıyla birlikte doğrusal elastik bölge üzerinde sürekli ve net bir eğilim elde edilmiştir (Şekil 18). Bunun nedeni artan üretim çapıyla birlikte üretim sürecinde oluşabilecek değişim ve kusurların azalması, numunenin yüzey ve boyut hassasiyetinin ise artmasıdır.

Çekme testi sonuçlarıyla karşılaştırmak üzere 3 farklı SEA modeli bulunmaktadır. Bunlardan ilk ikisi, Şekil 19(a)'da gösterilen vokseller model yöntemi ile oluşturulan, materyal ve yöntem başlığı altında verilen adımlardan elde edilen deneysel ölçümlerle elde

edilen rassal değişken ve rassal alan yöntemleri kullanılarak oluşturulan modellerdir. Diğer model ise, Şekil 19(b)'de gösterilen ve üretimden kaynaklanan değişimleri içermeyen, çubuk eleman çekme testi numunesinin CAD modelinden oluşturulmuş SEA modelidir. Karşılaştırma yapılacağı için, çekme testi simülasyon modelinin deney parçası boyunun (gauge length), tek çubuk rassal değişken ve rassal alan modellerinin uzunluğuna ($L=10$ mm) eşit alınmıştır.



Şekil 19. 90° açı ve 2 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait simülasyon modelleri (a) Değişimleri içeren detay tek çubuk modeli (b) tek çubuk çekme testi numune modeli

ABAQUS yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, sınır koşulları, alt ve üst referans noktaları aracılığıyla çoklu nokta kısıtlaması (multiple point constraint) ile tanımlanmıştır. Modeller, alt referans noktası sabitlenerek, üst referans noktası üzerinden tek eksenli yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan elastik modül değerleri, deneysel testlerden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri üzerine %0,2 öteleme (%0.2 offset line) eğrisi yöntemi uygulanarak elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen akma gerilmesi değerine karşılık gelen nokta kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerine yansıtılarak sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak kuvvet ve yer değiştirme belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, deneysel çekme testi sınır koşulları simülasyon modellerine uygulanmıştır. Elde edilen SEA sonuçları Tablo 3 ve 4'te listelenmiştir.

Her iki numune için de deneysel ve simülasyon sonuçları irdelendiğinde, değişimlerin dahil edilmediği, çekme testi numunesinin standart bilgisayar modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçların, test sonuçlarına oranla yaklaşık 2-2,3 kat daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, üretim sırasında gerçekleşen geometrik değişimlerin rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleriyle karakterize edilerek, çubuk eleman modellerine dahil edildiği detay simülasyon modellerinin deneysel çekme testi sonuçlarına daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle rassal alan yöntemiyle elde edilen sonuçların deneysel çekme testi sonuçlarına daha yakın eğilimde olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. $D_m = 1$ mm için tepki kuvveti sonuçları (N)

Test/SEA no	1	2	3
Çekme testi (DeneySEL)	13,789	16,607	17,464
Çekme testi (Simülasyon)	6,282	7,844	8,371
Rassal değişken modeli	11,310	14,120	15,060
Rassal alan modeli	12,630	15,760	16,810

Tablo 4. $D_m = 2$ mm için tepki kuvveti sonuçları (N)

Test/SEA no	1	2	3
Çekme testi (DeneySEL)	126,358	82,036	106,901
Çekme testi (Simülasyon)	55,320	35,990	46,850
Rassal değişken modeli	87,870	57,900	74,780
Rassal alan modeli	91,260	60,190	77,700

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis yapılar, üretimden kaynaklanan değişimler (çap değişimleri, boşluklar) konuma bağlı olarak rassal alan yöntemi kullanılarak modellenmiş ve elde edilen SEA sonuçları çekme deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Rassal alan yöntemiyle modellenen çap değişimleri voksel elemanlar kullanılarak oluşturulan SEA modellerine dahil edilmiştir. Ayrıca, üretilen çubuk eleman numunelerinin mikroskop altında incelenmesiyle gözlemlenen mikro boşluklar da voksel elemanlar kullanılarak çubuk eleman modellerine dahil edilmiştir. Böylece, üretim sürecinde oluşan belirsizlikler ile çubuk elemanların üretilene benzer SEA modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, rassal alan kullanılarak elde edilen SEA sonuçlarının, değişimlerin hiç dahil olmadığı SEA sonuçlarına ve belirsizliklerin rassal değişkenler ile dahil edildiği SEA sonuçlarına göre, çekme deneyi sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Böylece, üretimde oluşan farklılıklar karakterize edilerek sonlu elemanlar simülasyonlarından elde edilecek sonuçların doğruluğu artırılmıştır. Çalışma kapsamında yakın gelecekte farklı açı (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°) değerlerine sahip çubuk numuneler için de testler ve simülasyonlar gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece, farklı açılarda çubuk

elemanlara sahip latis hücrelerin simülasyonlarında üretimden kaynaklı değişimlerin dahil edilmesi ile yüksek doğrulukta sonuçlar alınabilecektir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın tamamlanmasında 118M715 numaralı proje kapsamında sağlanan finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Teknoloji Merkezine deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve yüksek lisans öğrencisi Deniz Baran'a sağladığı destek için teşekkür ederler.

SPATIALLY DEPENDENT STATISTICAL MODELING OF GEOMETRIC VARIATIONS IN ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

The content of this study is the modeling of the geometric variations introduced by the material extrusion method on the strut members of lattice structures using advanced statistical methods based on the spatial dependency and investigating their inclusion to the simulation models. For this purpose, strut member specimens with different diameter values are fabricated using the material extrusion technique. The specimens are examined by a digital light microscope and the measurements are done for the fabricated diameter variations. These variations are characterized using the random field method which is commonly used for modeling the spatially dependent variations. These variations modeled by the random field method are integrated into the finite element models by using voxel elements. The results of the finite element analysis that includes the fabricated specimen models with spatial variations are compared with the tensile test results obtained for the fabricated strut specimens. The developed model can be extended to different additive manufacturing techniques and the variations observed in the fabricated geometry and material properties can be characterized.

Keywords: Additive Manufacturing, Material Extrusion, Lattice Structure, Finite Element Method, Random Field.

KAYNAKÇA

1. Cahill, S., Lohfeld, S., and McHugh, P. E., 2009, "Finite Element Predictions Compared to Experimental Results for the Effective Modulus of Bone Tissue Engineering Scaffolds Fabricated by Selective Laser Sintering," J. Mater. Sci. Mater. Med., **20**(6), pp. 1255–1262.
2. Gümrük, R., and Mines, R. A. W., 2013, "Compressive Behaviour of Stainless Steel

- Micro-Lattice Structures,” *Int. J. Mech. Sci.*, **68**, pp. 125–139.
3. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J. E., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., and Attallah, M. M., 2015, “Influence of Processing Conditions on Strut Structure and Compressive Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting,” *Mater. Sci. Eng. A*, **628**, pp. 188–197.
 4. Karamooz Ravari, M. R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., and Rezaei, R., 2014, “Numerical Investigation on Mechanical Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Fused Deposition Modeling,” *Int. J. Mech. Sci.*, **88**, pp. 154–161.
 5. Gorguluarslan, R. M., Choi, S. K., and Saldana, C. J., 2017, “Uncertainty Quantification and Validation of 3D Lattice Scaffolds for Computer-Aided Biomedical Applications,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **71**, pp. 428–440.
 6. Melancon, D., Bagheri, Z. S., Johnston, R. B., Liu, L., Tanzer, M., and Pasini, D., 2017, “Mechanical Characterization of Structurally Porous Biomaterials Built via Additive Manufacturing: Experiments, Predictive Models, and Design Maps for Load-Bearing Bone Replacement Implants,” *Acta Biomater.*, **63**, pp. 350–368.
 7. Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., Wang, P., and Fang, D., 2019, “Evaluation of Compressive Properties of SLM-Fabricated Multi-Layer Lattice Structures by Experimental Test and μ -CT-Based Finite Element Analysis,” *Mater. Des.*, **169**.
 8. Gungor, O. U., and Gorguluarslan, R. M., 2020, “Experimental Characterization of Spatial Variability for Random Field Modeling on Struts of Additively Manufactured Lattice Structures,” *Addit. Manuf.*, **36**.
 9. Devore, J. L., 1991, “Probability and Statistics for Engineering and the Sciences,” *Biometrics*, **47**(4), p. 1638.
 10. [10] Wang, Y., Li, S., Yu, Y., Xin, Y., Zhang, X., Zhang, Q., and Wang, S., 2020, “Lattice Structure Design Optimization Coupling Anisotropy and Constraints of Additive Manufacturing,” *Mater. Des.*, **196**, p. 109089.
 11. Persenot, T., Burr, A., Martin, G., ... J. B.-I. J. of, and 2019, undefined, “Effect of Build Orientation on the Fatigue Properties of As-Built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V Alloy,” Elsevier.
 12. Choi, S. K., Canfield, R. A., and Grandhi, R. V., 2007, *Reliability-Based Structural Design*.
 13. Jiang, P., Rifat, M., and Basu, S., 2020, “Impact of Surface Roughness and Porosity on Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing- A Computational Study,” *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., pp. 781–789.
 14. Kim, N., Yang, C., Lee, H., and Aluru, N. R., 2019, “Spatial Uncertainty Modeling for Surface Roughness of Additively Manufactured Microstructures via Image Segmentation,” *Appl. Sci.*, **9**(6), p. 1093.
 15. Ghanem, R. G., and Spanos, P. D., 1991, *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*.
 16. Sriramula, S., and Chryssanthopoulos, M. K., 2013, “An Experimental Characterisation of Spatial Variability in GFRP Composite Panels,” *Struct. Saf.*, **42**, pp. 1–11.
 17. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C., 2013, *Time Series Analysis: Forecasting and Control: Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, NJ.
 18. Gungor, O. U., and Gorguluarslan, R. M., 2020, “Experimental Characterization of Spatial Variability for Random Field Modeling on Struts of Additively Manufactured Lattice Structures,” *Addit. Manuf.*, **36**, p. 101471.
 19. Ghanem, R. G., and Spanos, P. D., 1991, “Spectral Stochastic Finite-Element Formulation for Reliability Analysis,” *J. Eng. Mech.*, **117**(10), pp. 2351–2372.
 20. Sudret, B., California, A. D. K.-U. of, Berkeley, U., and 2000, U., “Stochastic Finite Elements and Reliability: A State-of-the-Art Report.”
 21. Gorguluarslan, R. M., Park, S.-I., Rosen, D. W., and Choi, S.-K., 2015, “A Multilevel Upscaling Method for Material Characterization of Additively Manufactured Part under Uncertainties,” *J. Mech. Des.*, **11**, p. 111408.
 22. Park, S. in, Watanabe, N., and Rosen, D. W., 2018, “Estimating Failure of Material Extrusion Truss Structures Based on Deposition Modeling and a Cohesive Zone Model,” *Mater. Des.*, **147**, pp. 122–133.