



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

**Eşit miktarda filament kullanımını ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemetine göre kesit geometrilerinin belirlenmesi**

*Determination of cross sectional geometries of beams according to tension and compression strength which are 3D printed with the same amount of filament*

*Yazar(lar) (Author(s)): Murat Tolga ÖZKAN<sup>1</sup>, Hüseyin Alp ÇETİNDAG<sup>2</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4371-1836*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8467-7646*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-4371-7836*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Özkan M.T., Çetindağ H.A., ve Toktaş İ., “Eşit miktarda filament kullanımını ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemetine göre kesit geometrilerinin belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 213-219, (2018).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.385559

# Eşit Miktarda Filament Kullanımı ile 3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Çekme/Basma Mukavemetine Göre Kesit Geometrilerinin Belirlenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Murat Tolga ÖZKAN<sup>1\*</sup>, Hüseyin Alp ÇETİNDAG<sup>2</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.04.2017 ; Kabul/Accepted : 17.05.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, aynı kesit alanlı ve uzunluktaki, eşit miktarlardaki filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemeti yönünden en iyi mekaniksel özelliği sağlayan kesit geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modelleme ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filamentin miktarına göre, üretim zamanı ve harcanan enerjiden bağımsız olarak, tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Ankastre kirişlerin tasarımların uzunluğu ve uygulanan kuvvetler sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometrisi biçimleri (Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değiştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı filament malzemesi, çekme/basma mukavemeti yönünden karşılaştırılmıştır. 6 kesit şekline, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşükten büyüğe doğru gerilmelere ve deformasyonlara uğrayan kesit geometrisi biçimleri sıralanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Filament, ankastre kiriş, çekme/basma, optimizasyon.

# Determination of Cross Sectional Geometries of Beams According to Tension and Compression Strength Which are 3D Printed with the Same Amount of Filament

## ABSTRACT

Aim of this study is to specify the performance of cross sectional geometries of beams which were experienced the tension stress. These beams which were 3D printed with the same amount of filament have same cross sectional area, length and volume. . Thus, design points were sorted without the effect of the amount of filament, printing time and energy consumption. Geometry of cross section was changed. In contrary length of beams and applied forces were kept constant for all design points. These geometries were selected as, circle, rectangle, equilateral triangle, rhombus (diamond), ellipse and rounded rectangle. Moreover four different printing material were taken into consideration for comparison according to tension. Depending on 6 different cross sectional geometry, 101 cross sectional area and 4 different material, 2424 design alternative were created in total. At the beginning mathematical model of these designs were constructed, then they were tested by using finite element method (FEM) and regression analysis. All model branches were compared to each other with the statistical analysis. As a result of all analyses, design alternatives were sorted according to stress and deformation performance.

**Keywords:** Filament, beam, bending, optimization.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesit şekli ve malzeme cinsi, üretilecek ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan kesit geometrisine göre bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde farklı kesit

tiplerine göre ayrı ayrı 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 çekme mukavemeti ve boyca uzama değerlerine dayalı malzeme cinsine göre kesit sıralaması yapılmasıdır.

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mtozkan06@yahoo.com

Günümüzde 3B baskı ve yazıcılar, özellikle ağır sanayiler dışındaki ofislerimizde RP'ye (Rapid Prototype) kolay bir yol desteklemekte ve bize farklı malzeme türüne izin vermektedir. Mücevher, ayakkabı, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, dişçilik ve tıbbi endüstriler gibi birçok farklı alan bu tekniği kullanmaya başladı [1]. En önemli uygulamalardan bir tanesi, tasarım geliştirme ve tıbbi modellerin imalatıdır ve bunun sayesinde cerrahi planlamadan önce sanal ve fiziksel anatomik modellerin üretimi amaçlanmaktadır [2,3]. Katkı imalatı veya 3D baskı, şirketlerin şu ana kadar imkânsız olduğu düşünülen şekillerin üretimine izin vererek ürünler üretme biçiminde devrim meydana getirdi. Bu, malzemelerin yük koşulları altında en iyi performans için gerekli olan kesin konumlara yerleştirilmiş parçaları tasarlamının avantajını sağlar. Bununla birlikte, bu teknoloji ağırlık-performans perspektifinden faydalanırken, sonlu elemanlar analizi ve performans öngörülerini için ayrıştırılması zor olan oldukça karmaşık şekillere neden olur. Bu zorluk, açık çözümlerin tipik olarak kullanıldığı bileşen arızaları gibi son derece doğrusal olmayan olayları tahmin ederken daha da belirginleşti. Geleneksel olarak, benzer elemanlar için tetrahedral elemanlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük simülasyon maliyetlerinden ötürü açık altı çözümlerde altı yüzlü elemanlar kullanılır. Bununla birlikte, topoloji optimizasyonu ile üretilen oldukça karmaşık şekiller, altı yüzlü elemanlar kullanılarak örgü yapmak kesinlikle yasaktır. Dolayısıyla rijitlik ve daha

özel olarak mukavemet sayısal tahmini, 3D baskılı parçalar için zorlu bir önerme haline gelir [4,5]. Farklı bir çalışmada, dolgu deseni seçiminin ve çeşitli mekanik özelliklerin maliyet ve üretim sürelerinin belirlenmesi için tasarım parametrelerini belirlenmesi hedeflemiştir. Bunun için farklı zorlanmalar için deneysel ve FEA analizleri yapılmıştır [7]. Bu çalışma, 3D yazıcı aracılığıyla üretilecek olan kırılgardaki, çekme gerilmesiyle zorlanan elemanların sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve regresyon analizinin yapılması ile özetlenebilir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden bağımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

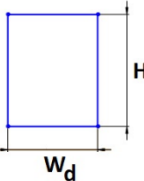
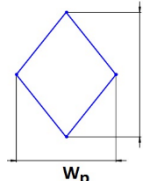
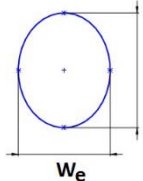
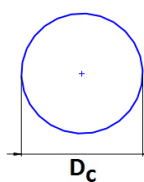
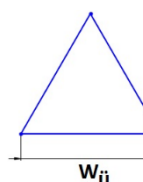
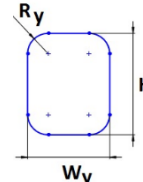
## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Tasarımların Hazırlanması (Preparation of Design Points)

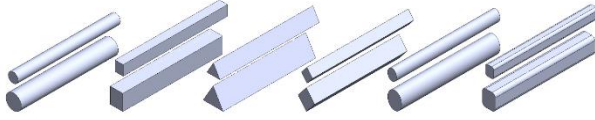
Kıyaslamalarda kullanılması için üç ana şekil (Çember, Dikdörtgen, Eşkenar Üçgen) seçilmiş, daha sonra bunlara ek olarak Paralelkenar, Elips ve Yuvarlatılmış Dikdörtgen de hesaplama ve analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Parametrik tasarım yapılabilmesi adına bu şekilleri oluşturan ölçüler arasında bağlantı kurulmuş ve çalışma boyunca bu ilişkiler bozulmamıştır. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Seçilen bu kesitlerin giriş uzunlukları 20 mm olarak sabit tutulmuş, kesit alanları ise 3 mm<sup>2</sup> den 8 mm<sup>2</sup> ye kadar

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve bu şekillere ait ölçüler (Selected cross section geometries and their dimensions)

Dikdörtgen		Paralelkenar		Elips	
	$H_d / W_d = 1,5$		$H_p / W_p = 1,5$		$H_e / W_e = 1,5$
	$H_d$ : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm $W_d$ : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm		$H_p$ : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm $W_p$ : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm		$H_e$ : 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: 1,979 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		

arttırılmıştır. Bu sayede 101 adet kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. Kesit alanı üstte 3 mm<sup>2</sup>, altta ise 8 mm<sup>2</sup>'dir. (Circular, rectangular, triangle, rhomboid, ellipse and rounded rectangle cross sections of models. Cross sectional area of the models are 3 mm<sup>2</sup> at the top and 8 mm<sup>2</sup> at the bottom)

Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 tasarım, 3D yazım tekniğinde kullanılan ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri için de tekrar edilmiş, böylelikle toplam 2424 adet çözüm noktası oluşturulmuştur. ABS ve PLA, 3D yazıcılarda sıkça kullanıldığı için tercih edilmiş. Malzeme çeşitliliğini arttırmak için ise PETG ve PC de analizlere dahil edilmiştir. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of the materials used)

	Elastikiyet Modülü	Poisson's Oranı	Özkütle -ρ-
ABS	2250 MPa	0,35	1,05 g/cm <sup>3</sup>
PLA	3500 MPa	0,36	1,24 g/cm <sup>3</sup>
PETG	2100 MPa	0,4	1,27 g/cm <sup>3</sup>
PC	2206 MPa	0,37	1,21 g/cm <sup>3</sup>

## 2.2. Analizlerin Yürütülmesi (Conduction of analyses)

Elde edilen bütün tasarımlar aynı kuvvet altında analiz edilmiştir. 10 N büyüklüğündeki bu kuvvet bir uçtan giriş

eksenine paralel uygulanmıştır. Diğer uç ise sabit destek olarak seçilmiştir. Öncelikle genel mukavemet formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar istatistiksel olarak karşılaştırılarak, mukavemet yönünden güçlü tasarımların saptanması amaçlanmıştır.

### 2.2.1. Analitik hesaplama (Analytical calculation)

Çekme gerilmesi Denklem (1), gerinme ve uzama ise sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) yardımıyla bulunabilir [8].

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{L} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{F}{E.A} \quad (2)$$

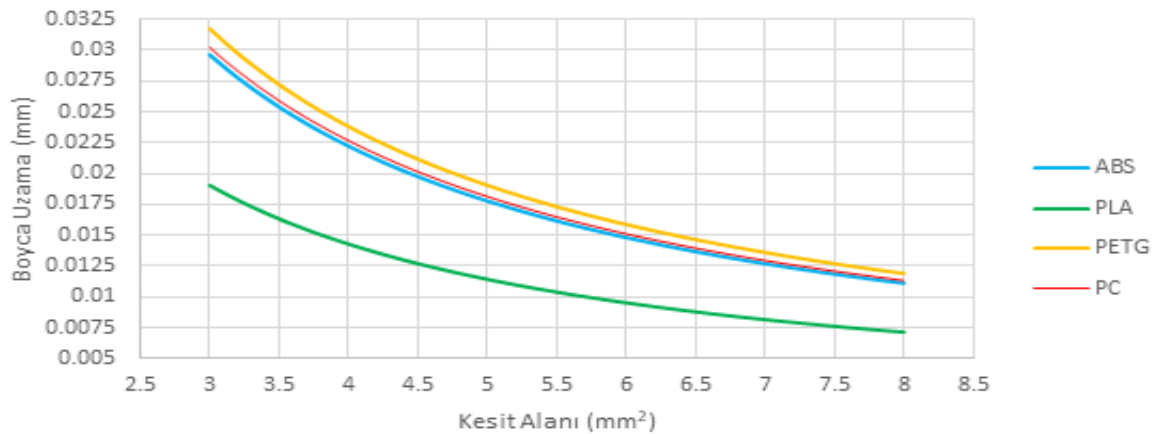
$$\Delta L_z = \frac{F.L}{A.E} \quad (3)$$

Burada  $\sigma_T$  ortaya çıkan çekme gerinmesini, F uygulanan kuvveti, A kesit alanını,  $\varepsilon_z$  z-ekseni boyunca gerinmeyi, L kirişin uzunluğunu, E ise elastikiyet modülünü ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda şekilden ziyade kesit alanı ve malzeme cinsi önemlidir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen grafik Şekil 2'de gösterilmiştir.

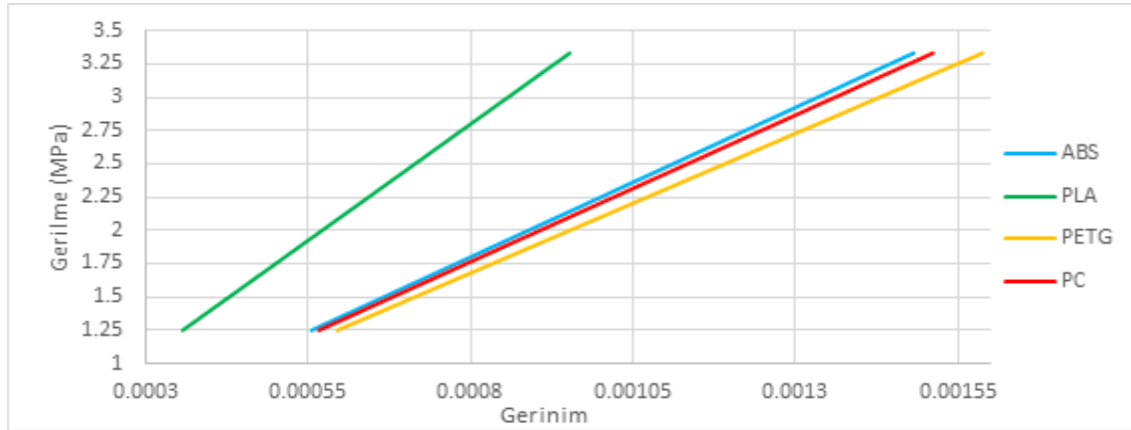
Dört farklı malzeme (ABS, PLA, PETG ve PC (Polycarbonate) için çekme yüklemesine karşı uzama değerleri elde edilmiştir. Kesit alanlarına göre uzama değerleri Şekil 2 de gösterilmiştir. En fazla uzamalar sırasıyla PETG, PC, ABS ve en az uzamayı ise PLA göstermiştir. Yüklemeler sonucunda elde edilen Gerilme-Gerinim grafiğine bakılacak olursa aynı gerilmeye karşın ABS, PLA, PETG nin daha çok şekil değiştirdiği, PLA nın ise uzama değerinin diğer malzemelere göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 3).

### 2.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)

Katı modeli oluşturulan tasarımlar ANSYS "Static Structural" modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerin ilk adımını "mesh" optimizasyonu oluşturmaktadır. Mesh boyutu, mesh sayısı ve mesh



**Şekil 2.** Seçilen malzemeler için kesit alanının boyca uzamaya etkisi (Influence of the selected materials on the elongation)



Şekil 3. Seçilen malzemeler için gerilmenin gerinime etkisi (Influence of the stress on the strain for selected materials)

oluşturma metodları değiştirilerek sonuçların analitik hesaplamalara uyması sağlanmıştır. Uygun mesh kalitesi elde edildikten sonra, parametrik tasarım yardımıyla bütün modeller sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Analizlerde kirişin bir ucuna yüzeye yayılmış bir şekilde 10 N'luk kuvvet, öbür uca ise sabit destek (fixed support) uygulanmıştır. Sonuçlar iki kısımda değerlendirilmiştir. İlk olarak gerilme ( $\sigma_T$ ) ve gerinimlerin ( $\epsilon$ ) doğrusal olduğu kirişin orta kısmı incelenmiş, daha sonra ise parça genelinde ortaya çıkan gerilme deformasyon ve gerinimler dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kirişlerdeki boyca uzamanın ve kirişlerin ortasındaki gerilmelerin analitik olarak elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Bu iki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve aradaki sapmanın belirlenmesi için istatistiksel analizden yararlanılmıştır;

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

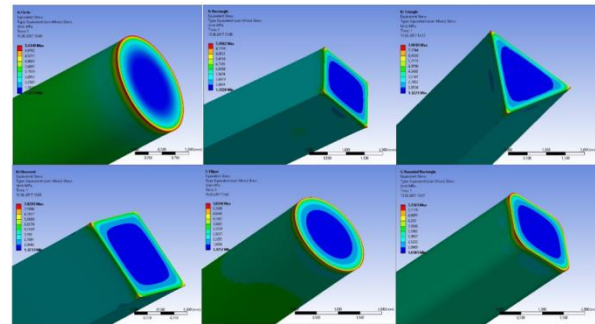
$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_j (t_j - t_j)^2}{\sum_j o_j^2} \right) \quad (5)$$

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

3 eşitlik ( Denklem 4-6) kullanılarak deformasyon, gerilme ve gerinim sapmaları bulunmuştur. Kesit alanı, kesit geometrisi veya malzeme gözetmeksizin yapılan bu hesaplamalar sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin doğruluğu belirlenmiştir. Bunun

“R<sup>2</sup>” değerinin 1'e yakın olması ve “Ort % Hata” değerinin ise düşük değerlerde olması gerekmektedir. Bu kıstaslar göz önünde bulundurulduğunda yapılan sonlu elemanlar analizinin çok yüksek bir doğruluğa sahip olduğu görülmektedir.

Kirişlerin bütünü ele alındığında, en yüksek gerilme değerlerinin kuvvet uygulanan yüzey veya kirişin orta noktasından ziyade kirişin sabitlendiği bölgede ortaya çıktığı görülmüştür. Bu yüksek gerilmeler Şekil 4 de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kirişler üzerinde oluşan gerilme yığılmaları (Stress concentrations on the beams)

### 2.2.3. Regresyon analizi (Regression analysis)

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilenler incelendiğinde, sabit destek bölgesinde oluşan gerilmeler dışında bütün verilerin sonuca bağlandığı görülmektedir. Bu yüzden gerilmeleri analiz etmek için regresyon

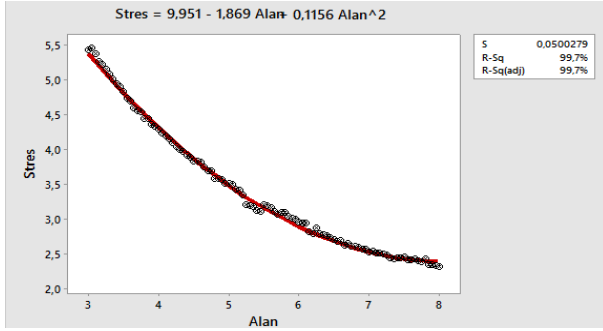
Çizelge 3. Boyca uzama, kirişlerin ortasındaki gerinme, gerilme hesaplamaları için analitik çözüm ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki sapma değerleri (Deviation between analytical calculations and the finite element method for Elongation, Stress and Strain on the mid-section of the beams)

	RMS	R <sup>2</sup>	Ort. % Hata	Min. Sapma (%)	Maks. Sapma (%)
Boyca uzama	0,0000928600	0,9999994683	0,5571897631	0,361980544	0,841342285
Gerinim	0,0000000066	1,0000000000	0,0004394443	0,0000000918	0,009812653
Gerilme	0,0000172179	0,9999999998	0,0004400554	0,0000000023	0,009818793

yanında herhangi bir tasarımda ortaya çıkan en büyük ve en küçük sapmalar da saptanmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3 te verilmiştir. “RMS” değerinin 0'a,

tekniki kullanılmıştır. Regresyon analizinde çıktılar gerilme, girdiler ise kesit alanı olarak belirlenmiştir. Model olarak İkinci derece regresyon seçilmiş,

güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Şekil 5 te dairesel şekle sahip kiriş için yapılan bu analiz her kesit şekli için tekrarlanmıştır.



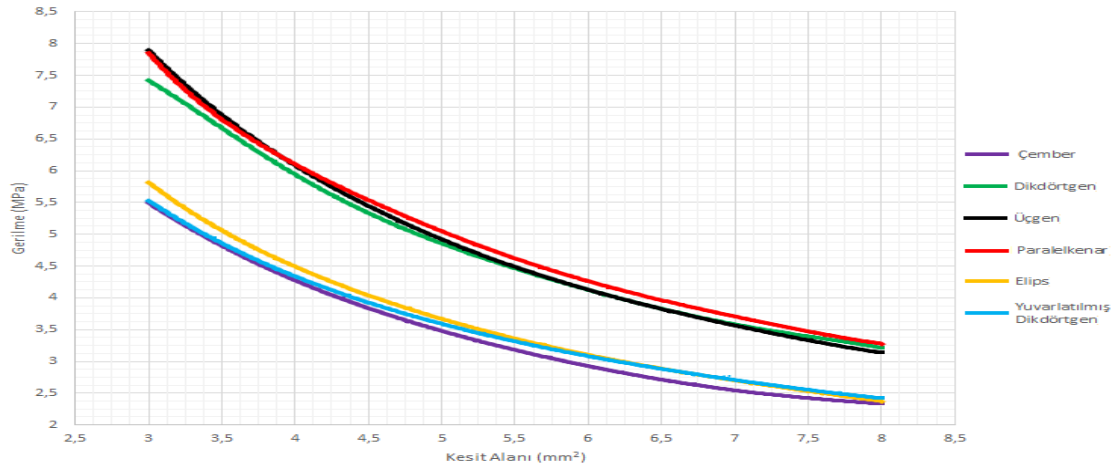
**Şekil 5.** Dairesel alana sahip kirişte, gerilme yığılması olan bölgeler için yapılan regresyon analizi sonucu (Regression analysis of the stress concentrations for the circular beam)

Altı farklı kesit alanı için yapılan regresyon analizi sonuçları Çizelge 4 te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ve katsayılar.  $\sigma$  = gerilme, A = kesit alanı (Obtained equations and values from the regression analysis.  $\sigma$  = Stress, A = cross sectional area)

	Denklem	R <sup>2</sup>	S
Çember	$\sigma = 9,951 - (1,869 A) + (0,1156 A^2)$	0,997	0,0500279
Dikdörtgen	$\sigma = 13,21 - (2,375 A) + (0,1423 A^2)$	0,998	0,0478153
Üçgen	$\sigma = 14,18 - (2,644 A) + (0,1601 A^2)$	0,997	0,0679506
Paralelkenar	$\sigma = 13,47 - (2,383 A) + (0,1403 A^2)$	0,997	0,0665050
Elips	$\sigma = 10,27 - (1,885 A) + (0,1139 A^2)$	0,997	0,0544872
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$\sigma = 9,567 - (1,703 A) + (0,1026 A^2)$	0,997	0,0489894

Şekilde görüldüğü üzere sonuçlar iki bölgeye ayrılmıştır. Birinci grupta keskin köşeli şekiller (dikdörtgen, üçgen,



**Şekil 6.** Kesit şekline göre kesit alanı ve ortaya çıkan en yüksek gerilmeler arasındaki ilişki (Relation between cross sectional area and the stress concentrations according to cross sectional geometry)

paralelkenar) 3-8 MPa aralığında gerilmeye maruz kalırken, ikinci grup olan yumuşak hatlara sahip kesitler (çember, elips, yuvarlatılmış dikdörtgen) yalnızca 2,25-6 MPa aralığındaki gerilmelere uğramıştır. İkinci grubun daha az gerilmesinin en büyük sebebi Şekil 4 ten de görülebileceği üzere, kuvvetin belirli noktalara yığılması yerine kesit üzerine yayılmasıdır. Çember, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgenin uygulanan kuvvete göre daha sağlam bir yapıda olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

### 3. SONUÇ (CONCLUSION)

Oluşturulan bütün tasarımlar için öncelikle analitik metot ve sonlu elemanlar yöntemi istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada RMS değerlerinin 0'a, R<sup>2</sup> değerlerinin 1 e çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama yüzde hata değerleri ise boyca uzama, gerilme ve gerilme değerleri için sırasıyla 0,5571897631, 0,0004394443 ve 0,0004400554 olarak bulunmuştur. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda iki yöntem arasındaki hatanın çok düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

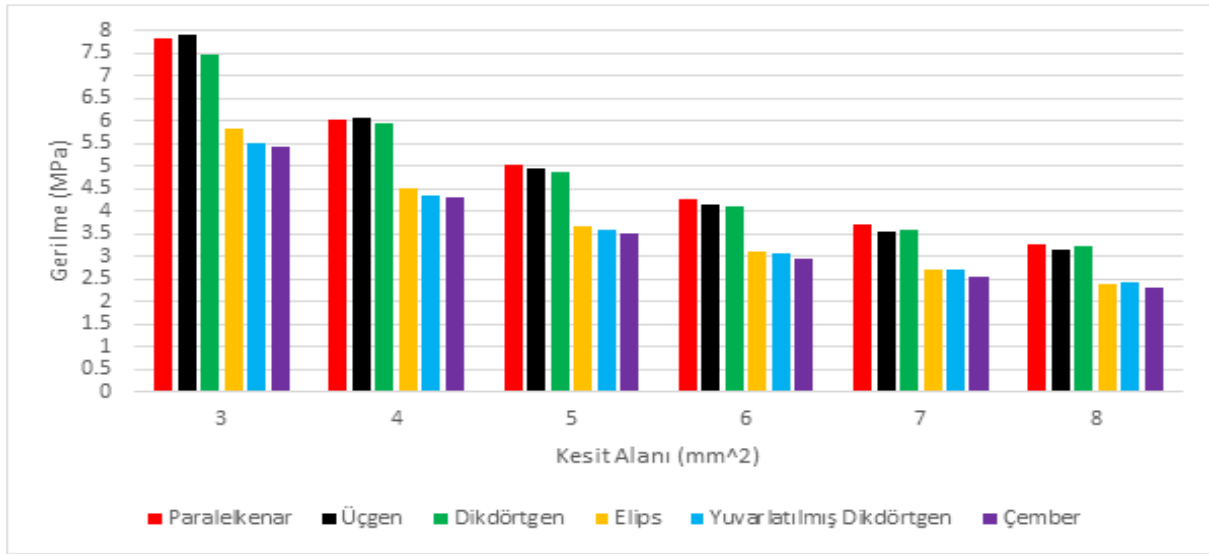
İstatistiksel analiz yardımıyla doğruluğu kesinleşen sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, bağlantı noktalarında oluşan gerilme yığılmaları incelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen değerler regresyon analizi yardımıyla yorumlanarak grafiğe dönüştürülmüştür. Yapılan regresyon analizinde R<sup>2</sup> değeri 0,997'dir. Regresyon analizi sonunda ise kesit şekline bağlı olarak, kesit alanı ve oluşan maksimum gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlayan denklemler elde edilmiştir.

Kesitler arasında çembersel şeklin diğerlerinden daha etkili olduğu Şekil 6 da açıkça görülmektedir. Bu şeklin diğerlerine göre ne kadar etkili olduğunu belirlemek için regresyon analizinde de kullanılan sonlu elemanlar yönteminin sonuçları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen en yüksek gerilme ve boyca uzama değerlerinin ortalaması alınarak çembersel kesitle karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5 te gösterilmiştir.

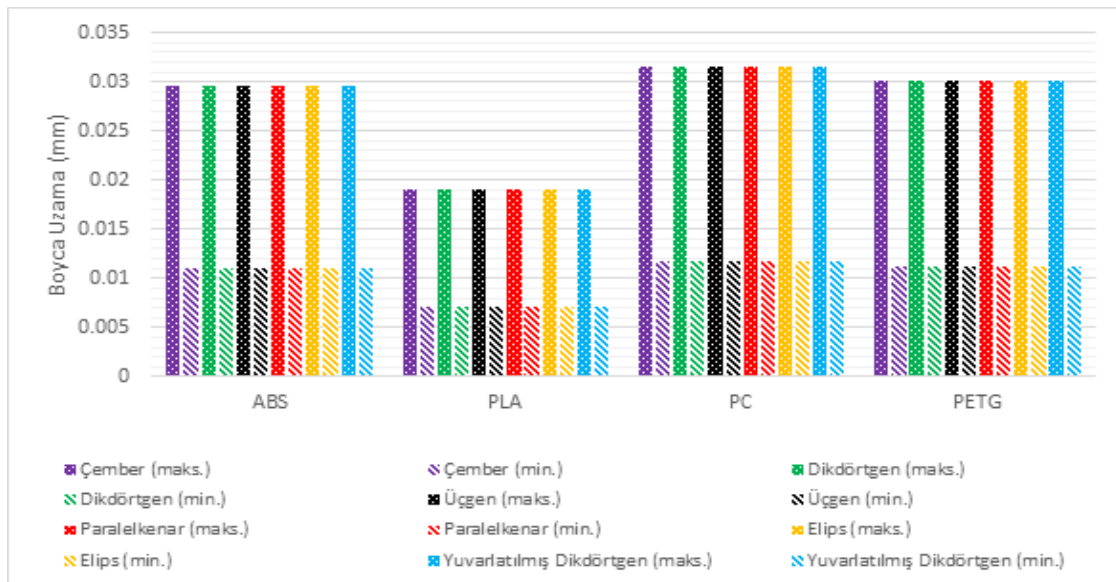
**Şekil 5.** Çembersel kesitin, en yüksek gerilme ve boyca uzama değerleri için diğer kesitlere göre performansı (Comparison of circular section and the other cross sectional geometries according to stress concentration and elongation)

	Maks Gerilme Farkı (%)	Boyca Uzama Farkı (%)
Dikdörtgen	-39,34419527	+0,019003236
Eşkenar Üçgen	-41,22062292	+0,035586458
Paralelkenar	-43,83863799	+0,029140353
Elips	-5,336441278	+0,015808902
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	-3,267299548	+0,006244358

kaldığı görüldüyse de boyca uzama miktarında çok önemli bir değişme olmamıştır. Kesitler arasındaki gerilme farkları Şekil 7’de daha net olarak görülebilmektedir. Şekil 8’de ise malzeme cinsine göre kırışlerde meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar gösterilmiştir. Sonuç olarak yapılan tüm çalışma göz önünde bulundurduğunda, en iyi performansı PLA malzemesinden üretilen çembersel kesitin sergilediği görülmektedir. En kötü sonuçlar ise PC’den üretilen paralelkenar kesitine sahip tasarımda ortaya çıkmıştır. Böylelikle kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan oluşan gerilmelere bakılarak tasarımlar arasında



**Şekil 7.** 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm<sup>2</sup> kesit alanları için tasarımlar üzerinde oluşan gerilme yığılımları (Stress concentrations for 3, 4, 5, 6, 7 and 8 mm<sup>2</sup> cross sectional areas)



**Şekil 8.** Malzeme cinsine göre kırışlerde meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar (Maximum and minimum deformations according to material type)

Çizelgeye bakıldığında çembersel kesitin diğer kesitlere göre kayda değer miktarda daha az gerilmeye maruz

mukavemet yönünden sıralama yapılabilmektedir. Bu sayede tasarımlar arasında %43,8 e varan performans kazanımları sağlanmıştır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspried Materials and Sensing Systems. *Cambridge*: RSC Pub; (2011).
- [2] Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping, *Mechanical Engineering*, 5: 79– 85, (2007).
- [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. Iliesu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, *International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation*, 2(4): 305-312, (2008)
- [8] Russell C. Hibbeler, *Mechanics Of Materials*, Pearson Education Canada, (2011).
- [9] ANSYS Manual.