

Proje Ana Alanı: Fizik

Proje Tematik Alanı: Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji

Proje Adı (Başlığı): Fraktal Yapılara Benzetimle Tasarlanan Üç Boyutlu Yapıların Mekanik Özelliklerinin Analizi ve Yeni Bir Modelleme Metodolojisinin Oluşturulması

Özet

Bu çalışmada doğada bulunan fraktal yapılarla benzetimle yeni bir modelleme metodolojisi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Metodolojinin temel amacı malzemeden kazanç sağlarken üretilen üç boyutlu yapının performansını maksimum değerlere ulaştırmaktır. Bu amaçla üretilen modeller, sanal ve fiziki ortamda mekanik testlere tabi tutulmuştur. Testler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilip metodolojinin kullanımı ile oluşturulabilecek modellerin endüstrideki olası kullanım alanları değerlendirilmiştir.

Modelleme metodolojisinde materyal yapı modelleri, Sierpinski Üçgeni, Sierpinski Halısı, Hexaflake ve Appollonian Gasket fraktallarına benzetim yapılarak tasarlanmıştır. Üretilen modeldeki birim yapılar fraktal geometrideki örüntü takip edilerek üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. Fraktal örüntüye sahip test numuneleri SolidWorks 2019'da simülasyon testlerine tabi tutulmuştur. Ek olarak karşılaştırma amaçlı numuneler üç boyutlu yazıcıda basılarak laboratuvarında mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Fraktal geometrinin yapıya olan aktarımındaki zorlukların önüne C# dilinde geliştirilen bir yazılım ile geçilmiştir. Bu yazılım sayesinde fraktal çizimlerinin tasarım programlarına aktarımı mümkün kılınmıştır.

Mekanik testler ile modellenen yapıların esneklik, rijitlik, kırılabilirlik ve elastiklik özellikleri araştırılmıştır. Sanal ve fiziki ortamda gerçekleştirilen testlerden elde edilen veriler karşılaştırılarak; dijital ortamda yapılan testler ile laboratuvar ortamında yapılan testlerin korelasyonu değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme neticesinde sanal ortamda yapılan testlerle laboratuvarında yapılan testlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Karşılaştırma verileri ile modelleme metodolojisinin optimum kullanım alanları değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak farklı fraktal örüntüyle üretilen yapıların, mekanik yapısında farklı etkiler görülmüştür. Bu durum proje kapsamında geliştirilen modelleme metodolojisinin birçok sektör ve sistem için uygulanabilirliğini göstermektedir. Tasarlanan modellerde tam dolu parçaya nispeten daha az materyal ve enerji kullanılmasını sağlayan bu metodoloji, doğadan alınan ilham ile doğal kaynakların korunmasını hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Fraktal, Benzetim, Simülasyon, 3 Boyutlu Baskı, Malzeme Bilimi, Verimlilik

1.Amaç

Günümüzde endüstriler yeni ürünlerin arayışında oldukları kadar o ürünleri en verimli şekilde üretebilecekleri yöntemlerin de arayışındadırlar. Ham maddenin minimum seviyede kullanılması ve ürünün kalitesinin artması hedefi doğrultusunda malzeme bilimi gelişmiş ve bu ihtiyacı giderebilecek bazı çözümler ortaya çıkmıştır. Fakat bu çözümlerin çoğunun üretim

ve tasarım aşamasındaki sorunlar nedeniyle realitede uygulanabilirliği oldukça düşüktür. Bu dezavantajları minimize etmek için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Fakat üretim ve tasarım aşamasındaki çoğu sorun şu an için hala çözüm beklemektedir [1].

Bu projede lineer fraktallardan alınan ilhamla halihazırda kullanılan yöntemlere daha kolay ve ucuz olan, standartlaştırılmış bir alternatif geliştirilmesi hedeflenmiştir. Fraktalların, kullanıldıkları parçaların tam dolu parçalara karşın hacimde azalmaya yol açan yapısı; kullanıldıkları alanda malzemeden kâr sağlarken kendilerine özel geometrileri, yapı içerisindeki stresin homojen dağılmasını sağlar. Böylece daha iyi performanslar sergileyebilecek, daha mukavim ürünlerin üretilmesi mümkün kılınır. Bu yöntemin üreticiye kazanç sağlarken tüketiciye de daha kaliteli bir ürün sunması beklenmektedir. Öte yandan materyalden edilen kârla birlikte ekonomi ve doğanın üzerine binen yükü hafifletmek amaçlanmaktadır.

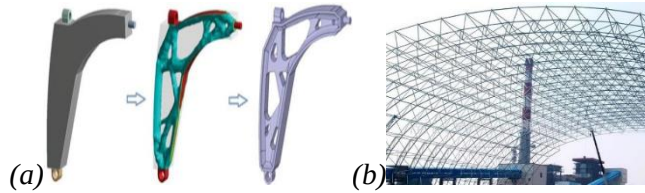
2.Giriş

Malzeme bilimi 20 ve 21. yüzyılda öne çıkmış olan bir bilim dalıdır. 20. yüzyılda gerek kuantum mekaniğindeki gelişmelerle birlikte katı maddelerin yapısının anlaşılması gerekse havacılık, uzay, inşaat ve daha birçok sanayinin gelişmesiyle yeni teknolojileri hayata geçirebilecek daha verimli malzemelerin arayışında artış olmuştur. Materyallerin mukavemeti artarken malzemeden kâr etmeyi amaçlayan, ekonomik ve çevreci bir bakış açısı kazanılmıştır. Yeni materyaller üreten ve üretim yöntemleri geliştiren malzeme mühendislerinin bu süreçte gerek endüstri gerekse kullanıcılar ve çevre için önemi artmıştır [2].

Havacılık ve uzay gibi hafifliğin ve mukavemetin materyal seçiminde önemli olduğu sektörlerde gelişmelerin büyük çoğunluğu malzeme bilimine bağlıdır [2]. Malzeme bilimi bu ihtiyacı yaygın olarak topoloji optimizasyonu (TO) yöntemiyle karşılamaktadır. Matematiğe ait bir kavram olan topolojinin fiziksel dünyaya uyarlanmış hali olan TO çok temel bir mühendislik sorusu olan “Bir malzeme önceden belirlenmiş bir tasarım alanına en iyi yapısal performansı sağlayacak şekilde nasıl yerleştirilebilir?” sorusuna cevap arar [3]. Genellikle bilgisayar aracılığıyla uygulanan TO, çeşitli matematiksel ifadelerle tasarımın etkisi altında kalacağı kuvvetleri değerlendirip tasarım önerileri sunar. Bu öneriler doğrultusunda manuel bir şekilde gerçek hayatta üretilebilir tasarımlar oluşturulur. TO’nun tasarım önerileri standart sonuçlara sahip olmadığı için her parçada uygulanabilir kesin bir sonuç vermekten uzaktır. Üretilecek her parça için topoloji etüdü ihtiyacı, metodun yaygınlaşmasına engel olmuştur. Tasarım sürecini çok zaman alan ve masraflı bir süreç haline getiren bu durum, avantajlarının yanında, ürünün üretim aşamasındaki zorluğun ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır [4]. Bu durum TO’nun kullanımını sadece havacılık ve uzay sanayileri gibi ekonomik olmasından çok performansın kritik rol oynadığı ve geliştirme aşaması yıllara dağılan ürünlerle sınırlı kılmıştır. Bu sektörlerin haricinde son yirmi yıllık süreç içerisinde gelişen 3B baskı gibi eklemeli imalat metotları (EİM) ile birlikte TO’nun kullanımında artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artış, EİM’in dezavantajları sebebiyle beklenen seviyeye ulaşamamıştır.

İnşaat sektöründe, topoloji yöntemine daha pratik bir alternatif olarak uzay kafes sistemi (UKS) geliştirilmiştir. Klasik düzlemsel yapının tüm stresi temellerde biriktiren yapısının aksine karşılıklı metal kirişlerin arasına, kirişleri birleştiren bir eklem yerleştirilmesiyle oluşturulan

sistem; üzerindeki yükü yapının üç boyutlu geometrisine göre dağıtır. Bu durum yapının üzerinde tek bir noktada toplanan stresi azaltır. Böylece yıkılma gibi kazaların olasılığını düşürür. Ayrıca yapının hafif ve estetik olması onu zamanla çok tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir. Bu yöntem TO'ya göre üretimi daha kolay olmasına rağmen tasarım ve işçilik konusunda yine zorlu bir yöntemdir. Yapılan ufak bir hata büyük kayıplara yol açmaktadır [5].



Şekil 1. (a) topoloji optimizasyonuna; (b) UKS'ye örnek uygulamalara ait görsellerdir.

2.1.Yapı Geometrisinin Mukavemete Etkisi

Yeni bir materyal tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardan biri malzemenin yapısıdır. Bir malzemenin sergilediği performans malzemenin yapısı ile ilişkilidir. Performanstaki değişimler stres ve gerinim değerlerinden kaynaklanmaktadır. Stres (σ) kuvvete maruz kalan bir malzemede alan başına düşen kuvvet miktarıdır. F malzeme üzerindeki kuvvet, A enine kesit olmak üzere;

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

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

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

Her malzeme kullanıldığı alan ve sistem içerisinde kuvvete maruz kalmaktadır. Bu kuvvet malzemelerde spesifik stres ve gerinime sebep olmaktadır. Malzemeye uygulanan stresin bazı spesifik stres değerlerini geçmesi durumunda malzeme özelliklerinde ve yapısında çeşitli kalıcı değişiklikler görülür. Bu değişikliklerden birisi olan kırılma enine kesit alanının en küçük olduğu yerde gerçekleşir. Homojen bir yapıda maksimum stres değerinin aşılmasının ardından kırılma numunenin ortasında gerçekleşir. Fakat yapıda boşluk benzeri bir hata bulunması durumunda stres konsantrasyonunun bozulma ihtimali artar. Hatalı kısmın çevresinde yerel bir stres birikmesi gözlemlenir. Stres birikimi hatayı kısa sürede daha büyük bir hale getirip kırılma sürecini hızlandırabilir. Fakat boşluklar hata olarak değil de bilinçli bir şekilde yerleştirilirse yapı üzerinde pozitif sonuçlar doğurabilir.

Bal Peteği (honeycomb) kompoziti, düzenli boşluklardan oluşan üç boyutlu geometrik yapısı sayesinde materyal yapısının değiştiği yöntemlerdendir. Yüksek oranda materyal ve kütle verimliliği kazandıran yöntem sandviç panellerin üretiminde kullanılmaktadır. Uçak kanatlarında olduğu gibi kullanıldığı yapılara yüksek oranda sağlamlık kazandırabilen bal peteği kompozitler, beton ile kaplanıp inşaat yapı malzemesi olarak da kullanılmaktadır [6].

2.2.Fraktal Nedir?

Son birkaç yüzyıla kadar insanların geometri algısı genel itibarıyla matematiksel olarak kalkülüsle açıklanabilir şekillerden ibaretti ve bu kurallara uymayan şekiller kuralsız kabul edilir, kendileriyle alakalı çok fazla çalışma yapılmazdı. Kuralsız şekiller karmaşık sayıların

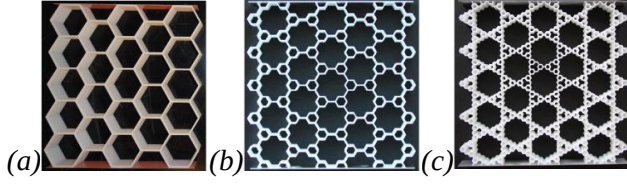
keşfi ile açıklanabilir bir hal kazandı. Fraktal geometri; karmaşık sayıların incelenmesini, oluşturduğu yapılarla mümkün hale getiren geometri türüdür [7]. Doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (non-lineer) olarak ikiye ayrılan fraktallar: sonu olmayıp sürekli belirli bir ölçüyle iterasyon sayısı kadar kendini tekrar eden yani öz benzeşliğe, simetriye ve kıvrımsal detaylara sahip matematiksel şekillerdir. Yapraklar, ağaç dalları, dağ sıraları, bulutlar, galaksiler, dalga şekilleri ve sinir sistemi gibi birçok doğal yapı da öz benzeşliğin görülebileceği fraktal örnekleridir [8].

2.3.Fraktalların Kullanıldığı Alanla

Fraktal geometrinin estetik kullanımına yüzyıllardır rastlansa da teorik bilgilerin teknoloji haline gelmesi son yirmi yıla kadar çok nadir olarak görülmektedir. Fakat son birkaç yıllık süreç içerisinde fraktal yapılar malzeme bilimcilerin de dikkatini çekmeyi başarmıştır. Özellikle fraktal yapıların belirli bir oranla aynı şekli tekrarlayan hiyerarşik yapısı önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu fraktallara ve hiyerarşik düzene sahip yapılarda mukavemet ve sertlik değerlerinin tam dolu yapılara oranla farklı değerlere sahip olduğu görülmüştür [9,10].

Yapılan literatür taramasının sonucunda son zamanlarda fraktal yapının materyal üzerindeki etkilerini araştıran önde gelen çalışmalardan biri Yong Mao ve arkadaşlarına ait olan ve UKS’de hiyerarşik yapının kullanımıyla daha güçlü bir yapının elde edilmesini sağlayan çalışmadır. Ekip, araştırmalarına normal çelik boruları test ederek başlamış ve her seferinde giriş miktarını arttırarak fraktal benzeri bir yapı elde etmiştir. İşlemin üç defa tekrarlanması sonucunda oluşan üçüncü jenerasyon yapılar üzerinde gerçekleştirilen testler ve hesaplamalar sonucunda bu yapının sıradan çeliğe göre 10000 kat daha kuvvetli olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak bu yapının normalde 79 tonluk ve 200 metrelik bir çelik girişin taşıyabileceği yükü sadece 162 kg’lık çelik kullanımıyla taşıyabileceği bildirilmektedir. Bu durum yaklaşık olarak %99,8 oranında malzemeden kazanç sağlamaktadır. Fakat her şeye rağmen yapının çok hassas olması üretimini çok zor hale getirmektedir. Yapının prototipleri, profesyonel amaçlar için geliştirilmiş 3B yazıcılarda 16 mikrometre (0,016 mm) hassaslığı ile üretim yapabilen rapid manufacturing metoduyla üretilmiştir. 3B yazıcıların çoğu bu ihtiyacı karşılayamamaktadır. Ayrıca bu çalışmada üretilen yapının şu an için girişler haricinde olası bir kullanım alanı da bulunmamaktadır [10,11].

Fraktallardan esinlenerek oluşturulan hiyerarşik yapının kullanıldığı diğer önemli bir çalışma da Ashkan Vaziri ve arkadaşlarına ait olan çalışmadır. Bu çalışmada sıradan bal peteği kompoziti oluşturan altıgenin köşelerinde daha küçük altıgenler oluşturularak ve oluşturulan yapının köşeleri de daha küçük altıgenlerle değiştirilerek fraktal benzeri bir yapı elde edilmiştir. Elde edilen yapılar mekanik testlere tabi tutulmuş ve sonuçlar sıradan bal peteği modeliyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda fraktal benzeri tasarımın sıradan tasarımdan iterasyon sayısına bağlı olarak baskıya 2,0 ila 3,5 kat daha dayanıklı olduğu hesaplanmıştır. Bu tasarım yönteminin kullanımı, baskı altında kalacak bir materyal için daha caziptir [12]. Fakat bu tasarım sıradan fraktalların aksine iterasyonu arttıkça kütlenin artmasına sebep olmaktadır. Üstelik bu yöntem sonucu oluşturulan yapı doğrudan malzeme olarak kullanılamayıp sandviç panel veya beton yapıya ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 2. (a) 0, (b) 1 ve (c) 2. dereceden hiyerarşik yapı bir bal peteği kompozite ait görüntülerdir.

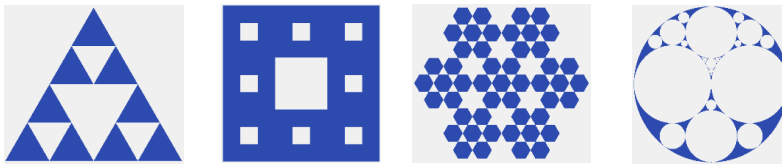
Bu projede fraktal yapıların kullanımıyla birlikte topoloji ile UKS'ye kıyasla üretimi ve tasarımı kolaylaştıracak; katı malzemelerde kuvvetin homojen dağılımının, yer değişiminin ve mukavemetinin maksimum ve minimum olmasını öngören koşullar için daha az malzeme kullanımı ile oluşturabilecek çevreci bir alternatif üretim metodolojisi oluşturulmuştur.

3.Yöntem

Geometrik bir şekilden sürekli kendisiyle aynı fakat daha küçük olan şekillerin çıkarılmasıyla oluşturulan doğrusal fraktallar teorik olarak sonsuz iterasyona vardıklarında en kısa kenar uzunluğu gitgide sıfıra yaklaşacaktır. Teorik anlamda mümkün olan bu sürecin gerçek hayatta bir karşılığı yoktur. Fakat iterasyon sayısının azaltılmasıyla gerçek bir fraktal olmasa da fraktala benzer bir şekil oluşturulması mümkündür. Bu şekilde oluşturulan bir şeklin üç boyutlu üretimiyle sıfır kütleli olmasa da dolu modelden daha küçük kütleli bir malzeme elde edilebilir.

Bu projede doğrusal fraktalların hiyerarşik öz benzeş yapısından ve sıfıra yakınsamasından alınan ilhamla üçgen, kare, altıgen ve daire şekillerinden oluşan fraktalların özellikleri incelenmiştir. Bu şekillerden oluşturulabilecek fraktal benzeri bir yapının gerçek hayatta daha hafif ve daha kuvvetli malzemeler üretebilen bir metodoloji haline getirilip getirilemeyeceği sorusuna yanıt aranmıştır. Üçgen için Sierpinski üçgeni, kare için Sierpinski Halısı, altıgen için Hexaflake ve daire için ise Apollonian Gasket fraktalından esinlenmiştir. Bu seçimler yapılırken şekillerin diğer fraktallara karşın üretilebilirlikleri ve sadelikleri göz önünde bulundurulmuştur.

Oluşturulan materyallerin tam dolu materyallerle kıyaslanabilmesi için çeşitli parametreler belirlenmiş ve bu parametreler doğrultusunda bazı mekanik testlerin yapılması kararlaştırılmıştır. Kullanılacak testlere uygun ölçülerde numuneler üretilerek 3B baskı alınmasına karar verilmiştir. Modellerin oluşturulmasında kullanılan fraktalların kompleks iki boyutlu çizimlerini kolaylaştırmak için bir yazılım geliştirilmiştir. COVID-19 pandemi sürecinden ötürü proje aksiyon planı olabildiğince elde olan imkanlarla yürütülebilecek şekilde hazırlanmıştır. Dolayısıyla tasarlanan şekillerin yapı malzemelerine olan entegrasyonu sonucunda yapılması hedeflenen testlerin öncelikle sanal ortamda gerçekleştirilmesi ve imkân dahilinde laboratuvar, üç boyutlu yazıcılarda basılacak test numuneleri ile tekrarlanması planlanmıştır. Laboratuvar testleri İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Mekanik Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Sırasıyla Sierpinski üçgeni, Sierpinski Halısı, Hexaflake ve Apollonian Gasket fraktallarının ikinci iterasyonlarına ait görüntüler.

3.1.Testler

3.1.1.Üretilcek Materyalde Test Edilecek Özellikler

Fraktal yapıların bir tasarım metodolojisi haline getirilmesi hedeflenen bu projede metodolojinin sıradan üretim yöntemleri üzerinde bazı avantajlar bulundurması hedeflenmektedir. Bu avantajları oluşturabilecek parametreler çeşitli sektörlerin ihtiyaçları doğrultusunda yapılan literatür taramaları sonucunda seçilmiş olup materyalin tabii tutulacağı testler bu özellikler doğrultusunda kararlaştırılmıştır. Fraktal yapı metodolojisiyle 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş numunelerle içi dolu numunelerin kıyaslanması için belirlenen parametreler:

1- Kütleden kazanç sağlamak: Aynı performansı sergileyen iki farklı kütleli parçadan hafif olanın ağır olana tercih edilmesi çok daha olağandır. Ağır bir parça, kullanıldığı herhangi bir sistemin toplam kütlesini ve sistemin hareketinde harcanan enerji miktarını artırır. Hafif parçaların kullanımıyla sistemin verimi artmaktadır. Hafif parçaların üretiminde daha az enerji ve daha az materyal kullanılması da tercih edilmelerinde etkili olan sebeplere dendir. Enerjiden ve materyalden elde edilen tasarruf aynı zamanda doğaya verilen zararı azaltacaktır.

2- Materyale uygulanabilecek maksimum kuvvet: Çoğu endüstride mekanik parçalar büyük kuvvetlere maruz kalmaktadır. Parça üzerinde strese sebep olan bu kuvvetin çok fazla olması azami mukavemet (Ultimate Strength) değerini aşan bir stres oluşturmakta ve materyalde kırılmalar başlamaktadır. Bu gibi durumların önüne geçebilmek için, olabilecek en yüksek akma dayanımı ve azami mukavemet değerlerine sahip olan malzemeler üretilbilir veya halihazırda piyasada bulunan malzemelerin yapılarında gerçekleştirilecek değişiklikler ile stres konsantrasyonunun homojen dağılımı sağlanabilir. Akma dayanımı ve azami mukavemet tasarım konusunda göz önünde bulundurulacak en önemli kavramlardandır.

3- Esneklik: Esneklik, materyalin plastik deformasyona uğramadan maruz kaldığı kuvveti enerji olarak absorbe edip geri bırakabilme yeteneğidir. Özellikle yüksek miktarda kuvvete maruz kalıp şekil değiştirmemesi gereken materyallerde önemli bir özelliktir.

4- Rijitlik: Kuvvet altında kalan materyaller için önemli bir özellik olan rijitlik, materyalin yapısının uygulanan kuvvetin oluşturduğu deformasyona karşı direniş miktarını ifade eder. Daha rijit bir materyalin uygulanan kuvvetten daha az etkilenmesi ve daha az deformasyon sergilemesi beklenir. Rijitliğin tersi olan bükülebilirlik (flexibility) ise materyalin uygulanan kuvvetten daha fazla etkilendiği durumlar için kullanılır. Bu özelliğin bilinmesi tasarım için materyal seçimi esnasında göz önünde bulundurulur.

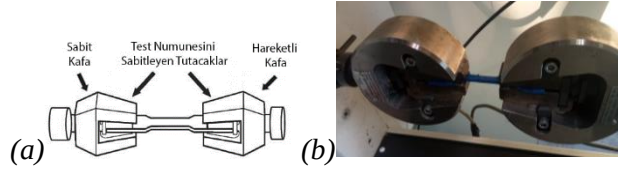
5- Elastisite Modülü: Materyalin elastisitesinin ölçümü olarak tanımlanabilecek elastisite modülü materyalin elastik deformasyona direncini ifade etmek için kullanılır. Elastisite modülü materyale ait olan birçok özellik üzerinde etkili olması sebebiyle önemli bir özelliktir. Yapının iç geometrisi ile değişen bir değer olması bu çalışmadaki karşılaştırma faktörlerinden birisi olmasında etkili olmuştur.

Yapılan araştırmalar doğrultusunda yapının iç geometrisinin malzeme üzerindeki etkilerinin en iyi karşılaştırılabileceği testlerin çekme ve basma testleri olduğu tespit edilmiştir.

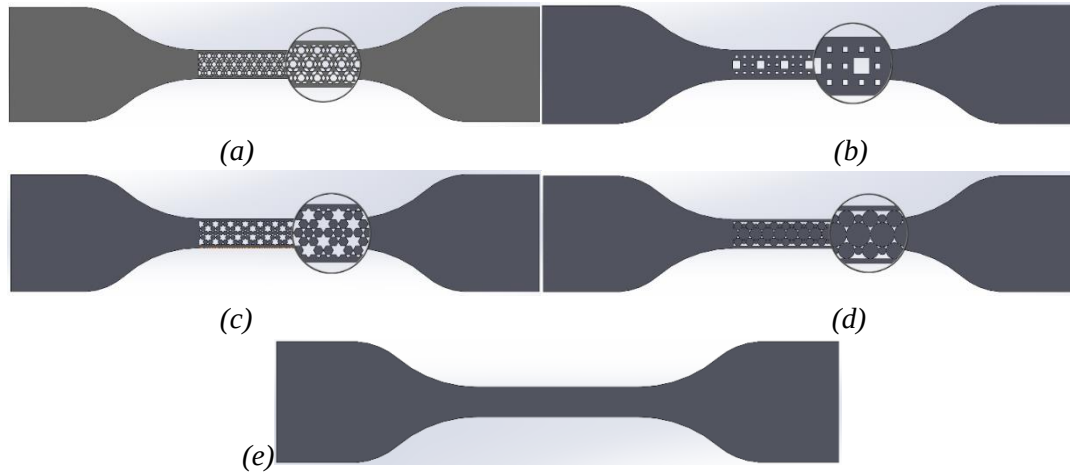
3.1.2.Çekme testi

Malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek ve yapılarıyla özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek için mekanik testler içerisinde en yaygın olanı çekme testidir (ÇT). Bunun nedeni

çekme testinden hem malzemelerin mekanik davranışları ile ilgili sonuçlar elde edilmesi hem de elde edilen sonuçların mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılabilmesidir [13].



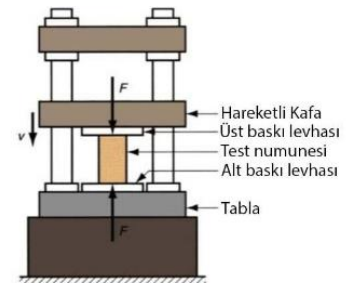
ISO 37 standardına göre üretilen kalıpla gerçekleştirilen ÇT düzeneğinin diyagramı Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi numune iki kısıkaç arasına yerleştirilir. Soldaki kısıkaç sabitken sağdaki sağa doğru hareket ettirilerek materyal üzerinde bir çekme kuvveti oluşturulması sağlanır. Deney numunelerinin tek eksen ve sabit bir hızla, koparılmaya kadar çekilmesiyle test tamamlanmış olur. Kuvvetin oluşturduğu stres ve gerinim değerleri ile çekme mukavemeti, esneklik, tokluk, rijitlik, elastisite modülü gibi birçok değer elde edilir. SolidWorks 2019 (SW) uygulamasında hazırlanan test numunelerinin etrafına -kapalı görünüm kazanması adına- 0,5 mm ekstrüze yüzey eklenmiştir.



Şekil 5. (a), (b), (c), (d) ve (e) sırasıyla üçgen, kare, altıgen, daire ve tam dolu modellerin ÇT numunelerinin 0,5 mm ekstrüze yüzeyinin kaldırılmış halinin SW'deki görüntüsüdür.

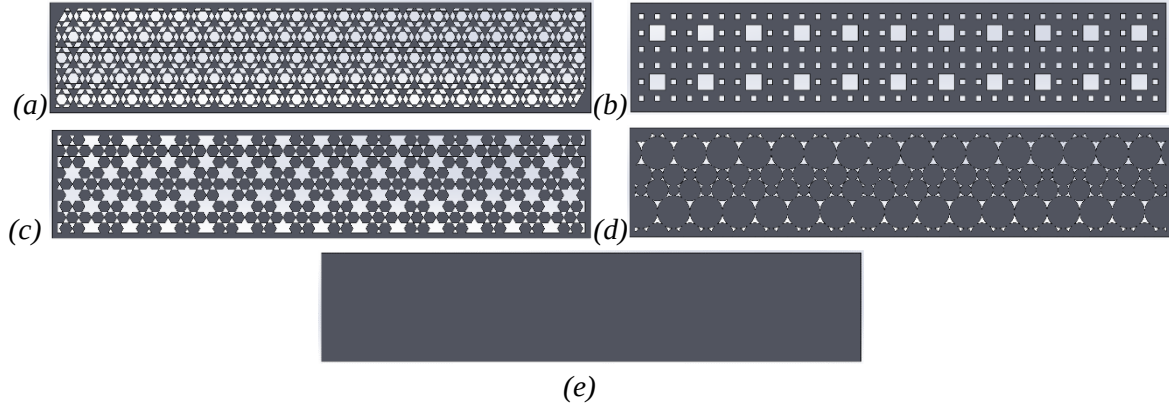
3.1.3. Basma Testi

Basma testi (BT) malzemelerin birim kesitinin -herhangi bir kırılma bükülme benzeri olumsuz durum olmaksızın- dayanabileceği maksimum yükü belirlemek amacıyla yapılır. BT, standartlara göre hazırlanan deney numunesinin, sabit sıcaklıkta ve tek eksen, belirli bir hızla, malzeme yük taşıyamaz duruma gelene kadar basılması işlemidir. Yük uygulanan plakaların yüzeyleri, numunenin düşey eksenine dik ve birbirine paralel olmalıdır. Bu kuvvetin oluşturduğu stres ve gerinim değerlerinden yola çıkarak basma mukavemeti, esneklik, tokluk, rijitlik, elastisite modülü ve bükülme kuvveti gibi birçok değer elde edilir [13].

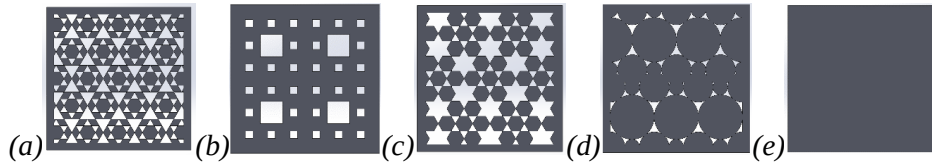


Şekil 6. BT'nin gerçekleştiği mekanizmanın bir diyagramı.

ISO 604 standardına göre gerçekleştirilen BT için istenilen verilere göre iki adet test numunesi çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan birinin boyutu 10x10x4 mm olup materyalin basma mukavemetini belirlerken diğerinin boyutu 50x10x4 mm'dir ve materyalin elastisite modülünün hesaplanmasını sağlar. Elastisite modülünün bilinmesi baskı altında kalan ve bükülme tehlikesi olan parçalar için önemlidir. SW uygulamasında test numunelerinin etrafına 0,5 mm lik ekstrüze yüzey eklenmesi ile kapalı bir görünüm sağlanmıştır.



Şekil 7. (a), (b), (c), (d) ve (e) sırasıyla üçgen, kare, altıgen, daire ve tam dolu modellerin elastisite modülü BT numunelerinin 0,5 mm ekstrüze yüzeyinin kaldırılmış halinin SW'deki görüntüsüdür.



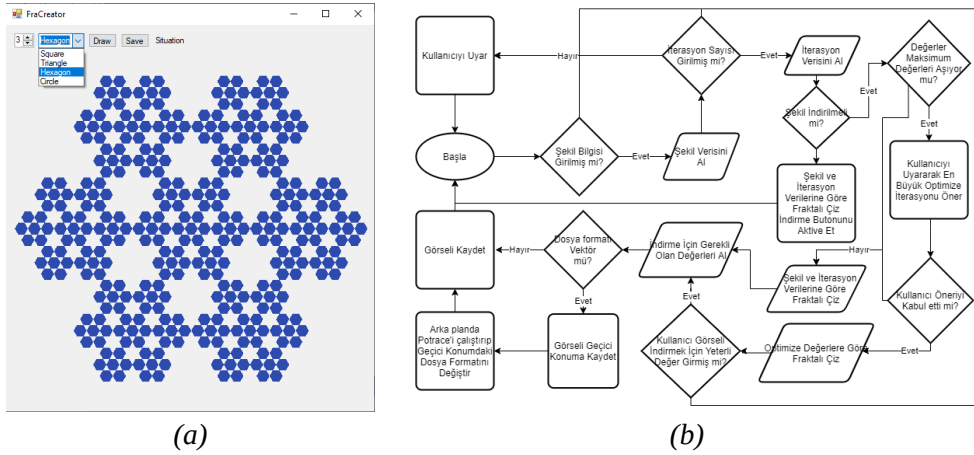
Şekil 8. (a), (b), (c), (d) ve (e) sırasıyla üçgen, kare, altıgen, daire ve tam dolu modellerin basma mukavemeti BT numunelerinin 0,5 mm ekstrüze yüzeyinin kaldırılmış halinin SW'deki görüntüsüdür.

3.2.Yazılım

Fraktal yapıların çizim sürecinde yapılan değerlendirmeler sonucunda fraktalların kullanımıyla oluşturulacak bir materyalde tasarım sürecini en fazla zorlaştıracak aşamalardan birisinin kompleks fraktal şekillerin manuel olarak iki boyutlu çizimi olduğu görülmüştür. Sanal CAD kütüphanelerinde aranan fraktalın istenilen iterasyonunu bulmak kolay değildir. Bu durumun önüne geçip fraktal üretim sürecini hızlandırmak için bir program yazılmıştır.

C# dilinde yazılan program bu proje dahilinde kullanılan tüm fraktalları (Sierpinski Üçgeni, Sierpinski Halısı, Hexaflake ve Appollonian Gasket) istenen iterasyon sayısı doğrultusunda üretebilmektedir. Yazılım çıktı olarak şeklin görüntüsünü DXF, PDF, SVG, PNG, BMP formatlarında kaydedebilir. Şekillerin DXF, PDF ve SVG vektörel resim formatlarında kaydedilmesi Bitmap (BMP) çıktısını vektörel resme çevirmeyi mümkün hale getiren Potrace programı aracılığıyla yapılmaktadır. Fraktalların Drawing Exchange Format (DXF) formatıyla kaydedilmesi şeklin herhangi bir CAD programında düzenlenebilecek bir çizim olmasını sağlar. Program herhangi bir hata durumunda kullanıcıyı uyarıp sistemi zorlamamak için 12 iterasyondan fazla iterasyon içeren şekillerin çizimini yapmamaktadır. Yazılan koda Ek-1'de yer verilmiştir.

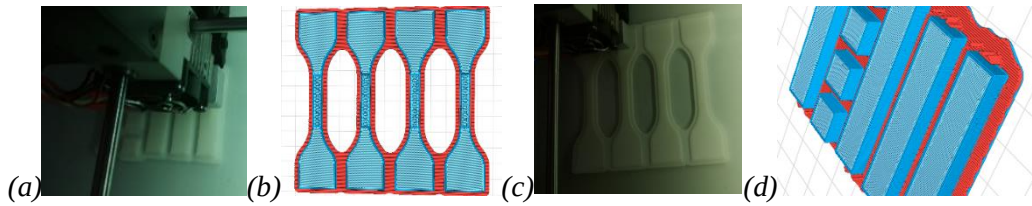
Yapılan literatür taraması sonucunda üretilen yazılım değerinde bir çalışma bulunamamıştır. Dolayısıyla fraktal tasarımlı materyaller üretilmesini kolaylaştırmak için oluşturulan programın fraktal şekillere vektörel veya bitmap resim olarak ihtiyaç duyulan her alanda kullanılabilir olması hedeflenmektedir.



Şekil 9. (a) programın ara yüzüne ait bir görüntüdür. (b) programın temel algoritmasıdır.

3.3. Test Numunelerinin Basımı

Laboratuvar testlerini gerçekleştirmek amacıyla numunelerin -simülasyon testleri ile uyumluluğu adına- 3B yazıcıda ABS filamentli ile basılmasına karar verilmiştir. Zaxe markalı 3B yazıcıların X1 ve Z1 modellerinde baskı işlemlerini gerçekleştirmek üzere şirketin basım öncesi düzenlemeler için oluşturduğu ara yüz programı olan Xdesktop uygulaması kullanılmıştır. Laboratuvar testlerinde kullanılmak üzere üç, yedek olarak bir tane; toplamda her numuneden dört adet basılmıştır. Numuneler SW uygulamasının 3B tasarımları için varsayılan kaydetme uzantısı olan .sldprt yerine modelleri Xdesktop uygulamasında da açılabilir hale getiren Standard Triangle Language (STL) uzantılı olarak kaydedilmiştir. Ardından Xdesktop uygulamasına aktarılan numunelerin baskı öncesi ayarlarından iç doluluk oranı %100, doldurma deseni ise grid olarak belirlenmiştir.



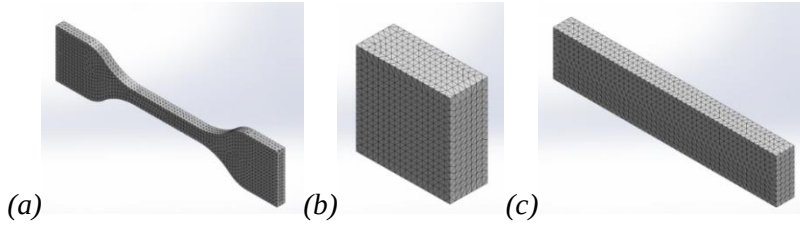
Şekil 10. (a) ve (c) sırasıyla BT ve ÇT'ine ait numunelerin basımlarından alınan fotoğraflardır. (b) ve (d) sırasıyla BT ve ÇT'ne ait numunelerin Xdesktop uygulamasından alınmış görüntüleridir.

3.4. Test prosedürleri

3.4.1. Simülasyon testleri

SW uygulamasında gerçekleştirilen simülasyon testleri sürecinde testler statik analiz başlığı altında yapılmıştır. Statik analiz; gerçek hayat senaryoları öncesi tasarlanan ürünlerin mukavemetlerinin görülebileceği bir analiz çeşididir. Statik analiz öncesi tasarımı yapılan fraktal geometri ile entegre edilmiş numuneleri teste tabi tutabilmek için öncelikli olarak materyal tanımlaması gerekmektedir. Materyalin 3B yazıcılarda yazılabilir bir özelliğe sahip olması adına ABS materyalinin kullanımına karar verilmiştir. Üçgen, kare, altıgen ve daire olarak belirlenen şekiller yapı malzemelerinde kullanılabilir ve 0.4 mm detay alt sınırına sahip

yazıcıda basılabilir hale getirilmiştir. BT ve ÇT için ayrı ayrı düzeneklerin hazırlandığı simülasyon testlerinde sabit geometri ve uygulanacak tüm kuvvetler 200N olarak tanımlanmıştır. Ardından numuneler mesh işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemde numuneler boyutu kullanıcı tarafından belirlenen tetrahedronlara bölünür ve her tetrahedronun parametrik değeri için kuvvetten kaynaklanan stres, yer değiştirme ve gerinim gibi değerler hesaplanır.



Şekil 11. (a), (b) ve (c) görselleri sırasıyla çekme, basma mukavemeti ve elastisite modülü basma testlerine ait numunelerin mesh uygulanmış SW uygulaması görüntüleridir.

Çözümleme sürecinde geçen bir miktar zaman sonucunda simülasyon testi ile;

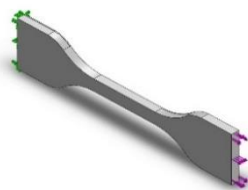
- Strese maruz kalan numunenin bir kenarının Von Mises geriliminin ve parametrik uzaklığını gösteren,
- Testte yer değişimine maruz kalan numunenin bir kenarının milimetre cinsinden (URES) yer değişiminin ve parametrik uzaklığını gösteren,
- Testte gerinime maruz kalan numunenin bir kenarının geriniminin (ESTRN) ve parametrik uzaklığını gösteren,

çizgi grafikleri, illüstre görüntüler ve bu grafiklere ait maksimum, minimum ve ortalama değerler elde edilmiştir. Simülasyon testi yapmanın bir avantajı da dışarıdan içi gözükmeyecek şekilde tasarlanan kalıpların test sonrası kesit görüntüsünün elde edilebilmesidir. Bunun için testin sabit ve hareketli geometrisine dik olarak test numunesinin 2 mm derinliğindeki kesit görüntüsü stres grafiğiyle beraber alınmıştır.

Projenin başlangıç aşamasında bu testler her ne kadar ÇT, BT, eğilme testi, darbe mukavemeti testi ve yorulma testi olarak belirlenmiş olsa da daha sonra bu testlerden çekme ve basma testlerinin deney sonuçlarına ulaşılabilmektedir. Eğilme testinin ve darbe mukavemeti testlerinin ise SW uygulaması üzerinde çizimleri yapılmış lakin simülasyon testlerinin çözümlemelerinin aldığı zamanın çok olmasından ötürü sadece bir tane simülasyon testi yapılmıştır. Değerlendirmeye dahil olmayan simülasyon testlerinin sonuçları Ek-2’de gösterilmiştir.

3.4.1.1.Simülasyon Çekme Testi

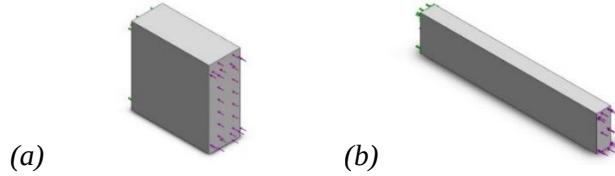
SW uygulamasında gerçekleştirilen simülasyon ÇT gerçek hayatta, laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler ile aynı sonuçları vermesi adına gerçekçi bir deney düzeneği kurularak gerçekleştirilmiştir. Her iki kalıp için de 25x4 alana sahip kenarlardan biri sabit geometri, bir diğeri ise ters yönde 200N kuvvet uygulanan bir yüzey olarak tanımlanmıştır. Her simülasyon testi için testler üçer kere çalıştırılıp çözümlendirilmiştir.



Şekil 12. ÇT simülasyon düzeneğinde yeşil renk ile gösterilmiş alanın sabit, mor renk ile gösterilmiş alanın hareketli olduğu SW uygulamasındaki görüntüsüdür.

3.4.1.2.Simülasyon Basma Testi

SW uygulamasında gerçekleştirilen simülasyon BT gerçek hayatta, laboratuvarda gerçekleştirilen deneyler ile aynı sonuçları vermesi adına gerçekçi bir deney düzeneği kurularak gerçekleştirilmiştir. Her iki kalıp için de 10x4 alana sahip kenarların birinin sabit geometri bir diğerinin ise üzerine 200N kuvvet uygulanan bir yüzey olduğu uygulama üzerinden tanımlanmıştır. Her simülasyon testi için deney üç kere çalıştırılıp tekrar çözümlendirilmiştir.



Şekil 13. (a) basma mukavemeti, (b) elastisite modülü basma testi simülasyon düzeneğinde yeşil renk ile gösterilmiş alanın sabit, mor renk ile gösterilmiş alanın hareketli olduğu SW uygulamasındaki görüntüsüdür.

3.4.2.Laboratuvar testleri

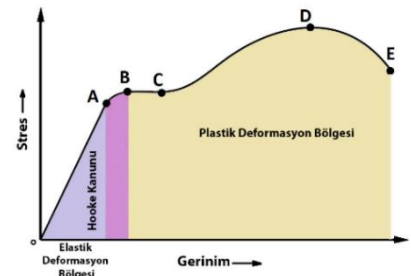
Testlerin fiziki ortamda gerçekleştirilebilmesi için öncelikle numune ölçüleri standartlara göre belirlenmiştir. Teknik çizimleri hazırlanan numune modellerinin baskıları 3B yazıcıda alınmıştır. Ek-3'te yer verilen teknik resimler İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Mekanik Test Laboratuvarı ile paylaşılmış ve devamında basılan numuneler fiziki mekanik testlere tabi tutulmuştur.

3.4.2.1.Laboratuvar Çekme Testi

Laboratuvarda ÇT'de kullanılmak üzere üç boyutlu yazıcıdan basılan altıgen, kare, tam dolu, daire ve üçgen şekillerini içeren kalıplar ile deney üç kere tekrar edilmiştir. Pandemi şartları sebebiyle atölyede üretilen numunelerin laboratuvara taşıma sürecinde yaşanan problemler sebebiyle üçgen modeller laboratuvarda gerçekleştirilen fiziksel ÇT'ye dahil olamamıştır. Üçgen şeklinin ÇT sonuçları sadece simülasyon testiyle elde edilmiştir.

3.5.Teori

Laboratuvarlarda gerçekleştirilen materyal testlerinin sonuçları genellikle stres-gerinim grafikleri ile ifade edilir. Şekil 14'te bir örneği verilen stres-gerinim grafiğinin incelenmesi durumunda bir yere kadar grafiğin doğrusal olduğu fakat sonradan eğri halini aldığı görülür. Doğrusal ilişkinin olduğu kısımda elastik, eğrili kısımda ise plastik deformasyon görülür. Elastik kısım ile plastik kısmın arasındaki üç noktadan ilki Şekil 14'teki A noktasına tekabül eden doğrusallığın kaybolduğu elastik limittir. Bu nokta elastikliğin bittiği noktadır. Buraya kadar uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu deformasyonlar geçiciyken bundan sonrakiler kalıcıdır. Bu noktadan hemen sonraki B noktası plastikliğin başladığı akma noktasıdır. Fakat bu noktadan sonra da hala bir miktar elastiklik görülür. Kuvvet çekilince numune bir miktar deformasyona uğrayıp eski haline dönmeye çalışır. Elastikliğin tamamen bittiği nokta ise Şekil 14'te C'ye karşılık gelen akma dayanım (σ_y) noktasıdır. Bu nokta doğrusal kısmın %0,2 sağa kaydırılmasıyla bulunabilir. D noktası, eğrinin yükselişini kesip düşüşe geçtiği azami mukavemet (σ_u) noktasıdır. Bu nokta kırılmaların başladığı noktadır. E ile gösterilen noktada numune kırılır veya bükülür ve test sona erer. Bu nokta hata noktası (failure point) olarak isimlendirilebilir.



Şekil 14. Örnek stres-gerinim grafiği.

Doğrusal kısmın eğimi hesaplanmaya çalışılırsa aynı malzeme için yaklaşık sonuçlar alındığı görülür. Bir materyal özelliği olan elastisite modülü, çizginin eğiminin alınmasıyla bulunur. Stres-gerinim grafiğinin eğimini ifade eden elastisite modülü (E):

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

Grafikten elde edilen elastisite modülünün kullanımıyla birlikte rijitlik (k) de bulunabilir:

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

Grafiğin altındaki alan incelenecek olursa farklı özellikler sergileyen materyaller için farklı alan verileri elde edildiği görülür. Grafiğin elastik kısmının alanı hesaplanmaya çalışılırsa esneklik modülü (u_r) elde edilir. ε_y , akma dayanımı noktasının gerinim değeri olmak üzere; doğrusal elastikliğin görüldüğü materyallerde esneklik modülü:

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

3.5.1.Simülasyon Testleri

Testler, SW programıyla simüle edilmiştir. Program, stres-gerinim grafiği gibi uluslararası standartlara uygun veri sağlamadığı için veri değerlendirme sürecinin manuel olarak devam ettirilmesi gerekmiştir. A değeri için numunelerin enine kesit alanı hesaplanmıştır. Numuneye uygulanan kuvvet sonucunda gerçekleşen yer değişikliği (L) bulunmuştur.

Tablo 1. Simülasyonlar sonucu L ve A değeri için alınan değerlerin yer aldığı tablodur.

Şekil	Çekme Testi		Elastisite Modülü Basma Testi		Basma Mukavemeti Basma Testi	
	A değeri (mm ²)	L değeri (mm)	A değeri (mm ²)	L değeri (mm)	A değeri (mm ²)	L değeri (mm)
Üçgen	24,800	11,003	40,000	4,112	40,000	0,627
Kare	24,800	13,817	40,000	6,841	40,000	0,432
Altıgen	24,800	17,990	40,000	5,930	40,000	0,706
Daire	24,800	14,353	40,000	5,983	40,000	0,452
Dolu	24,800	12,630	40,000	4,994	40,000	0,341

SW uygulamasından elde edilen toplam yer değiştirme, stres ve gerinim değerlerinin karşılaştırma öncesi on beş aşamalı veri tabloları oluşturulmuştur. Oluşturulan tablolardan elde edilen veriler sayesinde Microsoft Excel uygulamasında “stres/gerinim grafiği” elde edilmiştir.

3.5.2.Laboratuvar Testleri

İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Mekanik Test Laboratuvarı’nda yapılan testler sonucunda her test için:

- Maksimum stres (N/mm²) miktarı,
- Kopma yer değiştirmesi (mm),
- Kopma gerinimi (%),
- Elastisite modülü elde edilmiştir.

Elde edilen bu veriler kullanılarak öncelikle yapılan her üç testte aynı numune şekline sahip olanların ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama değerini diğer değerler ile karşılaştırmak adına on beş aşamalı bir tablo oluşturulmuştur. Oluşturulan tablodaki değerler Microsoft Excel uygulamasında; maksimum stres miktarı ve kopma gerinimi kullanılarak “stres/gerinim çizgi grafiği”, elastisite modülü kullanılarak “elastisite sütun grafiği” elde edilmiştir. Elde edilen stres-gerinim grafikleri 3.6’da açıklanan yöntem ve işlemlerin kullanımıyla istenilen verilere ulaşılmıştır. En sonunda tüm verilerin kullanımıyla birlikte fraktal yapılar kendi aralarında mukayeseye tabi tutulmuştur.

4.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		
Yazılımın Yazılması					X	X	X		
Simülasyon Testleri						X	X	X	
Laboratuvar Testleri							X	X	
Test Verilerinin Analizi								X	X
Proje Raporu Yazımı								X	X

5.Bulgular

Farklı fraktal geometrilerin kullanımıyla içi dolu materyallere alternatif üretebilmeyi hedefleyen projede elde edilen veriler temel olarak üç gruba ayrılmıştır. Bunlardan ilki simülasyon sonuçları ikincisi ise laboratuvar testleri sonuçlarıdır. Öte yandan her iki test için de ortak olan kütle verileri ayrı bir grup altında incelenmiştir.

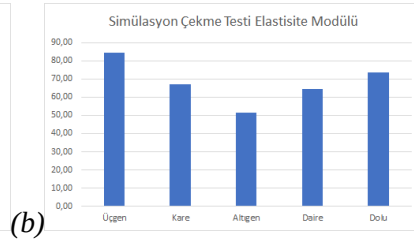
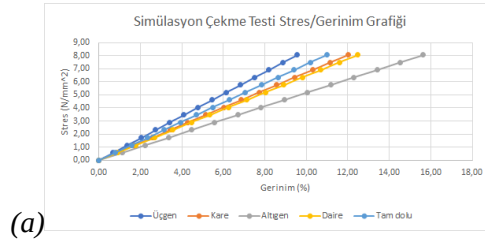
5.1.Simülasyon Testleri Sonucunda Elde Edilen Veriler

SW, simülasyonları yapabilmek için her düğüm için komşu üç tetrahedronun stres, yer değiştirme ve gerinim gibi değerlerinin ortalamasını alır. Daha sonra kullanıcıya en yüksek ve en düşük değerlerin olduğu düğümler bildirilip, düğümlere ait parametrik grafikler oluşturulabilir. Bu özellik her ne kadar diğer bazı programlar kadar standart sonuçlar veremese de elde edilen veriler yapı içinde homojen dağılımlar olup olmadığını hesaplamak ve kırılma noktasını öngörmek için oldukça idealdir. Bu projede kırılma noktası özelliği kullanılarak Tablo 1’deki veriler elde edilmiş, stres ve gerinimin homojen dağılıp dağılmadığının gözlemlenebilmesini mümkün kılan grafikler oluşturulmuştur.

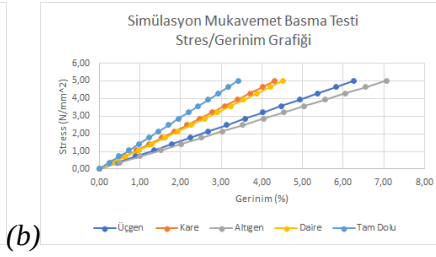
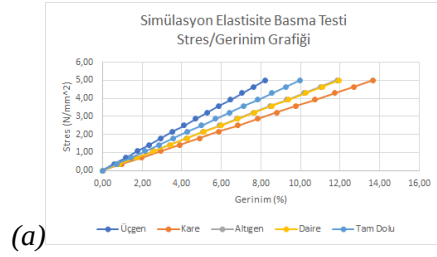
Tablo 1’deki A değerlerinin Denklem 1’e yerleştirilmesi sonucu materyal üzerindeki stres değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde L değerlerinin Denklem 2’ye yerleştirilmesi sonucunda da gerinim değerleri elde edilmiştir. Denklem 1 için F değerinin 200 N olduğu bilinmektedir. Denklem 2’deki L_0 değeri ise ISO standartlarından alınan ölçüler sonucunda çekme testi için 115 mm, elastisite modülü BT için 50 mm ve basma mukavemeti BT için 10 mm olarak kabul edilmiştir. Tüm değerlerin denklemlerdeki yerlerine yerleştirilmesi sonucunda elde edilen stres ve gerinim değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. SW’de uygulanan 200 N’luk kuvvet sonucunda elde edilen stres ve gerinim değerleridir

Şekil	Çekme Testi		Elastisite Modülü Basma Testi		Basma Mukavemeti Basma Testi	
	Stres (N/mm ²)	Gerinim (%)	Stres (N/mm ²)	Gerinim (%)	Stres (N/mm ²)	Gerinim (%)
Üçgen	8064516,129	9,568	5000000	3,576	5000000	0,545
Kare	8064516,129	12,014	5000000	5,949	5000000	0,376
Altıgen	8064516,129	15,643	5000000	5,157	5000000	0,614
Daire	8064516,129	12,481	5000000	5,203	5000000	0,394
Dolu	8064516,129	10,983	5000000	4,343	5000000	0,297

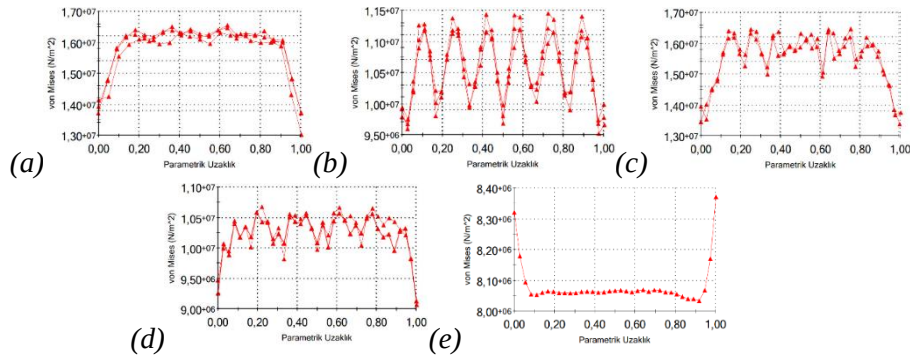


Grafik 1. Simülasyon çekme testleri sonucunda elde edilen değerlerle oluşturulan stres-gerinim grafiği (a) ve elastisite modülü grafiği (b).

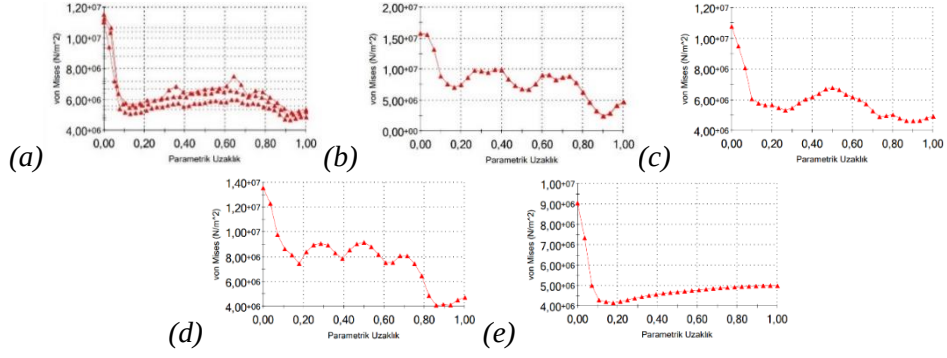


Grafik 2. Simülasyon basma testleri sonucunda elde edilen değerlerle oluşturulan stres-gerinim grafikleri. (a) Elastisite modülünü ölçerken (b) basma mukavemetini ölçer.

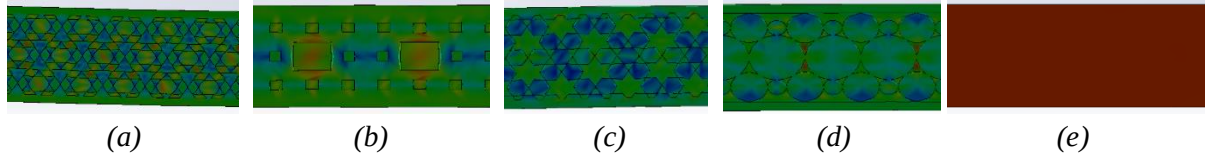
SW simülasyonları sonucunda elde edilen diğer önemli verilerden biri çizgi grafikleridir. Bu grafikler her model için oluşturulup homojen dağılım oranlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.



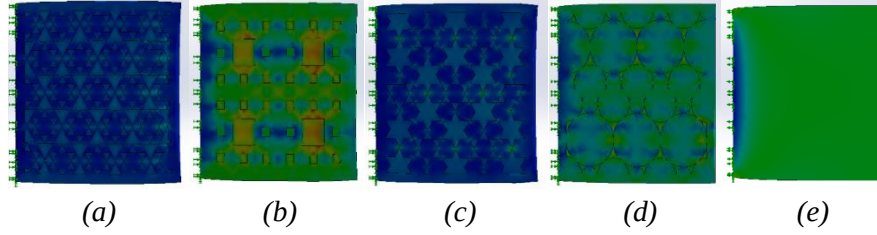
Grafik 3. (a) üçgen, (b) kare, (c) altıgen, (d) daire ve (e) tam dolu numunelere ait sabit bir çizgi üzerindeki çekme testi stres dağılımını gösteren çizgi grafikleridir.



Grafik 4. (a) üçgen, (b) kare, (c) altıgen, (d) daire ve (e) tam dolu numunelere ait sabit bir çizgi üzerindeki basma mukavemeti testi stres dağılımını gösteren çizgi grafikleridir. Basma mukavemeti ve elastisite modülü basma testlerinin grafik sonuçlarındaki benzerlikten ötürü sadece basma mukavemeti basma testi çizgi grafiklerine yer verilmiştir.



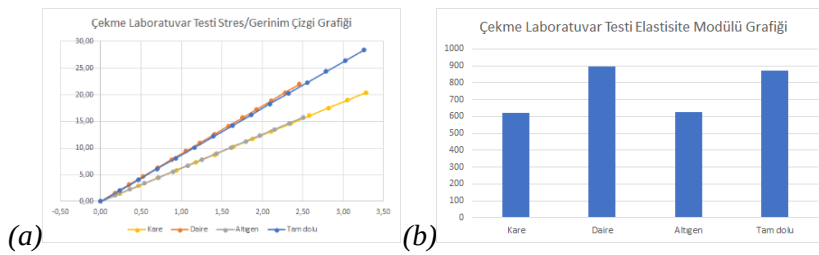
Şekil 15. Çekme testi simülasyonları için elde edilen illüstrasyonlar. (a) üçgen, (b) kare, (c) altıgen, (d) daire, (e) tam dolu numunelere aittir. Çekme testlerinin illüstre görüntüleri detaylı bir şekilde Ek-4'te gösterilmiştir.



Şekil 16. Basma mukavemeti testi simülasyonları için elde edilen illüstrasyonlar. (a) üçgen, (b) kare, (c) altıgen, (d) daire, (e) tam dolu numunelere aittir. Basma testlerinin illüstre görüntüleri detaylı bir şekilde Ek-4'te gösterilmiştir.

5.2.Laboratuvar Testleri Sonucunda Elde Edilen Veriler

İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Mekanik Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen mekanik test sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Sonrasında Microsoft Excel uygulamasında stres-gerinim ve elastisite modülü grafikleri oluşturulmuştur.



Grafik 5. Laboratuvarda gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen değerlerle oluşturulan stres-gerinim grafiği (a) ve elastisite modülü grafiği (b).

5.3.Kütle Verileri

Hem simülasyon hem de laboratuvar testleri için aynı olan kütle değerleri projenin daha az materyal kullanımı hedefinin önemi doğrultusunda ayrıca incelenmiştir. Her numune için detaylı ölçümlerin sonuçlarına ve bu sonuçlardan kaynaklanan kütle kazancına Tablo 3'te yer verilmiştir. Çekme testi numunelerinde fraktallar sadece test edilen numunenin kulak kısımlarını bağlayan alana yerleştirilmiştir kütle ölçümü esnasında sadece bu kısmın ölçümü yapılmıştır.

Tablo 3. Her teste ait numuneler için elde edilen kütle ve kütleden kazanç miktarları.

Şekil	Çekme Testi			Elastisite Modülü Basma Testi			Basma Mukavemeti Basma Testi		
	Kütle (g)	Kütleden (%)	Kazanç	Kütle (g)	Kütleden (%)	Kazanç	Kütle (g)	Kütleden (%)	Kazanç
Üçgen	0,661	30,88		1,284	37,05		0,299	26,61	
Kare	0,842	11,98		1,754	14,03		0,356	12,75	
Altıgen	0,725	24,21		1,493	26,82		0,305	25,22	
Daire	0,871	8,99		1,937	5,04		0,391	4,16	
Dolu	0,957	-		2,040	-		0,408	-	

6.Sonuç ve Tartışma

Fraktal şekillerden alınan ilhamla yeni bir üretim metodolojisi oluşturmayı hedefleyen bu projede yapılan testlerin sonuçları grafik ve tablolarla ifade edilmiştir. Laboratuvar ve simülasyon test sonuçlarına dair tablolara Ek-5'te yer verilmiştir.

6.1.Simülasyon Sonuçları

Simülasyon testleri için oluşturulan Grafik 1 (a)'da tüm değerlerin aynı maksimum stres değerini verdiği görülür. Bu durum tüm numunelere aynı miktarda kuvvet uygulanıp numunelerin teorik olarak aynı ölçülere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat stres değerlerine karşın gerinim değerleri farklılık gösterebilmektedir. Numunelerin içine yerleştirilen fraktalların elastisite modülünü etkilediği, elastisite modülüne bağlı olarak gerinim değerlerinin etkilendiği görülmüştür. Öte yandan uygulanan kuvvet plastik deformasyona sebep olabilecek kadar büyük olmadığı için akma dayanımı, elastisite limiti ve azami mukavemet gibi değerlere ulaşamamıştır.

Grafik 1 (b)'deki modellerin elastisite modülleri karşılaştırılırsa büyükten küçüğe üçgen, tam dolu, kare, daire ve altıgen sıralamasının olduğu görülmektedir. Bu sıralamanın kullanımıyla birlikte materyalin mekanik yapısına dair birçok fikir elde edilebilir. Denklem 4'ün kullanımıyla hesaplanabilecek rijitlik değeri için en yüksek elastisite modülüne sahip olan üçgenin en rijit olurken altıgenin ise en bükülebilir olduğu anlaşılır. Bu sonuçlar, üçgenin en kırılğan yapıya sahip olurken altıgenin daha sünek bir yapısının olduğunu göstermektedir.

Modellerde akma dayanımı noktası aşamadığı için esneklik modülü hakkında yorum yapılması mümkün değildir. Fakat grafikteki son nokta akma dayanımı noktası olarak kabul edilirse elastisite modülü ile esneklik arasındaki ters orantı sebebiyle en yüksek elastisite modülüne sahip olan modelin en düşük esnekliğe sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla en esnek şekil altıgen olurken en az esneklik üçgende gözlemlenmektedir.

Diğer önemli bir karşılaştırma metodu, yerel stres değerlerinin Grafik 3'ün kullanımıyla karşılaştırılması sonucunda elde edilecek stresin homojen dağılım özelliğidir. Tam dolu modele ait Grafik 3 (e) incelenecek olursa stresin en uç noktalarda yoğunlaştığı görülür. Fakat üçgen modele ait Grafik 3 (a)'da ise en düşük stresin en uç noktalarda görülürken orta kısımlarda da görülen stres değerlerinin çok farklı olmaması homojen bir dağılımın olduğunu göstermektedir. Öte yandan grafiklerin sürekli aynı formları takip ettiği tespit edilmiştir. Bu durum kırılmanın gerçekleşeceği yer ile ilgili çeşitli tahminlerde bulunulmasını kolaylaştırır. Grafik 3'ün Şekil 15 ile incelenmesi durumunda bahsedilen kırılma noktaları görsel olarak da gözlemlenmektedir.

Simülasyon basma testleri sonuçları Grafik 2'de verilmiştir. Bu grafiklerin eğimlerinden elde edilen elastisite modülü değerleri karşılaştırılırsa elastisite modülü en büyük olan modelin elastisite testi için üçgen olurken basma testi için tam dolu olduğu görülür. Elastisite testinde en düşük elastisite modülüne sahip olan numune kare iken basma testinde bu model altıgendir. Grafik 4'te verilen dağılım grafiklerinin Şekil 16 ile incelenmesi durumunda fraktal modellerin stresi dağıtmada tam dolu modelden çok daha başarılı olduğu görülmektedir.

6.2.Laboratuvar Sonuçları

Laboratuvarda gerçekleştirilen ÇT, simülasyon testlerinin aksine numuneler kırılıncaya kadar gerçekleşmiştir. Dolayısıyla Grafik 5 (a)'da görüleceği üzere sonuç olarak elde edilen stres ve gerinim değerleri birbirinden çok farklıdır. Fakat tıpkı simülasyon sonuçları gibi bu testler sırasında da plastik deformasyon görülmemiş, grafikteki akma dayanımı noktalarından sonra ani kırılmalar gerçekleşmiştir. Plastik deformasyonun görülmemiş olması akma dayanımının belirlenmesini zorlaştırır fakat kırılmaların gerçekleştiği azami mukavemet noktasının bilinmesi uygulanabilecek maksimum kuvvet değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Grafik 5 (b)'de verilen elastisite modülleri karşılaştırılacak olursa büyükten küçüğe sıralaması şu şekildedir: daire, tam dolu, kare ve altıgen. Elastisite modülünden materyalin rijitliğini bulmak için Denklem 4 kullanılmıştır. Rijitlik için alınan değerlerin karşılaştırılması sonucunda ise; en rijit modelin tam dolu model olurken en bükülebilir modelin ise altıgen olduğu görülür. Tam dolu modelin bu durumda çok daha kırılğan olduğu gözlemlenirken altıgenin sünek olduğu görülür. Tam dolu modelden sonra çok yakın bir rijitlik değerine sahip olan kare modelin geldiği görülmektedir.

Modellerin karşılaştırılacak diğer önemli bir özelliği esnekliktir. Denklem 5'in kullanılmasıyla esneklik modülü elde edilmiştir. Normalde akma dayanımı değeriyle hesaplanan modül, akma dayanımı yerine azami mukavemet değeriyle hesaplanmıştır. Esneklik değerlerinin karşılaştırılması durumunda en esnek modelin tam dolu olurken en az esnekliğin altıgene ait

olduğu görülür. Tam dolu modeli yine çok yakın bir değere sahip olan kare fraktal modeli takip etmektedir.

Son olarak incelenecek olan azami mukavemet değerleri ise materyallerin en önemli özelliklerindendir. Tablo 4'te verilen azami mukavemet değerleri Denklem 1'deki stres formülüne yerleştirilirse materyale uygulanabilecek en büyük kuvvet değerlerine ulaşılır. Bu yöntemle elde edilen kuvvet değerlerine Tablo 4'te yer verilmiştir. Değerlerin incelenmesi durumunda kuvvete maruz kalan modeller arasında kırılmadan en fazla kuvveti taşıyabilen model tam dolu olurken en güçsüz modelin ise altıgen olduğu gözlemlenir. Tam dolu modelden az bir farkla daha küçük kuvvet taşıyabilen kare fraktal ise ikinci sırada gelmektedir.

Tablo 4. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen azami mukavemet değerleriyle numunelerin enine kesit alanlarının ve bu verilerden elde edilen en fazla kuvvet değerlerinin tablosu.

	Azami Mukavemet (N/mm ²)	Enine Kesit Alanı (mm ²)	En Fazla Kuvvet (N)
Kare	20,428	31,653	646,595
Altıgen	15,746	26,825	422,391
Daire	21,956	20,113	441,592
Dolu	28,404	27,389	777,947

6.3.Kütle Karşılaştırma Sonuçları

Oluşturulan modellerin karşılaştırılması için kullanılan son yöntem de kütlelerin karşılaştırılmasıdır. Tablo 3'te görüleceği üzere fraktal şekillerin materyal yapısında kullanılmasıyla birlikte yaklaşık %30'a varan ham maddeden kazanç sağlanabilmektedir. Bu durum fraktalların kullanımını oldukça kârlı bir yöntem haline getirmektedir. Eğer kütleden kazanç değerleri karşılaştırılacak olursa sırasıyla en fazla kazancın üçgen, altıgen, kare ve son olarak daire modellerinde gerçekleştiği görülmektedir.

6.4.Proje Sonucunda Modeller İçin Elde Edilen Sonuçlar

Laboratuvar ve simülasyon testlerinin karşılaştırması aşamasında sonuçlar arasında bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bu korelasyonun kullanımı ile birlikte simülasyon verilerinin gerçek hayattaki karşılığı hesaplanabilir. Sadece simülasyon değerlerine ulaşılabilen üçgen çekme test numunesinin rijitlik değerinin bu korelasyon sayesinde tam dolu modele nispeten daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Esneklik modülü değerlerinde ise özellikle tam dolu numunelerin test değerlerinin çok yakın olduğu görülür. Bu durum simülasyon ve laboratuvar testlerinin stres-gerinim grafiklerindeki farklara rağmen materyal özelliklerinin büyük oranda uyuştuğunu gösterir.

Üçgen: Sierpinski üçgeninden alınan ilhamla tasarlanıp üretilen -tam dolu parçaya nispeten %31 daha hafif- üçgen modeli, gerçekleştirilen çekme testi sonucunda deney numuneleri arasında stres dağılımındaki homojenliğin en çok gözlemlendiği modeldir. Üçgen model, rijit

olmasıyla ön plana çıkarken en kırılgan ve en az esnek olması sebebiyle diğer numunelerin arkasında kalmaktadır. Alınan bu sonuçlarla birlikte üçgen yapının; taşınacak yüke tepki olarak homojen dağılımının ve rijitliğinin maksimum, yer değişiminin minimum olmasının arandığı yapı ve sistem parçalarında kullanılması öngörülmüştür.

Kare: Sierpinski halısından alınan ilhamla tasarlanıp üretilen -tam dolu parçaya nispeten %12 daha hafif- kare modeli, gerçekleştirilen çekme testi sonucunda tam dolu model hariç diğer numuneler arasında en çok esneklik, rijitlik ve taşıyabileceği kütle miktarıyla ön plana çıkarken stresin dağılımındaki heterojenlik ile diğer numunelerin arkasında kalmaktadır. Alınan bu sonuçlarla birlikte kare yapının; yer değiştirmenin, dayanıklılığın ve taşınacak yükün maksimum olup stresin parça üzerinde eşit dağılımının aranmadığı yapı ve sistem parçalarında kullanılması öngörülmüştür.

Altıgen: Hexaflake fraktalından alınan ilhamla tasarlanıp üretilen -tam dolu parçaya nispeten %24 daha hafif- altıgen modeli, gerçekleştirilen çekme testi sonucunda diğer deney numuneleri arasında en çok süneklığe sahip olmasıyla ön plana çıkarken esneklik ve taşıyabileceği maksimum ağırlık konusunda diğer numunelerin arkasında kalmaktadır. Alınan bu sonuçlarla birlikte altıgen yapının; yer değişiminin maksimum, taşınacak yükün minimum, stres dağılımının ortalama bir seviyede olmasının arandığı yapı ve sistem parçalarında kullanılması öngörülmüştür.

Daire: Apollonian gasketten alınan ilhamla tasarlanıp üretilen -tam dolu parçaya nispeten %9 daha hafif- daire modeli, gerçekleştirilen çekme testi sonucunda altıgen ve kare modelin; rijitlik, elastisite ve taşıyabileceği maksimum ağırlık sonuç değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Alınan bu sonuçlarla birlikte daire yapının; yer değişiminin, taşınacak yükün ve stres dağılımının ortalama bir seviyede olmasının arandığı yapı ve sistem parçalarında kullanılması öngörülmüştür.

Testlerden elde edilen verilerin karşılaştırılması ile modelleme metodolojisinin optimum kullanım alanları değerlendirilmiştir. Her şekil için mekanik özellikler farklılık gösterdiğinden kullanım alanları farklıdır. Bu farklılık, modelleme metodolojisinin birçok sektör ve sistem için uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu sayede projede geliştirilen metodolojiyle tasarlanan modele uygun parçaların tam dolu parçalarla değiştirilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Böylece, doğadan alınan ilham ile doğal kaynakların korunması sağlanacaktır.

7.Öneriler

Doğrusal (lineer) iki boyutlu fraktalların materyal yapısına olan etkisinin incelendiği bu proje ile beraber -homojen korunumuna dikkat edilmesi ile birlikte- doğrusal olmayan (non-lineer) fraktalların da geometriye aktarımı ile gerçekleştirilecek deneylerin önü açılmıştır. Projede deneylerde test numune sayısı üç ile sınırlandırılmış iken numune sayısının arttırılması ile daha doğru bir sonuca ulaşılabilir. Mekanik test sayısının arttırılması yapının genel mukavemeti hakkında daha fazla bilgi sahibi olunmasını sağlayacaktır. Kullanılan üç boyutlu yazıcının en küçük detay alt sınırının 0.4 mm olmasından ötürü fraktalın iterasyon sayısı kısıtlanmak zorunda kalmıştır ama profesyonel çalışmalar için kullanılan üç boyutlu yazıcılar ile fraktalın

daha fazla iterasyonunun sonuçları alınabilir. Alınan bu sonuçlar ile iterasyon sayıları ve çıkan sonuçlar kendi aralarında karşılaştırmaya tabi tutulabilirler. ABS materyali ile testlere tabi tutulan test numuneleri yerine metal bir materyalin kullanılması yeni çalışmalara kapı aralayan bir başka öneridir. Projede kullanılan SW uygulamasına alternatif olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansys ve Abaqus gibi üç boyutlu analiz uygulamaları kullanılabilir. Materyal üzerindeki stres dağılımı incelenip spesifik noktalara uygulanacak çeşitli işlemler geliştirilebilir veya kırılma noktalarının tespit edilmesi üzerinde çalışmalar yapılabilir. Projenin yazılım kısmında geliştirilen yazılım her ne kadar şu an için sınırlı sayıda fraktal modeli çiziyor olsa da bir sanal kütüphane ile kullanıcılar tarafından istenilen şekle ait fraktalın eklenebileceği bir hale getirilebilir.

Kaynaklar

- 1- Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2020). A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*.
- 2- Kakani, S. L. (2006). *Material science*. New Age International.
- 3- Sigmund, O., Maute, K. Topology optimization approaches. *Struct Multidisc Optim* 48, 1031–1055 (2013).
- 4- Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011, August). Topology optimization for additive manufacturing. In Proceedings of the solid freeform fabrication symposium, Austin, TX (Vol. 1, pp. 348-362).
- 5- Lan, T. T. (1999). Space frame structures. *Structural engineering handbook*, 13(4).
- 6- Zhang, Q., Yang, X., Li, P., Huang, G., Feng, S., Shen, C., ... & Lu, T. J. (2015). Bioinspired engineering of honeycomb structure—Using nature to inspire human innovation. *Progress in Materials Science*, 74, 332-400.
- 7- Falconer, K. (2004). *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. John Wiley & Sons.
- 8- Mandelbrot, B. (1977). *Fractal Geometry of Nature*.
- 9- Lakes, R. (1993). Materials with structural hierarchy. *Nature*, 361(6412), 511-515.
- 10- Rayneau-Kirkhope, D., Mao, Y., & Farr, R. (2012). Ultralight fractal structures from hollow tubes. *Physical review letters*, 109(20), 204301.
- 11- Commissariat, T. (2018). Ultralight fractal structures could bear heavy loads. Erişim Tarihi: 16.02.2021, <https://physicsworld.com/a/ultralight-fractal-structures-could-bear-heavy-loads/>
- 12- Ajdari, A., Jahromi, B. H., Papadopoulos, J., Nayeb-Hashemi, H., & Vaziri, A. (2012). Hierarchical honeycombs with tailorable properties. *International Journal of Solids and Structures*, 49(11-12), 1413-1419.
- 13- Taşdemir, M. (2018). *Plastik Malzemelerin Test Teknikleri*. Seçkin Yayıncılık.