



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Eşit Miktarda Filament Kullanımı İle Eğilme Mukavemetine Göre Kesit Geometrisi Optimizasyonu

Hüseyin Alp ÇETİNDAG^{a*}, İhsan TOKTAŞ^b, Murat Tolga ÖZKAN^c

^a*Institute of Natural and Applied Sciences, Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey,*

^b*Yıldırım Beyazıt University, Mechanical Engineering Department 06020 Keçiören, Ankara, Turkey,*

^c*Gazi University Faculty of Technology, Industrial Design Engineering Department, 06500 Ankara, Turkey*

* E-mail: h.a.cetindag@outlook.com

ÖZET

Bu çalışmada, farklı kesit geometri şekillerine sahip fakat eşit kesit alanlarında ve boylarında, yani eşit miktarda filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin eğilme mukavemeti bakımından dayanıklılık esaslı bir sıralanmasının yapılması hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modellemede ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filament miktarı, üretim zamanı ve harcanan enerjiden bağımsız olarak, tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Modellenen ankastre kirişlerin uzunluğu ve uygulanan eğilme momentleri sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometri biçimleri (çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değişken olarak alınmıştır. 6 kesit geometrisine, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet ankastre kiriş tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, sonra Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve Regresyon Analizi (RA) ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşüğe doğru gerilmelere ve deformasyonlara uğrayan kesit geometrisi biçimleri sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Filament, Ankastre Kiriş, Eğilme, Optimizasyon*

Optimization Of Cross Sectional Geometry of 3d Printed Beams According To Pure Bending Strength with the Same Amount of Filament

ABSTRACT

In this study, it was aimed to sort 3D printed beams that will be produced with the same amount of filament according to bending strength. Thus a ranking was performed due to performance of the design points independently from the production time, energy consumption and amount of filament which is frequently used at rapid prototyping and manufacturing of plastic parts. Length of the modelled beams and the applied moments were kept constant, cross sectional geometries (circle, rectangle, equilateral triangle, rhomboid, ellipse and rounded rectangle) were taken as variables. Totally 2424 design alternatives of beams were created depending on 6 cross sectional geometries, 101 cross sectional areas and 4 different materials. These design alternatives were mathematically modelled and then they were tested with Finite Element Analysis (FEA) and Regression Analysis (RA). Models were compared to each other statistically. At the end of the analyses, cross sectional

geometries were ascendingly sorted with respect to stress values and deformations.

Keywords: Filament, Beam, Bending, Optimization

I. GİRİŞ

Kesit şekli ve malzeme cinsi, imal edilecek ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu amaçla, kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan, kesit geometrisine göre, bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde, farklı kesit tiplerine göre yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte, kesit geometrisi ve eşit miktarda malzeme kullanımına göre, bir dayanıklılık sıralama yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü, eşit miktarda malzeme kullanarak, zorlanma şiddetine bağlı olarak, eğilme değerlerine dayalı, malzeme cinsine göre, kesit sıralaması yapılmasıdır.

Günümüzde 3B baskı teknolojisi, özellikle ağır sanayi dışındaki ofislerde, Hızlı Prototip (Rapid Prototyping-RP) için kolaylıkla kullanılmakta ve farklı malzeme türlerinde çalışmaya imkân sağlamaktadır. Kuyumculuk, ayakkabı üretimi, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, gıda ve tıp gibi birçok alanda bu teknoloji yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [1]. Tasarım geliştirmede en önemli uygulamalardan biri tıbbi modellerin imalatıdır [2,3]. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing) veya 3D baskı, şirketlerin şu ana kadar elde etmeyi imkânsız gördüğü şekle sahip parçaların üretimine izin vererek, üretim yöntemleri arasında bir devrim meydana getirmiştir. 3B baskı teknolojisinde, en yaygın kullanılan malzemeler, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleridir. Kiriş modelinde, boyut ve uygulanan kuvvet veya moment sabit tutulduğunda, farklı malzeme ve içi dolu temel kesit geometriler kullanılması dayanımda değişken sonuçlar verebilir. Bu da, tasarımcının uygun malzeme ve kesit geometrisi seçimi ile filament sarfiyatını tahmin etmesine yardımcı olabilir [4-7].

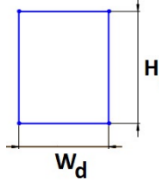
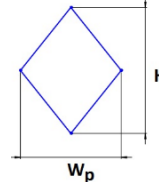
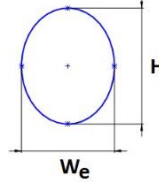
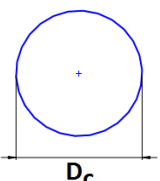
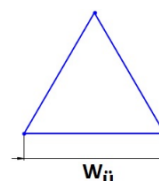
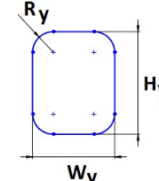
Bu çalışma, 3D baskı aracılığıyla üretilecek olan kirişlerdeki, eğilme mukavemeti ve gerinimi; regresyon analizi, sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla elde edip karşılaştırmayı hedeflemektedir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden bağımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

II. YÖNTEM

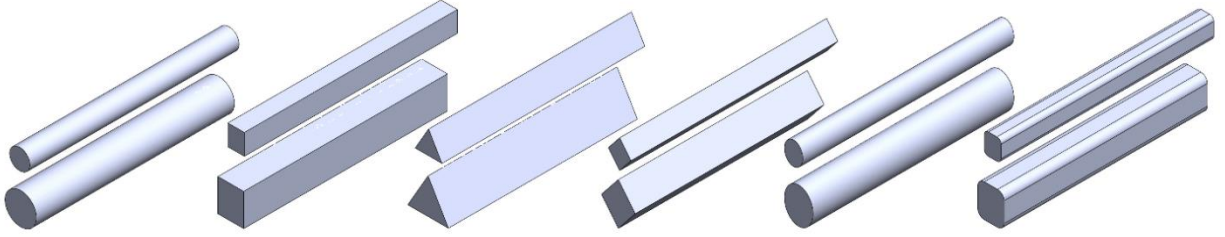
A. TASARIMLARIN HAZIRLANMASI

Analiz ve hesaplamalarda kullanılması için üç temel şekil (çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen) kullanılmış, daha sonra bunlara paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen de eklenmiştir. Bu şekilleri oluşturan ölçüler arasındaki en, boy ve çap oranları sabit tutulmuştur. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve boyut aralıkları

Dikdörtgen		Paralelkenar		Elips	
	$H_d/W_d = 1,5$ H_d : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm W_d : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm		$H_p/W_p = 1,5$ H_p : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm W_p : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm		$H_e/W_e = 1,5$ H_e : min: 2,185 mm, max: 3,568 mm W_e : min: 1,748 mm, max: 2,855 mm
Çember		Üçgen (eşkenar)		Yuvarlatılmış Dikdörtgen	
	$D_ç$: min: 1,954 mm, max: 3,192 mm		$W_ü$: min: 2,632 mm, max: 4,210 mm		$H_y/W_y = 1,5$ $W_y/R_y = 4$ H_e : min: 1,97 mm, max: 3,232 mm W_e : min: 1,584 mm, max: 2,586 mm R_y : min: 0,396 mm, max: 0,646 mm

Seçilen bu kesitlerin, kiriş uzunlukları 20 mm olarak sabit tutulmuş, kesit alanları ise 3 mm² den 8 mm² ye kadar 0,05 mm² aralıklarla artırılmıştır. Böylece, 101 adet kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan, en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Soldan sağa doğru sırasıyla; çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. (Kesit alanı üstte 3 mm², altta ise 8 mm² dir)

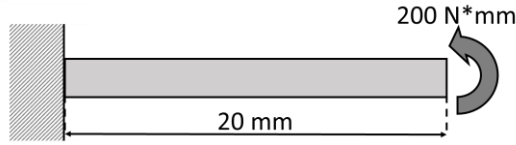
Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 ankastré kiriş tasarımına, 3D baskı tekniğinde sıkça kullanılan; ABS (AcrylanitrileButadieneStyrene), PLA (PolylacticAcid), PETG (Polyethyleneterephthalateglycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri uygulanmıştır. Bu sayede, toplam 2424 adet birbirinden farklı tasarım oluşturulmuştur. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

	Elastikiyet Modülü (Eğilme) MPa	Poisson's Oranı	Özkütle - ρ - g/cm ³
ABS	2250	0,35	1,05
PLA	3500	0,36	1,24
PETG	2100	0,4	1,27
PC	2344	0,37	1,21

B. ANALİZLERİN YÜRÜTÜLMESİ

Elde edilen bütün tasarımlar, aynı moment çifti altında analiz edilmiştir. 200 N büyüklüğündeki bu moment çiftikirişin iki ucuna uygulanmıştır. Öncelikle bilindik mukavemet formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, sonuçlar Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve Regresyon Analizi (RA) kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar istatistiksel olarak karşılaştırılarak, mukavemet yönünden güçlü tasarımların saptanması amaçlanmıştır.



Şekil 2. Ankastré kiriş modeli

B.1. ANALİTİK HESAPLAMA

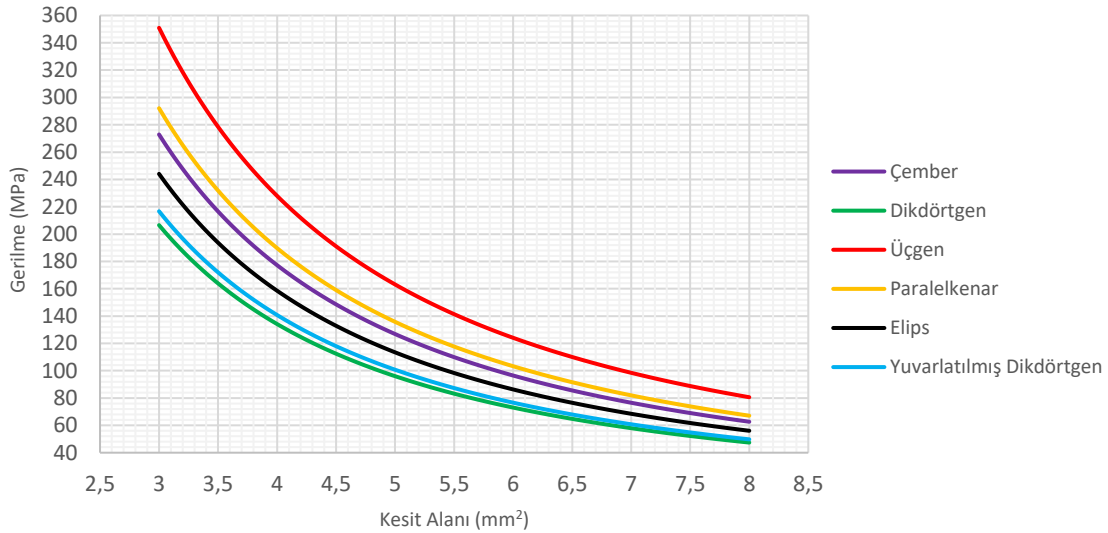
Maksimum eğilme gerilmesi Denklem (1), gerinim ve yer değiştirme ise sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) ile hesaplanmıştır [8].

$$\sigma_n = \frac{M * c_{maks.}}{I_{maks.}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_n}{E} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

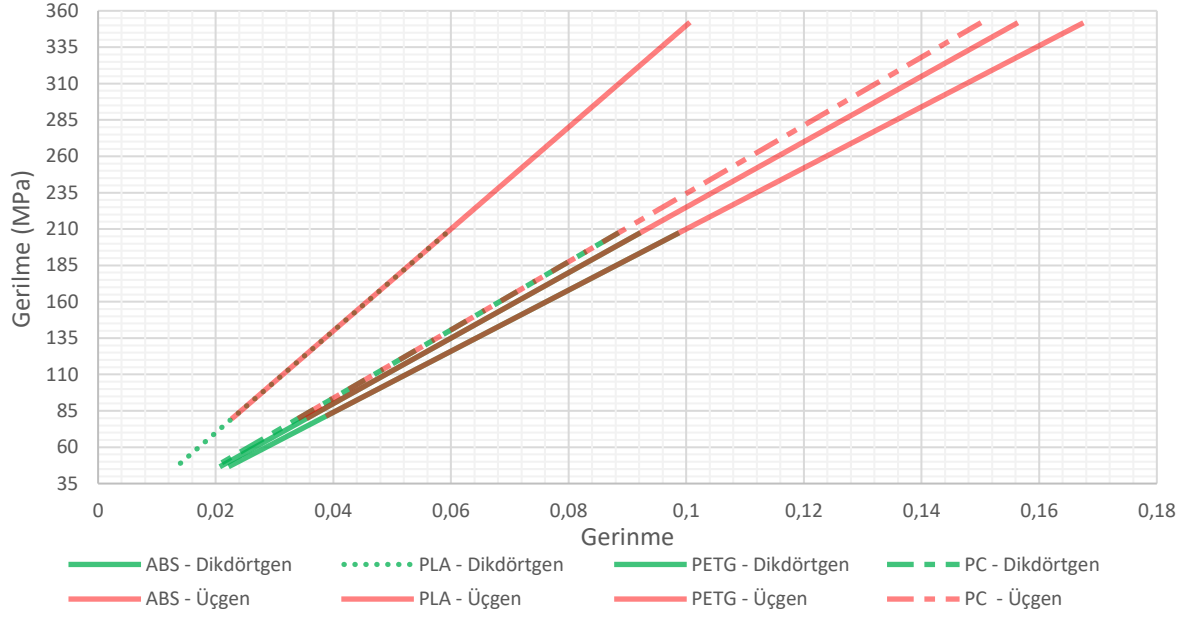
$$\delta_{maks.} = \frac{M * L^2}{2 * E * I_{maks.}} \quad (3)$$

Burada σ_n ortaya çıkan maksimum gerilmeyi, M uygulanan momenti, c kütle merkezine olan uzaklığı, I , c doğrultusundaki eylemsizlik momentini, ε gerinmeyi, L kirişin uzunluğunu, E ise elastikiyet modülünü ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda c ve I değerlerini etkilediği için kesit şekli son derece önemlidir. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Şekil 3 te gösterilmiştir.



Şekil 3. Seçilen kesit geometrileri için kesit alanının oluşan gerilmeye etkisi

Elde edilen grafiğe bakıldığında üçgen kesite sahip şeklin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir. Gerilme yoğunluğunun en düşük olduğu kesit ise dikdörtgen olmuştur. Bu iki kesit alanına dört farklı malzemenin uygulanması sonucunda Şekil 4 elde edilmiştir.



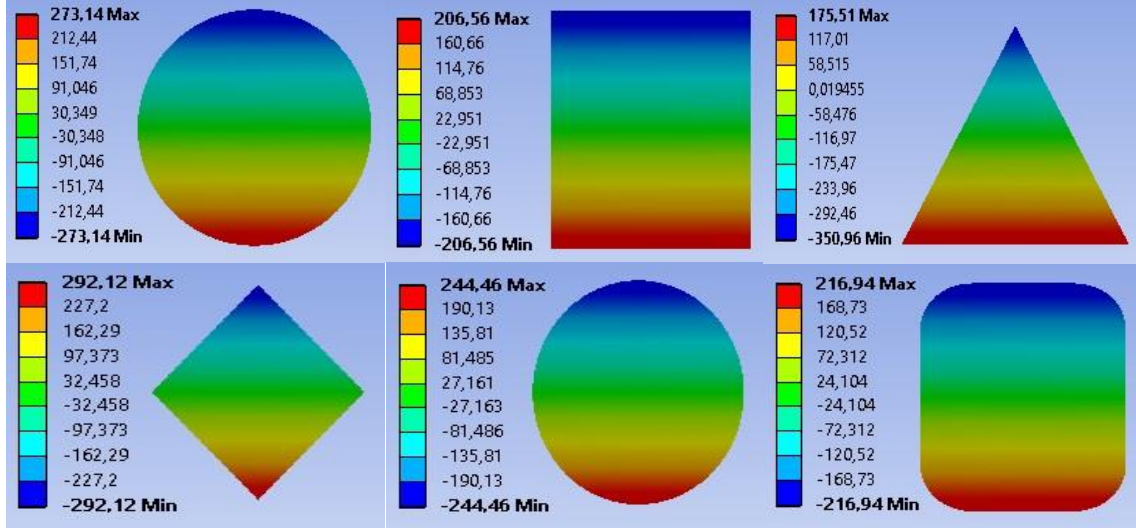
Şekil 4. Seçilen malzemeler için gerilmenin gerilme üzerine etkisi

Kesit şeklinin yanı sıra malzemenin de büyük bir etkiye sahip olduğu Şekil 4te görülmektedir. En yüksek mukavemeti gösteren PLA malzemesi ve dikdörtgen kesit ile elde edilen kiriş en güçlü tasarım olmuştur. Bunun dışında arzu edilen gerilme değerine göre kesit şekli, kesit alanı ve malzeme cinsine göre seçim yapmak Şekil 4 sayesinde mümkün olmaktadır.

B.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (SEA)

Oluşturulan katı modellerin sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımı ile çözülmüştür. Çözümlemelerden önce yapılan “mesh” uygulamasında parçaları oluşturan “element” ve “node” sayılarına dikkat edilerek, tasarımları en iyi şekilde analiz edecek “mesh” yapılarının kurulmasına özen gösterilmiştir. Daha sonra parametrik analiz aracılığıyla bütün modeller sistematik bir şekilde çözümlenmiştir.

Eğilme analizi sınır şartı olarak; farklı kesit tiplerindeki tasarım modellerine her iki uçtan, eşit şiddetli, birbirine zıt yönlü, 200 Nmm büyüklüğünde momentler uygulanmıştır. Analizler sonucunda eğilmeden kaynaklanan maksimum yer değiştirme (sehim), parçadaki gerilme değerleri hesaplanmıştır. Farklı geometrideki parçaların orta kesitinde meydana gelen gerilmeler Şekil 5te gösterilmiştir.



Şekil 5. 3mm² kesit alanına sahip tasarımların ortasında oluşan gerilmeler

Yukarıda görüldüğü üzere parçalar ağırlık merkezinin üstünde “basma”, altında ise eşit büyüklükte “çekme” gerilmesine maruz kalmıştır. Bu duruma uymayan tek tasarım eşkenar üçgen kesite sahip olmaktadır. Eşkenar üçgen dikey doğrultuda simetrik değildir ve ağırlık merkezi aşağıdan yukarıya doğru ölçüldüğünde toplam yüksekliğin üçte biri kadardır. Bu yüzden üçgen kesitli parçaların üst kısmında oluşan gerilme alt kısımda oluşan gerilmenin iki katı kadardır. Elde edilen sonuçlar analitik hesaplamalarla karşılaştırıldığında aradaki farkın çok düşük olduğu görülmüştür. Bu fark istatistiksel analiz yapılarak incelenmiştir. Bu incelemede aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır; [9]

$$RMS = \left(\frac{1}{p} * \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - t_j)^2}{\sum_j o_j^2} \right) \quad (5)$$

$$Ort. \%Hata = \frac{\sum_j \left(\frac{t_j - o_j}{t_j} * 100 \right)}{p} \quad (6)$$

Denklem 4, Denklem 5 ve Denklem 6 kullanılarak deformasyon, gerilme ve gerinim sapmaları bulunmuştur. Kesit alanı, kesit geometrisi veya malzeme gözetmeksizin yapılan bu hesaplamalar sayesinde SEA ile yapılan analizlerin doğruluğu belirlenmiştir. Bunun yanında herhangi bir tasarımda ortaya çıkan en büyük ve en küçük sapmalar da saptanmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3 te verilmiştir.

Çizelge 3. Deformasyon, kirişlerin ortasındaki gerinme, gerilme hesaplamaları için analitik çözüm ve SEA arasındaki sapma değerleri

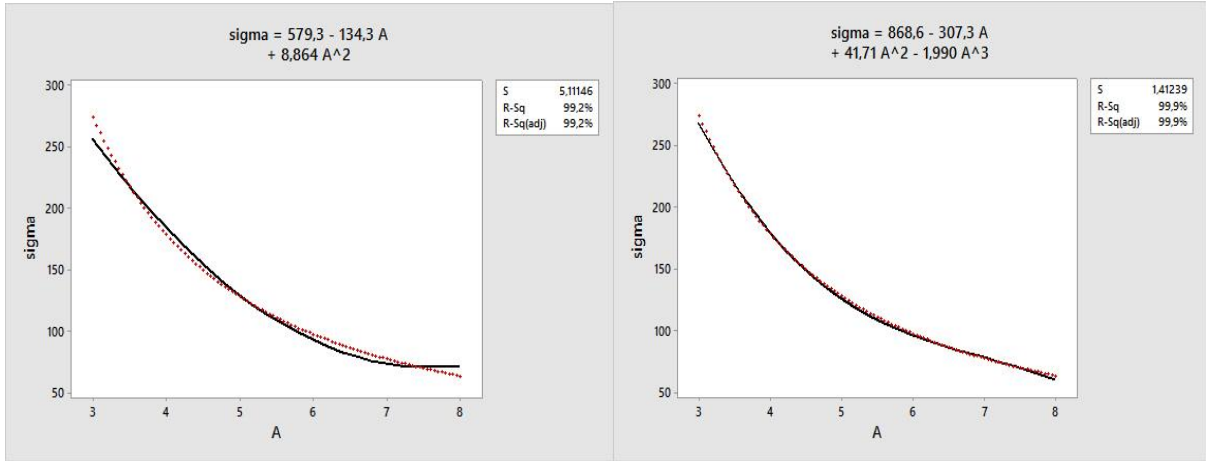
	RMS	R ²	Ort. % Hata	Maks. Sapma (%)
Deformasyon	0,0122010625	0,9999158350	0,7320639983	0,0341989350
Gerinim	0,0000645068	0,9999999172	0,0813308379	0,0004857430
Gerilme	0,2541693643	0,9994749253	0,1028730135	1,8780593900

Düşük sapma gösteren bir karşılaştırmada “RMS” ve “R²” değerlerinin sırasıyla 0 ve 1’e yakın, “Ort % Hata” değerinin ise mümkün olduğunca düşük değerlerde olması gerekmektedir. Gerilme analizlerindeki sapma değerleri; deformasyon ve gerilme değerlerine göre biraz daha yüksek olsa da bütün değerler yapılan SEA’nın yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

B3. Regresyon Analizi (RA)

SEA ve analitik hesaplamalarda normal gerilme ve normal gerinimler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma SEA’nın doğruluğunu ortaya çıkarsa da kirişler üzerinde oluşan gerçek gerilme ve gerinimler tam olarak belirlenememiştir. Bu gerçek (Von-Mises) gerilme ve gerinim değerleri SEA ile hesaplandıktan sonra regresyon analizi ile elden geçirilmiştir.

Regresyon analizinde çıktılar gerilme, girdiler ise kesit alanı olarak belirlenmiştir. Model olarak İkinci derece regresyon seçilmiş, güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan istenen verim alınmadığı için ikinci derece yerine üçüncü dereceden regresyon analizi yapılmıştır. Dairesel kesitli eleman için hem ikinci dereceden hem de üçüncü dereceden oluşturulan regresyon modelleri Şekil 6’da birlikte gösterilmiştir.



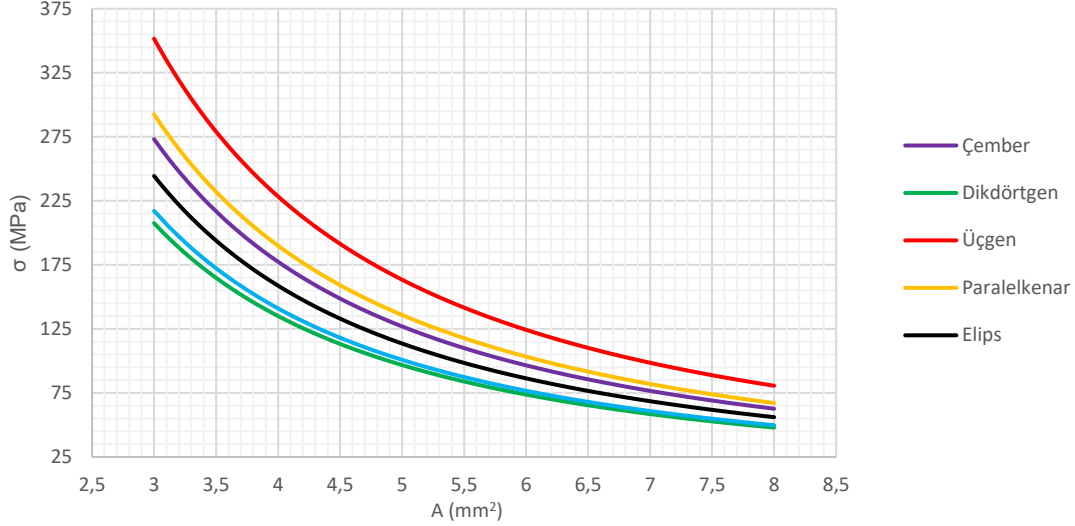
Şekil 6. Dairesel alana sahip kiriş için yapılan ikinci (solda) ve üçüncü (sağda) dereceden regresyon analizleri

Grafikte kırmızı noktalar girilen değerleri, siyah çizgi ise oluşturulan eğriyi göstermektedir. Yukarıda gösterilen eğrilere bakıldığında sağdakinin soldakine göre daha iyi bir uyum sağladığı açıkça görülmektedir. Aynı yöntemle diğer kesit alanları için elde edilen “gerilme-kesit” alanı denklemleri Çizelge 4 te verilmiştir.

Çizelge 4. Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ve katsayılar (σ = gerilme, A = kesit alanı)

	Denklem	R ²	S
Çember	$\sigma = 868,6 - (307,3 A) + (41,47 A^2) - (1,990 A^3)$	0,999	1,41239
Dikdörtgen	$\sigma = 658,2 - (22,5 A) + (31,54 A^2) - (1,505 A^3)$	0,999	1,06725
Üçgen	$\sigma = 1117 - (395,2 A) + (53,62 A^2) - (2,559 A^3)$	0,999	1,81542
Paralelkenar	$\sigma = 930,3 - (329,2 A) + (44,67 A^2) - (2,132 A^3)$	0,999	1,51196
Elips	$\sigma = 777,2 - (275,0 A) + (37,32 A^2) - (1,781 A^3)$	0,999	1,26565
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$\sigma = 691,6 - (244,9 A) + (33,25 A^2) - (1,587 A^3)$	0,999	1,12523

R² değerlerine bakıldığında hepsinin de “1” e çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sayede yapılan regresyon analizlerinin iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Çizelge 4’ teki denklemler kullanılarak Şekil 6 oluşturulmuştur.



Şekil 7. Regresyon analiziyle elde edilen maksimum gerilme değerlerinin kesit alanına göre değişimi

Yukardaki grafiğe bakıldığında, kesit şekli performansı bakımından Şekil 3'e benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kirişin orta kesitinde olduğu gibi, parça genelinde de en büyük ve en küçük gerilmeler sırasıyla üçgen ve dikdörtgen kesitlerde ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan gerilmeler ise Şekil 3'e göre gerçeğe daha yakındır.

III. BULGULAR TARTIŞMA ve SONUÇ

Bütün kiriş çeşitleri önce analitik olarak çözümlenmiş daha sonra sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu iki yöntem kıyaslandığında *Ort%Hata* değerleri deformasyon, gerinme ve gerilme değerlerinin için sırasıyla 0,7320639983, 0,0813308379 ve 0,1028730135 olduğu görülmektedir. Elde edilen bu düşük sapma değerleri sayesinde yapılan sonlu elemanlar analizinin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen gerçek stres değerleri regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda kesit şekline bağlı olarak, kiriş üzerinde oluşan en büyük gerilmenin kesit alanına bağlı denklemleri elde edilmiştir. Regresyon analizinin R^2 değeri 0,999'dur ve bu değer 1'e yakınlığı kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

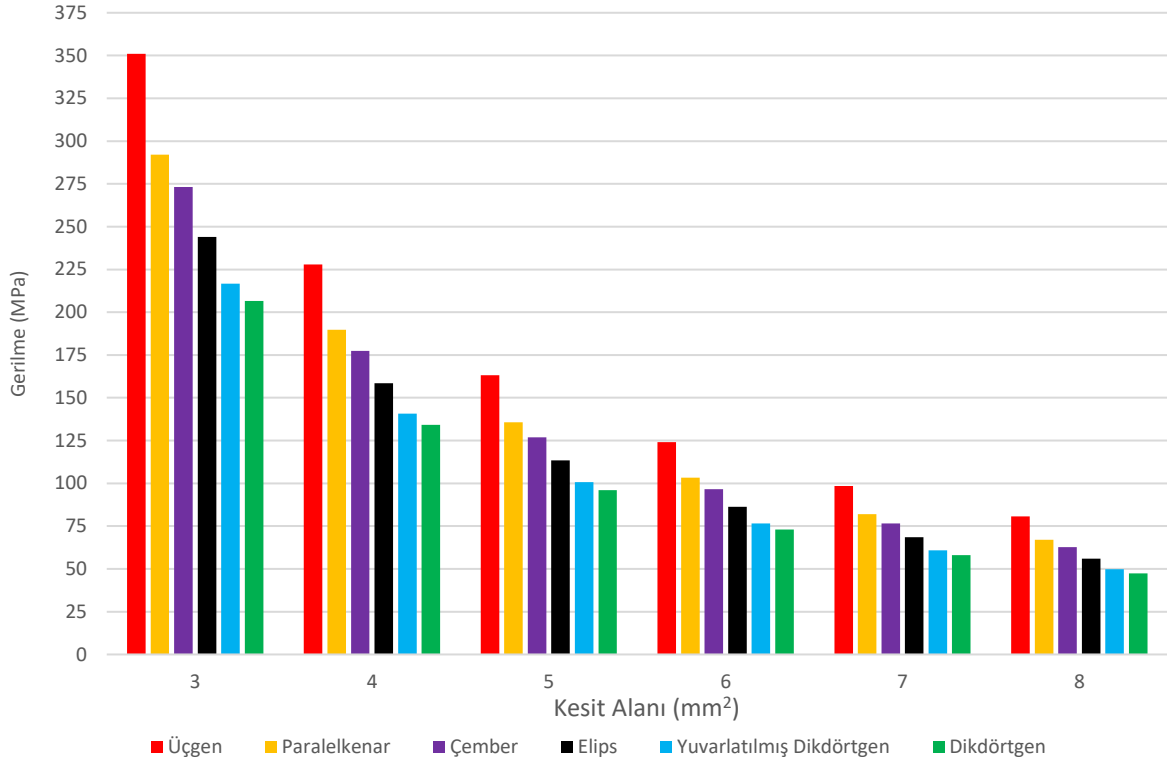
Ortaya çıkan gerilme yönünden dikdörtgenin en iyi performansı sergilediği Şekil 3 ve Şekil 7 de açıkça görülmektedir. Bu kesit şeklinin diğer kesit geometrilerine göre performansı Çizelge 5 te verilmiştir. Çizelgede yer alan değerlerin başındaki "-" işareti performansın ideale göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5 Kesit geometrilerinin gerilme yönünden Dikdörtgen kesite göre performansı

	Yuvarlatılmış Dikdörtgen	Elips	Çember	Paralelkenar	Üçgen
Performans (%)	-4,910	-18,164	-32,232	-41,421	-69,904

Çizelge 5'te de görüldüğü üzere kesitler arasında %69,7 lere varan gerilme farkları oluşmuştur. En düşük fark ise dikdörtgen ve yuvarlatılmış dikdörtgen arasındaki %4,9 luk farktır. Dikdörtgenin köşelerindeki yuvarlatma işlemi bu farkın oluşmasının temel etkenidir. Bunun dışında elips, çember ve paralelkenar sırasıyla %18, %32 ve %41 daha düşük performans sergilemiştir. Oluşan gerilmeler

sadece kesit şekli ve kesit alanına bağlı olduğundan malzemeler dikkate alınmamıştır. Kesitler arasındaki gerilmeye dayalı ilişkiyi daha iyi göstermek amacıyla Şekil 8 oluşturulmuştur.



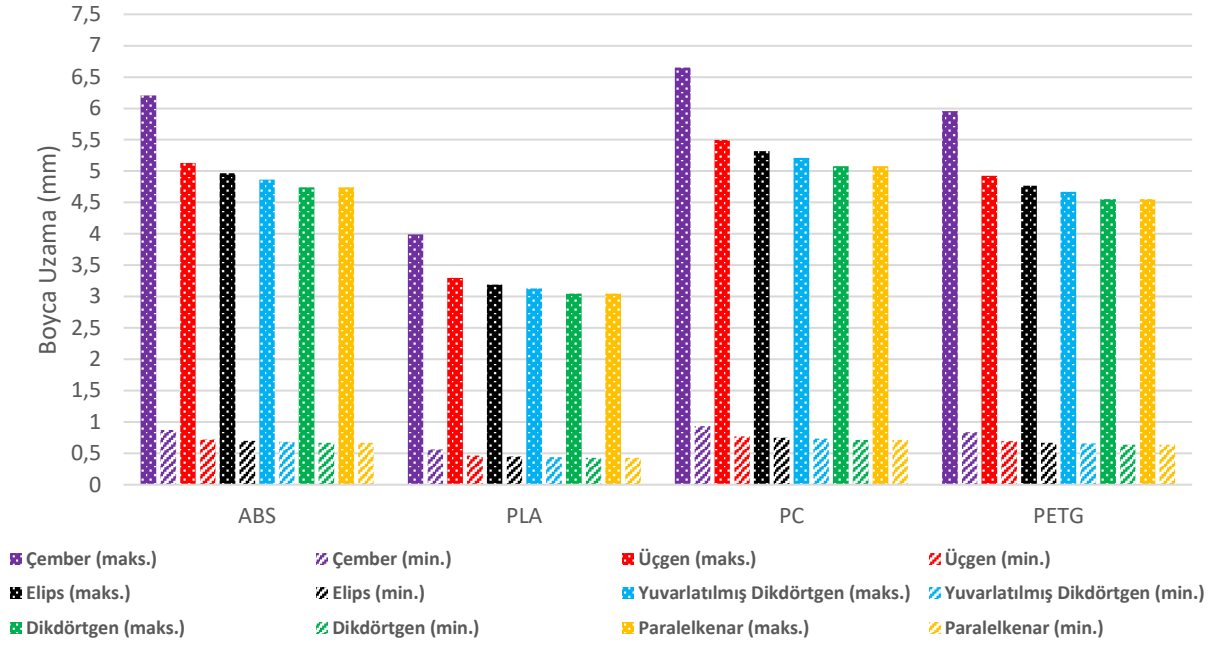
Şekil 8. 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm² kesit alanları için tasarımlar üzerinde oluşan gerilme yığılmaları

Oluşan deformasyon açısından yapılan kıyaslamada ise en düşük yer değiştirme PLA malzemesinden üretilen Dikdörtgen kesitli kirişte görülmüştür. Paralelkenar kesite sahip kiriş te Dikdörtgen kirişle aynı davranışı sergilemiştir. Oluşturulan kirişlerin, PLA'dan üretilen bu iki kesite göre performansları Çizelge 6 da verilmiştir.

Çizelge 6. Kirişlerin deformasyon yönünden PLA'dan üretilen Dikdörtgen kesitli kirişe göre performansı

	Dikdörtgen / Paralelkenar	Yuvarlatılmış Dikdörtgen	Elips	Üçgen	Çember
PLA	0	-2,63372336	-4,71976	-8,25318	-30,8997
PC	-49,31740614	-53,2500136	-56,3648	-61,6408	-95,456
ABS	-55,55555556	-59,6524586	-62,8974	-68,3938	-103,622
PETG	-66,66666667	-71,0562056	-74,5329	-80,422	-118,166

Çizelge 6 dan da görülebildiği üzere farklı malzeme ve kesit şekli kombinasyonları ile aynı performansı yakalamak mümkündür. Örneğin PC den üretilen Üçgen kiriş ve ABS den üretilen elips kiriş aşağı yukarı aynı davranışı sergilemiştir. Bütün tasarımlar arasında ise PLA'dan üretilen dikdörtgen veya paralelkenar kirişlere en yakın performansı %2,6 lıkfarkla PLA'dan üretilen yuvarlatılmış dikdörtgen göstermiştir. En kötü sonuç ise %118 daha kötü performans gösteren dairesel kesitli kirişte gözlenmiştir. Bu performans farkı Şekil 9'da açıkça görülebilmektedir. Burada maksimum deformasyon 3 mm², en düşük deformasyon ise 8 mm² kesit alanına sahip kirişlerde meydana gelmiştir.



Şekil 9. Malzeme cinsine göre kirişlerde meydana gelen en büyük ve en küçük deformasyonlar

Sonuç olarak çalışmanın bütünü göz önüne alındığında dikdörtgensel kesite sahip PLA'dan üretilen kirişin hem deformasyon hem de maruz kalınan gerilme yönünden diğer kiriş modellerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde, bu dikdörtgensel kirişin oluşan maksimum gerilme yönünden %5 ve %69 oranları arasında diğerlerine kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür. Deformasyon yönünden incelendiğinde PLA'dan üretilen malzemeler arasında dikdörtgen kesit geometrisi, diğerlerine göre %2,6'dan %30'a varan miktarlarda iyi sonuç vermiştir. Diğer malzemeler de hesaba katıldığında bu oran %118'e kadar çıkmaktadır.

IV. KAYNAKLAR

- [1] Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspired Materials and Sensing Systems. Cambridge: RSC Pub; 2011.
- [2] Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping. Mechanical Engineering 2007; 5:79 – 85.
- [3] Gibson I. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering, Software Conversion and Rapid Prototyping. West Sussex: John Wiley & Sons; 2005.
- [4] Subhransu Mohapatra, Prasad Dasappa Numerical Prediction of Stiffness and Strength of a Highly Complex Topology Optimized Thermoplastic Part designed for 3D Printing SPE ANTEC™ Indianapolis 2016.
- [5] Lars Krog, A. T. Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. Retrieved from Altair product design 2011.

- [6] Baich, Liseli, and Guha Manogharan. "Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts." International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. 2015.
- [7] M. Iliescu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation, Issue 4, Volume 2, 2008, 305-312.
- [8] Russell C. Hibbeler, Mechanics Of Materials, Pearson Education Canada 2011.
- [9] M. T. ÖZKAN and İ. TOKTAŞ, "Determination of the stress concentration factor K_t in a rectangular plate with a hole under tensile stress using different methods title ," Materials Testing, vol. 58, no. 10, pp. 839–847, Oct. 2016.
- [10] ANSYS Manual.