

**Proje Ana Alanı:** Fizik

**Proje Tematik Alanı:** Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji

**Proje Adı (Başlığı):** Kemik Dokusu ve Grafit Yapısı Benzetimi ile 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi İçin Yeni Üretim Medolojisinin Belirlenmesi

### Özet

Bu çalışmada doğada bulunan skaffold yapılardan ilham alınarak kemik ve grafit modelleri birim hücrelere dönüştürülmüştür. Bu birim hücreler kullanılarak elde edilen makroskobik yapıların mekanik özelliklerinin analizini yaparak bir malzeme üretim metodolojisi ortaya koymak hedeflenmiştir.

Çalışmada, kemik dokularının mikro yapıları ve grafitin katmanlı atomik yapısı incelenmiş ve bu yapılara benzetimle modellemeler yapılmıştır. Yapılan modellemeler ile üretilecek malzemeler için örüntüler oluşturulmuştur. Daha sonra çekme ve basma mekanik testleri için standart numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler SolidWorks uygulamasında teste tabi tutulmuştur. Proje sürecinde popüler materyal özellikleri incelenmiş ve analiz edilecek mekanik özellik parametreleri; kütleden kazanç, maksimum stres, esneklik, rijitlik ve elastisite modülü olarak belirlenmiştir. Yapılan testlerin ardından kemik dokularının mikro yapıları ve grafitin katmanlı atomik yapısı modeline dayalı birim hücrelerden oluşan makroskobik yapılar için olası kullanım alanları belirlenmiştir.

Sonuç olarak, belirlenen skaffold yapıların kullanıldığı modellerde materyal kullanımının %47 oranına kadar azalırken mekanik özellikler bakımından pek çok avantaj sağlandığı görülmüştür. Özellikle kemik modelin kullanımıyla mekanik özellikleri ve performans/kütle oranı bakımından avantajlı yapıların oluşturulabileceği gözlemlenmiştir. Sergilenen özellikler belirlenen modeller için birçok kullanım alanı sağlarken üretilen parçada tam dolu modele kıyasla daha az enerji ve materyal kullanımını sağlanacağı görülmüştür. Böylece doğadan alınan ilhamla doğal

kaynakların korunması sağlayacak yeni bir üretim metodolojisi geliştirilmiş ve özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca literatürle karşılaştırıldığında sanal test ve laboratuvar testi sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Skaffold Geometri, Kemik Dokusu, Grafit, Atomik Yapı, Mekanik Özellik, Mukavemet, Simülasyon, Verim

### **Amaç**

Günümüz üretim endüstrileri yeni ürünler geliştirmekten ziyade var olan ürünleri en verimli şekilde üretebilmeyi hedeflerler. Birleşmiş Milletler'in küresel bir sorun olarak işlediği “sorumlu üretim ve tüketim” yaklaşımı bağlamında üretimde kullanılan ham madde ihtiyacının minimize edilmesi üzerine yeni üretim metodolojileri geliştirilmiştir(Sorumlu Üretim ve Tüketim, t.y.). Bu doğrultuda gelişen malzeme bilimi sektörü gerek ham madde kullanımını azaltması gerekse ürün kalitesinin artırılması noktasında önemli yöntemler ortaya koymuştur(Kakani, S. L., 2004).

Bu projede doğadan alınan ilhamla skaffold ve moleküler geometriler ile modeller üretilmiştir. Modellerin fiziksel parametreleri incelenerek bu geometrilerin üretim metodolojisi olarak kullanılması durumunda ortaya çıkacak yeni malzeme özellikleri incelenmiştir. Bahsi geçen geometri tanımlarındaki birim yapıların boşluklu olması, kullanılan yapının hacmini azaltmaktadır. Öte yandan üretimi yapılan yapı içerisinde materyal verimli ve homojen bir şekilde dağıtılmaktadır. Dolayısıyla strese bağlı materyal özelliklerinde önemli bir kayıp gerçekleşmez. Bu sayede daha az kütle ile daha iyi performansa sahip yapılar üretebilmek hedeflenmektedir. Ek olarak kullanılan birim hücre örüntüsünün mekanik özellikler bakımından farklı sonuçlar doğuracağı öngörülmüş olup bunun malzeme üretim bilimi açısından alternatif kullanım alanları için fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Kullanılan üretim metodolojisinden olumlu sonuçlar alındığı takdirde endüstride uyarlanmasıyla beraber sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ham madde kullanımını azaltarak doğal kaynakların korunması hedeflenmektedir. Ayrıca geometrinin endüstriye

uyarlanması gerek üreticiyi gerekse ülke ekonomisini olumlu yönde etkileyecektir. Bu projede scaffold geometriler materyallere uyarlayıp mekanik özelliklerini inceleyerek gerek literatüre bu geometrilerle ilgili yeni bilgiler kazandırmak gerekse geometrinin endüstrilerde kullanımını teşvik etmek hedeflemektedir.

## Giriş

Malzeme bilimi 20. ve 21. yüzyılda öne çıkan bir bilim dalıdır. 20. yüzyılda havacılık, uzay, inşaat ve daha birçok sektörün gelişmesiyle ARGE yatırımlarının artması ve katı hal fiziğinde yaşanan gelişmelerle birlikte malzemelerin verimini arttırmaya yönelik çalışmalarda da artış yaşanmıştır. Materyallerin mukavemetini arttırmaya yönelik bakış açısı; malzemeden tasarruf etmeyi amaçlayan, ekonomik ve çevreci bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. (Kakani, S. L., 2004). Materyallerin mekanik özellikleri kullanılan malzemenin atomik yapısına bağlı olarak değişimler gösterdiği gibi materyalin makro yapısı tarafından da etkilenmektedir. Zira mekanik özellikler, materyale uygulanan kuvvet sonrası üzerinde oluşan stres sebebiyle oluşur ve yine stres değerlerinin materyal üzerindeki etkileri sonucunda gerinim değerlerinin değişmesiyle birlikte materyaldeki bu özelliklerin gözlemlenebilmesi mümkün olur.

Stres ( $\sigma$ ) kuvvete maruz kalan bir malzemede alan başına düşen kuvvet miktarıdır.  $F$  malzemeye etki eden kuvvet,  $A$  enine kesit olmak üzere;

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

Gerinim ( $\epsilon$ ) ise kuvvete maruz kalan malzemenin uzunluk değişimini ifade etmek için kullanılır.  $L$  Malzemeye ait son uzunluk,  $L_0$  ise ilk uzunluk olmak üzere;

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Kuvvete maruz kalan her malzemede stres oluşmaktadır. Oluşan stres değerleri uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre farklılık gösterse de her materyal için uygulanan kuvvetten bağımsız

fakat materyalin temel özelliklerine bağlı olan özel stres değerleri bulunur. Bu stres değerlerinin aşılmasıyla birlikte malzemede kalıcı deformasyonlar ve kırılmalar görülecektir. Stres tamamen dolu olan bir materyalde homojen bir şekilde dağılmaktadır ve deformasyonların oluşması için gerekli olan stres miktarı da genel olarak malzemenin temel atomik yapısına bağlıdır. Fakat gerçek hayatta deformasyona sebep olan farklı etkenler bulunur çünkü her yapıda üretim aşamasında ne kadar dikkat edilirse edilsin küçük üretim hataları görülecektir. Bu tarz hatalar materyal içerisindeki en küçük enine kesit alanının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum materyaldeki stres konsantrasyonunun değişmesine sebep olacağı gibi aynı kuvvet için oluşan stres miktarını artırır. Böylelikle materyal daha çabuk deformasyona uğrar ve zarar görür(Taşdemir, M., 2018).

Materyalde yer alan boşlukların kontrollü bir şekilde düzenlenmesi materyalden kazanç sağlayacağı gibi stresin homojen dağılımını sağlamaya da devam edecektir. Dolayısıyla daha az materyal kullanımıyla benzer ve bazı durumlarda daha iyi mekanik özellikler sergileyen ürünlerin geliştirilmesi mümkün olacaktır. Materyal yapısında iç geometrinin öneminin anlaşılmasıyla birlikte bu yöndeki çalışmalar artmış, farklı geometrilerin yapıya uyarlanmasıyla birlikte çeşitli üretim metodolojileri geliştirilmiştir.

Metodolojilerin mekanik özelliklerini anlamak için laboratuvar ve bilgisayar programında deneyler yürütülür. Laboratuvar deneylerinde, fiziki ortamlarda yapının özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak adına yapıya uygulanan kuvvetin nasıl tepki oluşturduğunu belirli parametreler aracılığıyla incelenir. Statik analiz testleri sayesinde laboratuvarda gerçekleştirilecek deneylerin tamamı istenen koşullar altında sanal ortamda yürütülür. “Sonlu elemanlar yöntemi” başlığıyla gerçekleştirilen sanal testlerde modellerin yapılarına ait analiz yapılabilir. Bu yöntemle büyük yapı, üçgen piramitler şeklinde küçük birim yapılara ayrılır bu işleme “mesh” adı verilir(Güler & Şen, 2015). Mesh işlemi sonucu oluşturulan birim yapıların düğüm noktaları belirlenmekte ve parametre olarak kullanılarak yapının test dahilinde strese karşı tepkisinin analizi

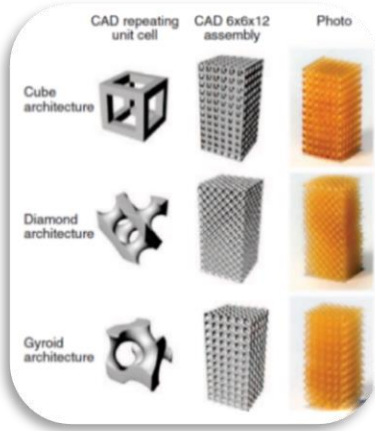
yapılmaktadır. Analiz sonucunda stres, yer değiştirme ve gerinim sonuçları bulunur. Statik testlerde tercih edilen popöler uygulamalar Ansys, Abaqus ve SolidWorks'tür (Desai, Y. M., 2011).

Topoloji optimizasyonu başlığı altında da yine aynı yöntemle uygulanan kuvvete karşı optimum tasarım önerisi sunulmaktadır. Bu sayede minimum malzemeyle maksimum performans sağlanması hedeflenmektedir. Nitekim topoloji optimizasyonunu, yapının şekline ve kullanıldığı alana göre farklı sonuçlar vermesinden ötürü standart bir üretim metodolojisi olarak değerlendirmek mümkün değildir(Sigmund, O. & Maute, K., 2013). Günümüz teknolojisi, eklemeli imalat metodu ve serbest katı form imalatı yöntemleriyle, sanal ortamda tasarlanan kompleks yapıların üretimini mümkün hale gelmektedir. Üç boyutlu yazıcılar, bu bağlamda erişime en açık cihazlardır(Kalender, M. ve ark., 2019).

Geliştirilen üretim metodolojilerinin özelliklerini incelemek adına çeşitli çalışmalar yürütölmektedir. Bu çalışmalardan biri “Fraktal Yapılara Benzetimle Tasarlanan Üç Boyutlu Yapıların Mekanik Özelliklerinin Analizi ve Yeni Bir Modelleme Metodolojisinin Oluşturulması” başlıklı çalışmadır. Yapılan çalışmada fraktallar, yapılarda birim hücre olarak kullanılmıştır. Ardından testler yapılmış ve alınan sonuçlar incelendiğinde sanal testler ve laboratuvar testleri arasında bir korelasyon ilişkisi bulunduğu görölmüşür. Çalışmaların sonucunda kütle-performans bakımından yapılan değerlendirmede farklı fraktal modellerin tam dolu modele nispeten daha verimli olduğu görölmüşür.

Çalışmalar arasında, mikro boyutta tasarlanan ve üretimi gerçekleştiren, “metamateryal” isimli yapıların kullanıldığı metodolojiler bulunmaktadır. Metodolojinin kullanımıyla üretilen yapılar, olumlu mekanik sonuçlar vermiştir. Kirkhope ve ekibinin yaptığı “İçi Boş Tüplerden Ultra

Hafif Fraktal Yapılar” çalışmasında fraktal benzeri birim hücreler yapıya hiyerarşik düzen oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. (Rayneau-Kirkhope ve ark., 2012)



Şekil. 1 Birim hücreden üretime bir scaffold modellemesi (Chantarapanich ve ark., 2012)

Scaffold geometrisi yapısında hiyerarşik boşluklar bulunduran yapıların geometri tanımıdır. Doğada kemik yapısında görülen bu geometri bir üretim metodolojisi olarak doku mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro ( $10^{-6}$ ) ölçeklerinde üretimi gerçekleştirilen dokular canlı vücutta yapay kemik işlevi görmektedir. Üretim aşaması, doğal kemik formuna en yakın olanı hedeflemektedir. Dokuların üretim süreci matematiksel modellemelerle başlamakta ve çeşitli biyolojik parametreleri de göz

önünde bulundurarak eklemeli imalat metotları ve serbest katı form imalatı yöntemleriyle uzun bir süreç sonrası sonlanmaktadır. (Zadpoor, A. A., 2015)

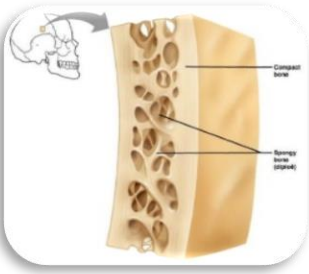
Scaffold geometrisinin yapının iç modellemesinde kullanılması üzerine yapılan literatür taramasında mikro boyutta yapılan çalışmalar ile karşılaşılmaktadır. Doku mühendisliğinden başka diğer çalışma alanlarında kullanıldığına dair literatürde kaynak olmaması bu geometrinin makro boyuttaki yapıların iç modellenmesinde kullanılması düşüncesini doğurmaktadır. Nitekim mikro boyutta üretim zor olsa da performans bakımından olumlu sonuçlar veren metodolojinin makro boyuttaki karşılığı bilinmemektedir.

Yapılan çalışmada daha az malzeme kullanımı ile tam dolu yapılara nispeten performansı yüksek yapılar elde edilmek istenmektedir. Bunun altında yatan motivasyonlardan en önemlisi doğal kaynakların sınırlı olmasıdır. Zira üretimde kullanılan malzeme miktarının azaltılması belirtilen amaca doğrudan hizmet etmektedir.

## Yöntem

Scaffold geometri ufak tübüler yapıların kullanımıyla bazı doğal yapıların taklit edilmesiyle oluşur. Bu projede ise kemik dokularının mikro yapıları, grafit ve elmasın makro moleküler atomik yapısı incelenmiştir ve bu yapıların materyale uyarlanmasıyla mekanik özelliklerdeki değişimler gözlemlenmiştir.

### Scaffold Geometrisi Oluşturulacak Doğal Yapılar:

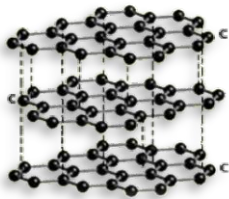


Şekil 2. Kemik dokusu illüstrasyonu

İnsan kemiği doğası gereği hafif ve kuvvetli bir yapıya sahiptir.

Kemiğin aynı zamanda hafif ve kuvvetli olabilmesi için boşluklu bir yapıya sahip olması gerekmektedir. (Zadpoor, A. A., 2015). Kemikteki boşluklu yapı düzensiz dairesel boşluklarla sağlanmaktadır. (Şekil 2)

Projede bu boşluklardan esinlenerek bir scaffold geometrisi oluşturulmuş ve oluşturulan bu geometriler makro yapıli modellere uyarlanmak üzere mekanik testlere tabi tutulmuştur. Kemik dokularının SolidWorks benzeri CAD programlarına uyarlanmasını kolaylaştırabilmek adına düzensiz daireler yerine düzenli dairelerle oluşturulmuş bir örüntü modellenmiştir. Oluşturulan temel örüntü mekanik test numunelerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Grafitin atomik yapısı

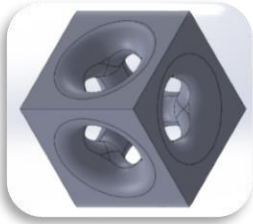
Grafit, birbirine kovalent bağla bağlı bulunan karbon atomlarından oluşan katmanların üst üste gelmesiyle oluşan bir materyaldir(Şekil 3.). Aynı katmanda bulunan karbon atomlarının arasında güçlü bağlar oluşurken farklı katmanlar arasındaki bağlar daha zayıftır. Grafit bükülebilir (flexible) fakat

elastik olmayan bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla kuvvete maruz kalması durumunda ani kırılmalara sebep olmayacağı gibi deformasyona da uğramaz. (Kelly, B. T., 1981) Bu özelliği onu özellikle esnekliğin önemli olduğu alanlarda önemli bir materyal haline getirmektedir. Bu çalışmada grafitin atomik yapısından yola çıkılarak bir Scaffold geometrisi oluşturulmuş oluşturulan geometri

mekanik testlere tabi tutulmuştur. Oluşturulan modellerde atomik oranların korunmasına dikkat edilmiştir.

Geliştirilen modellerin kıyaslanabilmesi için çeşitli parametreler belirlenmiş devamında belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilecek mekanik testlere karar verilmiştir. Mekanik testler SolidWorks 2021 programında simüle edilmiştir.

#### **Kemik ve Grafit Scaffold Geometrilerinin Modellenmesi:**



Şekil 4 Tasarlanan kemik yapısı

Kemik yapısı, küpün altı kenarından daire çizimin ekstrüze olarak çıkartılması ve ardından çıkartılan silindirin oluşturduğu kenarların radyuslanmasıyla tasarlanmıştır(Şekil 4). Bu çalışmada küpün kenarı 3mm, çizilen dairelerin çapı 1.4mm ve radyusun yarıçapı 0.5mm olarak belirlenmiştir. (Polo-Corrales, L., ve ark. 2014)



Şekil 5. Tasarlanan grafit yapısı

Grafit yapısı, iki birbirine paralel altıgen yapının ve bu altıgenlerin köşeleri arasındaki çizgilerin süpürme komutuyla oluşturulan katılardan meydana gelir. Bu çalışmada kullanılan altıgenin bir kenar uzunluğu 1.24mm iki altıgen arası uzunluk ise 3mm olarak kullanılırken bu çizimlerde uygulanan süpür komutunun oluşturduğu katı silindir yapının çapı 0.6mm'dir. Nitekim

kullanılan bu uzunluklar doğadan alınan ilham sonucu tasarlanan grafit yapısına ilham veren grafitin moleküler düzeyde atomlar arası yaptığı bağın uzunluğuyla orantılıdır. (Kelly, B. T., 1981)

#### **Oluşturulan Modellerde Test Edilecek Mekanik Özellikler:**

Scaffold Geometri kullanımıyla üretilen modellerin standart bir şekilde literatüre kazandırılabilmesi için bazı mekanik özellikler belirlenmiştir. Karşılaştırılacak mekanik özelliklerin seçilmesi sürecinde kullanılacak modellerin temel avantajları ve sektörün ihtiyaçları göz önünde bulundurulmuştur. Scaffold geometrisinin uyarlandığı modellerin karşılaştırılabilmesi için seçilen temel mekanik özellikler şu şekilde sıralanabilir:

**Kütleden Kazanç:** Hammadde yetersizliği çağımız endüstrilerinin en önemli problemlerinden biridir. Zira kullanılan materyallerin genel olarak yenilenemeyen kaynaklardan olması sektörleri yeni kaynaklar bulmaya ve var olan kaynakları da en verimli şekilde kullanmaya yönlendirmektedir. Kaynakların verimli kullanımı aynı zamanda hammaddelerin işlenmesi için harcanan enerji miktarını azaltacak yine üretilen ürünlerin taşımacılık masrafları da azalacağı gibi kullanılan materyallerin hafiflemesi üretilen ürün için yeni kullanım alanları oluşturacaktır.

**Modele Uygulanabilecek Maksimum Stres:** Çoğu endüstride üretilen parçalar belirli kuvvetlere maruz kalırlar. Parçalardan beklenen kuvvete maruz kalmaları durumunda parçada oluşan kuvvete dayanmaları ve kırılmamaları beklenir. Bir parçanın kırılmaması için materyal üzerindeki stres değerinin malzemeye ait mukavemet değerini (ultimate strength) aşmaması gerekir. Bazı sektörlerde ise parçanın kullanım alanı kırılma dışında herhangi bir deformasyonu da tolere edemeyebilir bu durumda stres değerinin akma dayanımı değerini aşmaması gerekir. Bu değerlere ulaşılabilmesi için stres yapıda homojen bir şekilde dağıtılmalıdır. Yapıya uygulanabilecek maksimum stres, mukavemet, akma dayanımı ve yapıdaki stres dağılımı konsantrasyonunun bilinmesi geliştirilen modellerin endüstrilere uyarlanabilmesi için önemlidir.

**Esneklik:** Materyallerin kuvvete maruz kalmaları durumunda yapılarında çeşitli değişimler görülebilir. Bu değişimler deformasyon olarak adlandırılırlar. Geçici deformasyonlar elastik deformasyon olarak adlandırılırken kalıcı deformasyonlar ise plastik deformasyon olarak adlandırılır. Yapının plastik deformasyona uğramadan yani elastik deformasyon sürecinde absorbe edip geri bıraktığı enerjiye esneklik denir. Yüksek miktarda kuvvetlere maruz kalıp şeklini koruyacak en azından plastik deformasyona uğramayacak parçalarda esneklik aranan bir özelliktir.

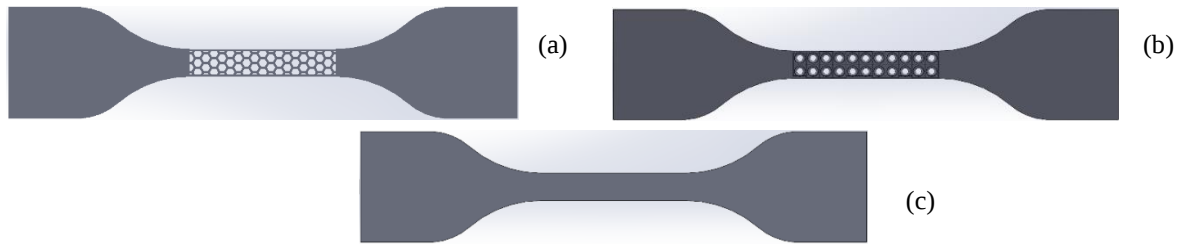
**Rijitlik:** Materyalin kuvvete maruz kalması durumunda deformasyona karşı direniş miktarını belirtir. Rijit bir materyal kuvvetten daha az etkilenir dolayısıyla daha az deformasyona uğrar. Öte yandan kuvvetten etkilenip deformasyona uğrayan materyale ise bükülebilirlik (flexibility) olarak adlandırılır. Materyallerin rijitlik değerlerinin bilinmesi kullanım alanlarının belirlenebilmesi için önemlidir.

**Elastisite Modülü:** Stres değerinin deformasyona oranı olan elastisite modülü materyalin elastiklik ölçümüdür ve belirli bir stresin yapıda sebep olduğu elastik deformasyonun bilinmesi için önemlidir. Yapısal geometrinin büyük oranda etkilediği bu değer diğer birçok materyal mekanik özelliğinin belirlenmesi için de önemli olması sebebiyle materyal biliminde önemli ve evrensel bir özelliktir.

### Numunelere Uygulanan Testler:

Belirlenen özellikler doğrultusunda modellerin mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi ve akademik standartlara uygun bir şekilde literatüre kazandırılması için en ideal mekanik testlerin çekme ve basma testleri olduğu belirlenmiştir.

#### Çekme Testi:



Şekil 6. Grafit (a), kemik (b) ve tam dolu (c) modellerin çekme testi numunesine uyarlanmış halleri.

Çekme testi malzeme bilimi alanındaki en yaygın mekanik testlerden biridir. Çekme testi uygulanan kuvvet sonucu gerilen materyalin stres ve gerinim değerlerinin incelenmesini mümkün hale getirir. Bu değerlerin kullanımıyla çekme mukavemeti, elastisite modülü, rijitlik, esneklik ve tokluk değerleri elde edilebilmektedir. Elde edilen verilerin doğrudan mühendislik hesaplamalarında kullanılabilir olması testi mühendislik uygulamalarında cazip kılmaktadır.

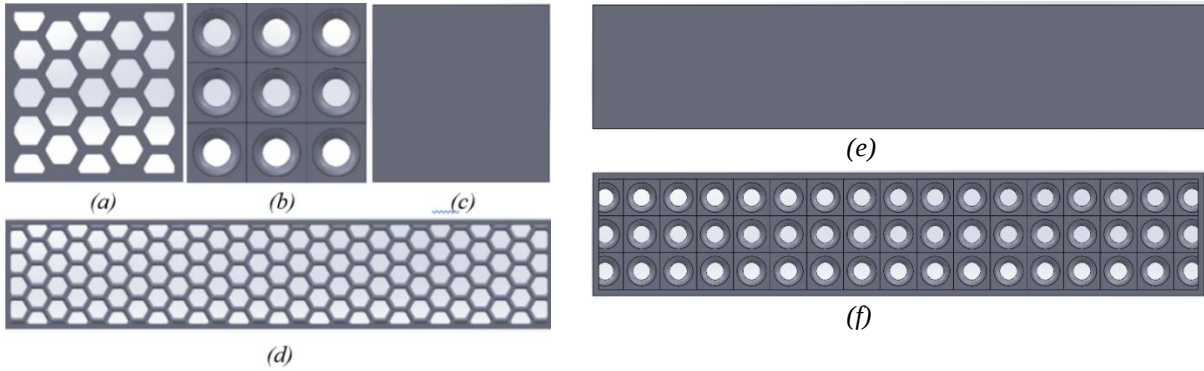
Çekme testi iki kıskaç arasına yerleştirilen materyalin kuvvet altında bırakılmasıyla stres ve gerinim değerlerindeki değişikliklerin incelenmesiyle gerçekleştirilir. Kıskaçlardan biri sabitken diğeri sabit hızda hareket eder. Böylece materyal üzerinde bir gerilim kuvveti oluşturur. Materyalin kopması veya kırılmasıyla birlikte test de sona ermiş olur. ISO 37 standartları doğrultusunda gerçekleştirilen çekme testlerinde “dogbone” adı verilen numune kalıpları kullanılmıştır. Bu kalıba uygun geliştirilen numunelere Şekil 6’da yer verilmiştir. (Taşdemir, M., 2018)

### **Basma Testi:**

Basma testleri baskı altındaki materyalin sergilediği mekanik özelliklerin incelenmesi için önemli bir testtir. Test iki plaka arasında sıkıştırılan materyalin kırılması veya bükülmesi ile tamamlanır. İki plakadan biri sabitken diğeri sabit bir hızla materyali sıkıştırır. Oluşan kuvvet materyalde stres oluştururken bozulma miktarı da gerinim değeri olarak kaydedilir.

Basma testleri test sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda ikiye ayrılır. Bu testler basma mukavemeti ve basma elastisite basma testleridir. Basma Mukavemeti basma testinde kullanılan numuneler boyut itibariyle daha küçüktür. Dolayısıyla numuneler herhangi bir bükülmeye uğramadan kırılır. Bu test basma mukavemeti değerinin elde edilebilmesi için önemlidir. Basma Elastisitesi Basma Testinde ise kullanılan numunelerin boyu daha uzundur dolayısıyla kuvvet altındaki numuneler bükülür. Böylece materyalin kaç Newton değerinde bir kuvvete maruz kaldıktan sonra büküleceği de bilinecektir. Basma Elastisitesi Basma Testi, özellikle elastisite modülü değerinin öğrenilebilmesi için önemlidir. Basma testleri sonucunda elde edilen verilerin kullanımıyla basma mukavemeti, bükülme kuvveti ve elastisite modülü değerlerine ek olarak esneklik, tokluk ve rijitlik değerleri de elde edilebilir. (Taşdemir, M., 2018)

ISO 604 standartları doğrultusunda gerçekleştirilen basma testlerinin 10x10x4 mm ve 50x10x4mm olmak üzere iki farklı numunesi vardır. Bu numunelere Şekil 7’de yer verilmiştir.



Şekil 7. Basma mukavemeti (a,b ve c) ve Basma elastisite basma testleri numuneleri.

### ***Simülasyon Testleri:***

Mekanik özelliklerin gözlemlenebilmesini mümkün hale getiren mekanik testler için sanal ortamda SolidWorks 2021 programında gerçekçi düzenekler kurulmuştur. Oluşturulan modellerin test edilebilmesi için modeller belirlenen ISO standartlarına uygun numune kalıplarına uyarlanmıştır. Numunelerin bir yanı sabit geometri kabul edilmiş, diğer yanına ise 200N'luk bir kuvvet uygulanmıştır. Testlerde hata payını en aza indirmek için testler her numune için üçer defa uygulanmıştır.

Simülasyonlar SolidWorks 2021 statik analiz testleri özellikle materyallerin gerçek hayatta üretilmeden önce bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi için önemlidir. Yapılan testler sonucunda stres konsantrasyonu değerleri gözlemlenip yapılara müdahale edilebilir. Simülasyon testi yapılan materyallerin daha sonradan laboratuvar testlerinin de yapılabilir olması hedeflenmektedir dolayısıyla modellerin tasarlanması sürecinde de kolaylıkla işlenebilir malzeme ve boyutların kullanımı tercih edilmiştir. Bu doğrultuda statik testlerin materyal tanımlanması sürecinde üretim aşamasında sağladığı kolaylık sebebiyle ABS materyali seçilmiştir. Numunelerin 3D yazıcıda üretimini mümkün kılmak için en küçük birim boyutu 2mm olarak belirlenmiştir.

Mekanik özelliklerin sanal ortamda gerçekleştirilen testler aracılığıyla değerlendirilebilmesi için temel olarak dört veri incelenmiştir. Bu veriler sırasıyla:

1. Enine kesit alanı değeri ( $A$ )
2. Numune toplam yer değişimi değeri ( $L$ )(URES yer değişimi)
3. Parametrik stres grafiği ve stres diyagramı (Von Mises gerilimi)
4. Numune kütlesi değeri

Elde edilen test sonuçları, teorik hesaplamalar sonucunda akademik standartlara uygun mekanik özelliklerin incelenmesini mümkün kılar. Simülasyon testleri laboratuvar testlerinde gözlemlenebilmesi mümkün olmayan şeylerin değerlendirilmesini de mümkün hale getirirler. Bu projede simülasyonların bu özelliğinden yararlanılmış ve kuvvet uygulanmasıyla numunelerde

gerçekleşen stres konsantrasyon diyagramlarına da yer verilmiştir. Bunun için test esnasında numunelerin 2mm derinliğindeki kesit görüntüleri alınmış ve değerlendirmelere dahil edilmiştir.

### Simülasyon Testlerinde Kullanılan Mekanik Test Değişkenleri:

Projede gerçekleştirilen testler SolidWorks simülasyonları aracılığıyla gerçekleştirilmesinden dolayı akademik standartlara uygun veriler için bazı hesaplamaların gerçekleştirilmesi gerekmiştir.  $A$  değeri için numunelerin enine kesit alanı hesaplanmıştır. Ayrıca numuneye uygulanan kuvvet sonucunda gerçekleşen yer değişikliği ( $L$ ) bulunmuştur.

**Tablo 1.** Simülasyonlar Sonucu  $L$  ve  $A$  Değeri İçin Alınan Değerler

| Şekil         | Çekme Testi                   |                 | Elastisite Modülü<br>Basma Testi |                 | Basma Mukavemeti<br>Basma Testi |                 |
|---------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
|               | $A$ değeri (mm <sup>2</sup> ) | $L$ değeri (mm) | $A$ değeri (mm <sup>2</sup> )    | $L$ değeri (mm) | $A$ değeri (mm <sup>2</sup> )   | $L$ değeri (mm) |
| <b>Grafit</b> | 9,6                           | 52,8            | 14,0                             | 5,1             | 14,0                            | 2,0             |
| <b>Kemik</b>  | 11,1                          | 17,2            | 19,7                             | 4,1             | 19,7                            | 0,6             |
| <b>Dolu</b>   | 24,0                          | 17,7            | 40,0                             | 5,0             | 40,0                            | 0,3             |

SolidWorks uygulamasından elde edilen toplam stres ve gerinim değerleriyle veri tabloları oluşturulmuştur. Oluşturulan tablolardan elde edilen veriler sayesinde Microsoft Excel uygulamasında “stres/gerinim grafiği” elde edilmiştir.

### Simülasyon Test Sonuçlarının Literatür Standart Değerlerine Çevrilmesi:

Materyal özellikleri hesaplanırken temel olarak stres ve gerinim değerlerinden yararlanılır. Stres ve gerinim değerlerinin kullanımıyla diğer birçok değer de hesaplanabilir. Materyal üzerine etkili olan stres miktarının artmasıyla gerinim miktarı da artış gösterir. Materyal uygulanan kuvvete karşı koyup eski şeklini korumaya çalışır. Bu deformasyona elastik deformasyon adı verilir. Materyalin kuvvet altındaki elastik deformasyon miktarı elastisite modülüyle ( $E$ ) ifade edilir:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

Elastisite modülü değeri kullanımıyla hesaplanabilecek önemli bir materyal özelliği rijitliktir ( $k$ ). Rijitlik cismin uygulanan kuvvete tepki olarak deformasyona karşı koyma direncidir:

$$k = E \cdot \frac{A}{L} \quad (4)$$

Belirli bir stres değeri ardından materyal yapısında kalıcı değişiklikler görülür. Özellikle akma dayanımı ( $\sigma_y$ ) noktasının aşılmasından sonra materyal tekrar eski haline dönemez. Elastik deformasyonun bitip plastik deformasyonun başladığı bu nokta da pek çok materyal özelliğinin belirlenmesinde önemlidir. Akma dayanımının elastisite modülü değeriyle kullanılmasıyla birlikte esneklik modülü ( $u_r$ ) elde edilir. Esneklik modülü değeri materyalde kalıcı bir hasar olmaksızın absorbe edilebilecek enerji miktarının bilinmesi açısından önemlidir:

$$u_r = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (5)$$

### Proje İş-Zaman Çizelgesi

| AYLAR (2020-2021)        |         |        |         |       |      |       |        |      |       |
|--------------------------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|------|-------|
| İşin Tanımı              | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık | Ocak | Şubat |
| Literatür Taraması       | X       | X      | X       |       |      |       |        | X    | X     |
| Modellerin Tasarımı      |         |        | X       | X     | X    | X     | X      |      |       |
| Simülasyon Testleri      |         |        |         |       | X    | X     | X      | X    |       |
| Test Verilerinin Analizi |         |        |         |       |      |       | X      | X    | X     |
| Proje Raporu Yazımı      |         |        |         |       |      |       |        | X    | X     |

### Bulgular

Scaffold geometrilerin modellere uygulanmasından elde edilen veriler simülasyon testleri sonucunda mekanik özellik verileri ve kütsel veriler olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

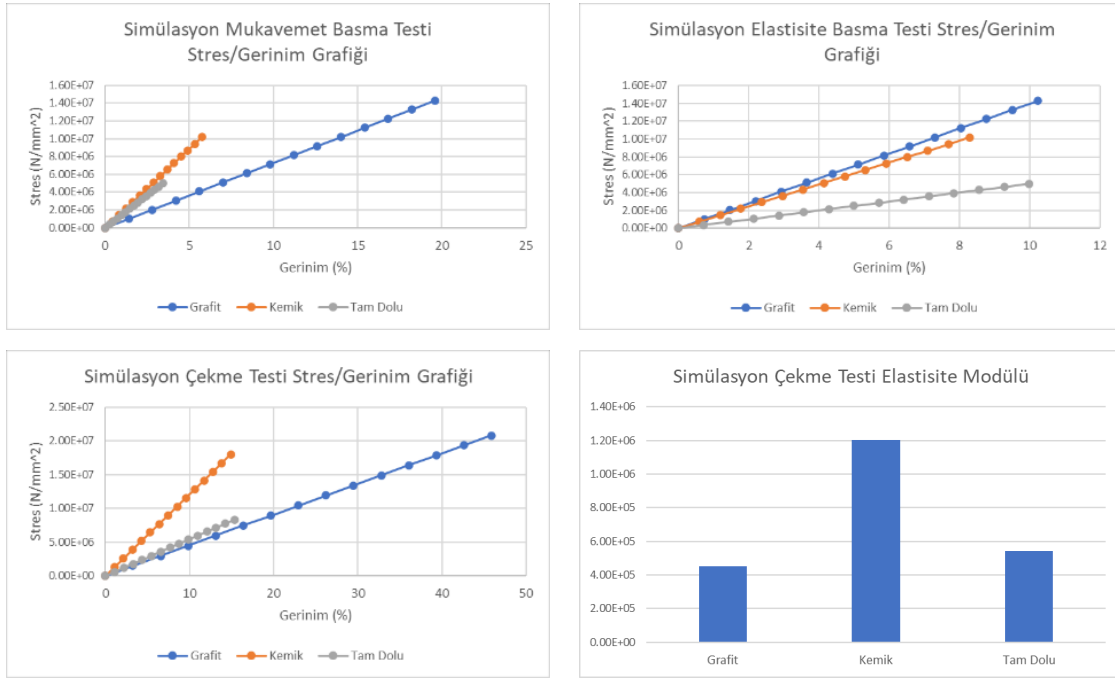
### Simülasyon Testleri Sonucunda Elde Edilen Mekanik Özellik Verileri:

Simülasyon testleri, statik analiz yaptığından yapı üzerindeki parametrik stres değerlerini öğrenmek için ideal bir yöntemdir. Parametrik değerler hakkında oluşturulan grafikler stres konsantrasyonun öğrenilmesi açısından önemlidir. Materyal üzerindeki stres dağılımı SolidWorks'ün oluşturduğu parametrik stres değerleri grafiklerinde incelenebileceği gibi materyallerden alınan kesitler ile yapıda illüstre edilebilmektedir.

Testler için belirlenen parametreler ve Tablo 1’de yer verilen A ve L değerleri Denklem 1 ve 2’deki yerlerine yerleştirilmiştir. Böylece numunelerin stres ve gerinim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlere Tablo 2’de yer verilmiştir. Yine bu değerler sırasıyla Denklem 3, 4 ve 5’te kullanılarak elastisite modülü, rijitlik ve esneklik modülü bilgileri elde edilebilir.

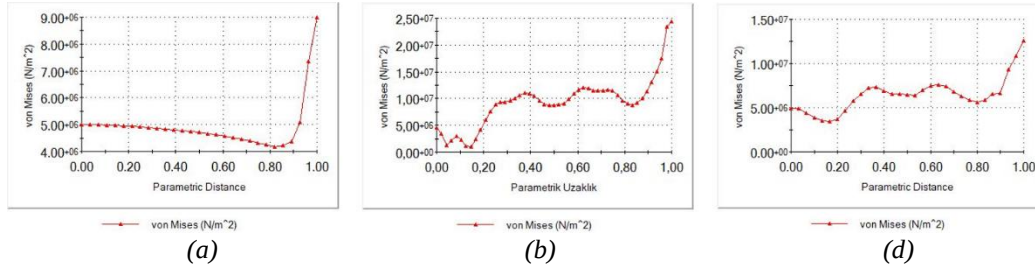
**Tablo 2.** SW’de Uygulanan 200 N’luk Kuvvet Sonucunda Elde Edilen Stres ve Gerinim Değerleri

| Şekil         | Çekme Testi                |             | Elastisite Modülü Basma Testi |             | Basma Mukavemeti Basma Testi |             |
|---------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
|               | Stres (N/mm <sup>2</sup> ) | Gerinim (%) | Stres (N/mm <sup>2</sup> )    | Gerinim (%) | Stres (N/mm <sup>2</sup> )   | Gerinim (%) |
| <b>Grafit</b> | 2083333,33                 | 45,89       | 14295925,66                   | 10,23       | 14295925,66                  | 19,62       |
| <b>Kemik</b>  | 17985611,51                | 14,92       | 10157440,33                   | 8,28        | 10157440,33                  | 5,74        |
| <b>Dolu</b>   | 8333333,33                 | 15,36       | 5000000,00                    | 9,98        | 5000000,00                   | 3,42        |

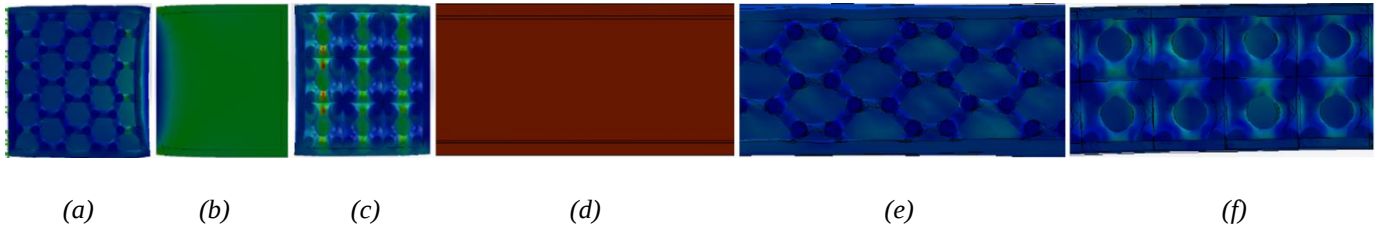


**Grafik. 1** Çekme Testi, Basma Mukavemeti Basma Testi ve Basma Elastisite Basma Testi Stres/Gerinim Çizgi Grafikleri ve Çekme Testi Elastisite Modülü Sütun Grafiği.

Yapılan testler sonucunda materyal içindeki stres dağılımının incelenmesini sağlayan parametrik stres çizgi grafikleri oluşturulmuştur.



**Grafik 2.** (a) tam dolu, (b) grafit ve (c) kemik numunelere ait sabit bir çizgi üzerindeki basma mukavemeti testi stres dağılımını gösteren parametrik stres çizgi grafikleridir.



**Şekil. 8** Basma mukavemeti basma testi (a,b ve c) ve çekme testi (d,e ve f) simülasyonları için elde edilen illüstrasyonlar. (a) ve (e) grafit, (b) ve (d) tam dolu, (c) ve (f) kemik numunelerine aittir.

**Tablo 3.** Her Teste Ait Numuneler İçin Elde Edilen Kütle ve Kütleden Kazanç Miktarları

| Şekil         | Çekme Testi |                     | Elastisite Modülü<br>Basma Testi |                     | Basma Mukavemeti<br>Basma Testi |                     |
|---------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
|               | Kütle (g)   | Kütleden Kazanç (%) | Kütle (g)                        | Kütleden Kazanç (%) | Kütle (g)                       | Kütleden Kazanç (%) |
| <b>Grafit</b> | 0,610       | 35,13               | 0,964                            | 52,70               | 0,300                           | 26,47               |
| <b>Kemik</b>  | 0,770       | 18,17               | 1,444                            | 29,20               | 0,297                           | 27,26               |
| <b>Dolu</b>   | 0,940       | -                   | 2,040                            | -                   | 0,408                           | -                   |

Proje doğrultusunda incelenen temel özelliklerden bir tanesi de materyal kazancı amacı doğrultusunda araştırılan kütle değerleridir. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerlere Tablo 3'te yer verilmiştir. Değerlerin hesaplanması sürecinde çekme testi numunelerinde modellerin uygulanmadığı kısımları hesaplamaya dahil etmemek adına bu kısmın kütlesi toplam kütleden çıkarılmıştır.

## Sonuç ve Tartışma

Scaffold Geometrinin yapılara uyarlandığı bu projede yapılan testler sonucunda çeşitli veriler elde edilmiştir. Bu bölümde ise elde edilen verilerin bir tahlili yapılacaktır, modellerin gerçek hayatta kullanılabileceği öngörülen alanlar belirlenecektir.

### Mekanik Özellikler:

Yapılan testler sonucu oluşan stres gerinim grafikleri incelenecek olursa grafiklerin en yüksek noktalarının farklı modeller için farklı olduğu görülecektir. Bu noktalar test esnasında gözlemlenen en yüksek stres değerine eşittirler. Bu doğrultuda aynı kuvvet değerinin hangi materyalde daha yüksek stres değerine sebep olduğu incelenirse en fazla stresin grafit modelde birikirken en az stresin ise tam dolu modelde biriktiği gözlemlenir. Elde edilen stres değerleri materyale uygulanabilecek maksimum stres miktarını direkt olarak vermese de genel bir fikir oluşturabilmek açısından önemlidir.

Stres ve gerinim değerlerine bağlı olarak maddenin belirli bir stres değeri için sergilediği gerinim miktarının ölçümünü sağlayan elastisite modülü hesaplanmıştır. Materyallerde kullanılan scaffold geometrisi modeline göre elastisite modülünün değişmesi oluşturulan modellerin yapının mekanik özellikleri üzerinde etkileri olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Kullanılan modellerin elastisite modülleri karşılaştırılacak olursa en büyük elastisite modülüne kemik sahip olurken en küçük modülün ise grafitin modülü olduğu görülür. Bu durumda aynı stres değeri için kemiğin daha az elastik deformasyon gösterirken grafitte daha fazla deformasyon görülür. Kemik geometrisi uyarlanmış olan modelde görülen deformasyon miktarı tam dolu modelin yarısından daha azdır. Bu durum kemiği çok daha avantajlı kılar.

Elastisite modülünün kullanımıyla birlikte diğer birçok materyal özelliği de hesaplanabilir. Nitekim rijitlik değerlerinin hesaplanması sonucunda en rijit modelin kemik modeli olduğu görülürken en az rijit olan modelin ise grafit model olduğu gözlemlenir. Bu değerler kemik modelin tam dolu modele kıyasla deformasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Öte yandan grafit modelin ise bükülebilir model olduğu gözlemlenir.

Ayrıca önemli bir karşılaştırma kriteri olan esneklik modülü değerleri göz önünde bulundurulduğunda en büyük modülün grafitte ait olurken en küçük modülün tam doluya ait olduğu görülür. Esneklik modülü materyalin kalıcı deformasyona uğramadan önce absorbe edeceği enerjiyi gösterir. Dolayısıyla bir materyalin daha mukavvim yapıya sahip olabilmesi için esnek bir

yapısının olması gerektiği söylenebilir. Bu durumda tam dolu modelden daha büyük esneklik modülüne sahip olan modellerin daha mukavvim davranışlar sergilediği görülecektir. Kemik model tam doludan iki kat altıgen model ise yaklaşık yedi kat daha fazla enerji absorbe edebilir.

Materyallerde önemli bir özellik olan stres dağılımı homojenliğinin incelenmesi için parametrik stres grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan grafiklerde dikkat edilmesi gereken en önemli özellik grafiğin maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın maksimum strese oranının az olmasıdır. Bu koşul göz önünde bulundurularak grafikler incelenecek olursa tam dolu modelin iki ucunda stres konsantrasyonunun çok fazla arttığı fakat diğer modellerde yoğunluğun orta kısma dağıldığı görülür. Bu durum projemizde kullanılan modellerin sıradan içi dolu yapılara kıyasla daha iyi stres dağılımı sağladığını göstermektedir. Konsantrasyon dağılımının daha iyi gözlemlenebilmesi için yalnızca basma mukavemeti testi grafiklerine yer verilmiştir.

### **Kütlesel Özellikler:**

Modeller arasında yapılan karşılaştırmalarda son parametre kütle kazanımıdır. Tablo 3'te gösterildiği üzere kütleden kazanç oranı %53'e kadar artış gösterebilmektedir. Bu durum kullanılan modellerin materyal kazancı konusunda iddialı sonuçlar gösterebileceğini kanıtlar. En fazla kazanç grafit modelde görülürken en az kazanç ise kemik modelde görülmüştür.

Karşılaştırılan tüm parametrelerin hep birlikte değerlendirilebilmesi için tüm değerlere ve bu değerlerin tam dolu modele sayısal kıyaslanmasına Ek-1'de yer alan Tablo 1'de yer verilmiştir. Tabloda ayrıca performans/kütle oranlarına da yer verilmiştir.

### **Modeller İçin Elde Edilen Spesifik Sonuçlar:**

**Grafit:** Grafit model, karbonlar arasın oluşan katmanlı yapıdan alınan ilhamla geliştirilmiştir. Modelin mekanik özellikleri incelenecek olursa yapının tam dolu yapıdan daha fazla stres oluşumuna sebep olduğu görülecektir. Elastisite modülü ve rijitliği en küçük olan grafit model, esneklik modülü en fazla olan modeldir. Ayrıca %35 ila 53 arasında bir kütleden kazanç sağlamaktadır. Altıgen modelin en büyük avantajı kütleden maksimum avantaj sağlarken tam dolu modelden yaklaşık yedi kat daha esnek olmasıdır. Kare model, bu gibi özelliklerin arandığı alanlarda kullanılabilir.

**Kemik:** Kemik model, insan kemik dokusundan alınan ilhamla geliştirilmiştir. Stres birikiminde ortalama bir sonuç veren kemik model, en büyük elastisite modülüne sahiptir. Rijitlik konusunda en iyi model olan kemik model esneklik modülü değeri için de ortalama bir değer verir. Kemik modülün en önemli özelliği yüksek elastisite modülü, rijitlik ve esneklik değerlerinin onu deformasyona dayanıklı mukavvim bir materyal haline getirmesidir. %18 ila 29 arasında değişen kütle kazancı oranıyla kemik model birçok sektörde tam dolu modelin yerini alabilme potansiyeline sahiptir. Her ne kadar kesin bir sonuca varmak için saha çalışmaları gerekse de üretimindeki kolaylık ve materyal özellikleri kemik modeli uygulamasını önemli bir üretim yöntemi haline getirir.

Farklı materyal özellikleri sergileyen bu iki modelle birlikte skaffold geometrinin kullanımıyla materyal üretiminde görülecek önemli gelişmelere dikkat çekilmesi hedeflenmiştir. Zira sadece iki örneğine yer verilmiş olan skaffold geometri materyal özellikleri üzerindeki mekanik ve kütsel etkilerini açıkça göstermiştir. Elde edilen sonuçlar oluşturulan modellere farklı sektörlerde kullanım alanları sunmaktadır. Sektörlerde skaffold geometrinin kullanımıyla birlikte gerek mekanik performansı yüksek ürünler üretilecek gerekse materyalden sağlanan kazançla doğal kaynaklar korunmuş olacaktır. Bu sayede metodolojinin kullanımıyla üretimde kullanılan ham madde miktarı azaltılırken bilinçli bir tüketim için yeni bir metodoloji geliştirilmiştir.

## Öneriler

Yapılan çalışmada kemik ve grafit yapıda birim hücre olarak kullanılmıştır. Üzerine inceleme yapılan bu iki temel yapı doğadan ilham alınarak tasarlanmıştır. Malzeme biliminde birim hücre kullanımıyla doğadan alınacak çok fazla ilham vardır dolayısıyla farklı yapılar üzerinde de çalışmaların devam etmesi hedeflenmektedir. Projenin hedeflediği sürdürülebilir bir yaşam için numuneler üzerindeki çalışmanın günlük hayatta kullanılan yapılara entegrasyonu ile doğrudan malzeme kullanımındaki miktarın düşürülmesi önerilmektedir. Çalışma esnasında karşılaşılan problemlerden bir tanesi birim hücrelerin yapıya yerleştirilmesinin manuel yapılmasından ötürü harcanan vakittir. Bu problemin önüne işleri otomatikleştirecek bir yazılımla geçilebilir. Bu yazılımla üretim aşamasındaki tüm ürünlere geliştirilen metodoloji entegre edilebilir. Her ne kadar daha önceden yapılan çalışmaları referans alarak bu çalışmada laboratuvar testleri yapılmamış ve farklı materyaller üzerinde testler gerçekleştirilmemiş olsa da geliştirilen yeni metodoloji üzerinde

de bu testler yinelenabilir. Bu çalışmadaki simülasyonlarda üç farklı etüdün çalıştırılmasından elde edilen veriler kullanılmış olsa da daha fazla deney daha doğru bir sonuca ulaştıracaktır.

### **Kaynaklar**

- Chantarapanich, N., Puttawibul, P., Sucharitpwatskul, S., Jeamwattthanachai, P., Ingham, S., & Sitthiseripratip, K. (2012). Scaffold library for tissue engineering: a geometric evaluation. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2012.
- Desai, Y. M. (2011). *Finite element method with applications in engineering*. Pearson Education India.
- Güler, M., & Sadri, Ş. (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Kakani, S. L. (2004). *Material science*. New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Kalender, M., Kılıç, S. E., Ersoy, S., Bozkurt, Y., & Salman, S. (2019, June). Additive manufacturing and 3D printer technology in aerospace industry. In *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 689-694). IEEE.
- Kelly, B. T. (1981). *Physics of graphite*.
- Polo-Corrales, L., Latorre-Esteves, M., & Ramirez-Vick, J. E. (2014). Scaffold design for bone regeneration. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 14(1), 15-56.
- Rayneau-Kirkhope, D., Mao, Y., & Farr, R. (2012). Ultralight fractal structures from hollow tubes. *Physical review letters*, 109(20), 204301.
- Sigmund, O., & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031-1055.
- Sorumlu Üretim ve Tüketim. (t.y.). UNDP Türkiye. Retrieved February 14, 2022, from <https://www.tr.undp.org/content/turkey/tr/home/sustainable-development-goals/goal-12-responsible-consumption-and-production.html>
- Taşdemir, M. (2018). *Plastik Malzemelerin Test Teknikleri*. Seçkin Yayıncılık.
- Zadpoor, A. A. (2015). Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. *Biomaterials science*, 3(2), 231-245.