Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi
Sayı: 221, Haziran 2022
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Eklemeli İmalat Yöntemiyle Tekne İnşaatında Dolgu Yoğunluğu ve Örüntüsünün Mukavemet Üzerindeki Bileşik Etkisi

Ayberk Sözen[1], Gökdeniz Neşer[2]

[1,2] Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi,
İnciraltı, Balçova, İzmir, Türkiye

[1] (Sorumlu yazar), ayberk.sozen@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9657-5567
[2] gokdeniz.neser@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9218-0181

ÖZET

Prototip ve ürün üretim hızı, tasarımcılara sağladığı form geliştirme özgürlüğü, görece düşük kapasitedeki üretim ihtiyaçları için rekabetçi maliyeti, iyi kaliteye hızlı ulaşım olanaklarıyla, bilgisayar destekli tasarım ve üç boyutlu yazıcı teknolojisi temelindeki eklemeli imalat yöntemi, denizcilik endüstrisini de kapsayacak şekilde yaygın bir ilgi görmektedir. Bu ilginin temel kanıtı, eklemeli imalat yöntemine ilişkin araştırma, geliştirme etkinlikleri ve bilimsel yayın sayılarındaki ciddi artıştır. Esnek tasarımların sıklıkla güncellenmesiyle rekabetçiliği sürdürülebilir kılınabilecek küçük tekne endüstrisinin anılan avantajları nedeniyle eklemeli imalat yöntemine yönelmesi kaçınılmazdır. Eklemeli imalat yöntemi, teknelerin tasarım ve üretim sürecini verimli kılmakla birlikte, bu yöntemden iyi sonuç alabilmek onun bileşenleri üzerinde uygulamayla elde edilmiş deneyimlere dayanan verileri gereksinir. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yönteminin önemli bileşenlerinden dolgu yoğunluğu ve örüntüsünün nihai ürünün temel mekanik özelliklerinden çekme mukavemeti üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Üç boyutlu yazım teknolojileri temelinde yaygın olarak kullanılan polimerlerden polilaktik asitin (PLA) 13 farklı basım örüntüsü ve %10, 25, 50, 75 ve 100 olmak üzere beş farklı dolgu yoğunluğundan oluşan deney matrisi uyarınca çekme deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Kompozit Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Sonuçlar, mekanik niteliklerin üzerinde durulan parametrelere çok duyarlı olduğu, *"kübik"* örüntünün incelenen yoğunluklarda genel olarak en iyi mekanik niteliklere ulaşmakta etkin olduğunu göstermiştir. Bu örüntü ve %25 yoğunluktan yararlanılarak 1/5 ölçeğinde bir yelkenli tekne gövdesi PLA polimer kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojileri Eklemeli imalat Laboratuvarı'nda üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekne üretiminde eklemeli imalat yöntemi, polilaktik asit (PLA), yazım örüntüsü, dolgu yoğunluğu.

Makale geçmişi: Geliş 17/05/2022 – Kabul 21/06/2022

https://doi.org/10.54926/gdt. 1117813

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 221, June 2022
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

The Effects of Infill Density and Pattern on the Strength of Marine Small Craft Building by Additive Manufacturing Method

Ayberk Sözen[1], Gökdeniz Neşer[2]

[1,2] Dokuz Eylül University Institute of Marine Sciences and Technology,
İnciralti, Balçova, İzmir, Türkiye

[1] (Corresponding author), ayberk.sozen@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9657-5567
[2] gokdeniz.neser@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9218-0181

ABSTRACT

The additive manufacturing method based on computer-aided design and three-dimensional printing technology, its speed, design freedom provided for the designers, the cost-effectiveness and competitive for relatively low-capacity production needs, the possibilities of achieving good quality; has gained a popularity with the industries, including the maritime sector. The main proof of this interest is the significant increase in the number of research and development activities and scientific publications on this topic. Due to above mentioned advantages, it is inevitable for the small-marine craft industry, whose competitiveness can be made sustainable by frequently updating flexible designs, to adopt their technology to the additive manufacturing method. While it makes the design and manufacturing process of boats efficient, for getting more effective results; it requires past driven data approach on practical experience. In this study, the effect of infill density and pattern, which are important parameters of the additive manufacturing method, on the tensile strength of the final product's basic mechanical properties was investigated experimentally. Tensile tests with 13 different printing patterns and 5 different infill densities of polylactic acid (PLA), one of the polymers widely used based on three-dimensional printing technologies, and a test matrix consisting of five different filling densities as 10%, 25%, 50%, 75% and 100%, were performed in Dokuz Eylul University's (DEU) Composite Laboratory. The results showed that the mechanical properties were very sensitive to these parameters, and the cubic pattern was generally effective in achieving the best mechanical properties at the investigated densities. Using this pattern and 25% density, sailboat hull with a scale of 1/5 was produced in DEU Institute of Marine Sciences and Technologies Additive Manufacturing Laboratory, using PLA polymer by additive manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing method in marine small craft building, polylactic acid (PLA), printing infill pattern, printing infill density.

Article history: Received 17/05/2022 – Accepted 21/06/2022

1. Giriş

Modelden kalıba, oradan da üretime giden süreci oldukça kısaltan, tasarımcılara form geliştirmekle özgürlük alanı açan, özellikle düşük kapasitelerdeki üretim için rekabetçi, maliyet-etkin çözümlere ulaşmada yardımcı olan, istenilen ürün kalitesine ulaşmada güçlük yaşanmayan eklemeli imalat yöntemi uygulamaları hemen her endüstri dalı gibi denizcilik endüstrisinin de gerek üretim gerekse araştırma ve geliştirme etkinlikleri bağlamında ilgi odağındadır (Garmulewicz vd., 2018; Khoo vd., 2015).

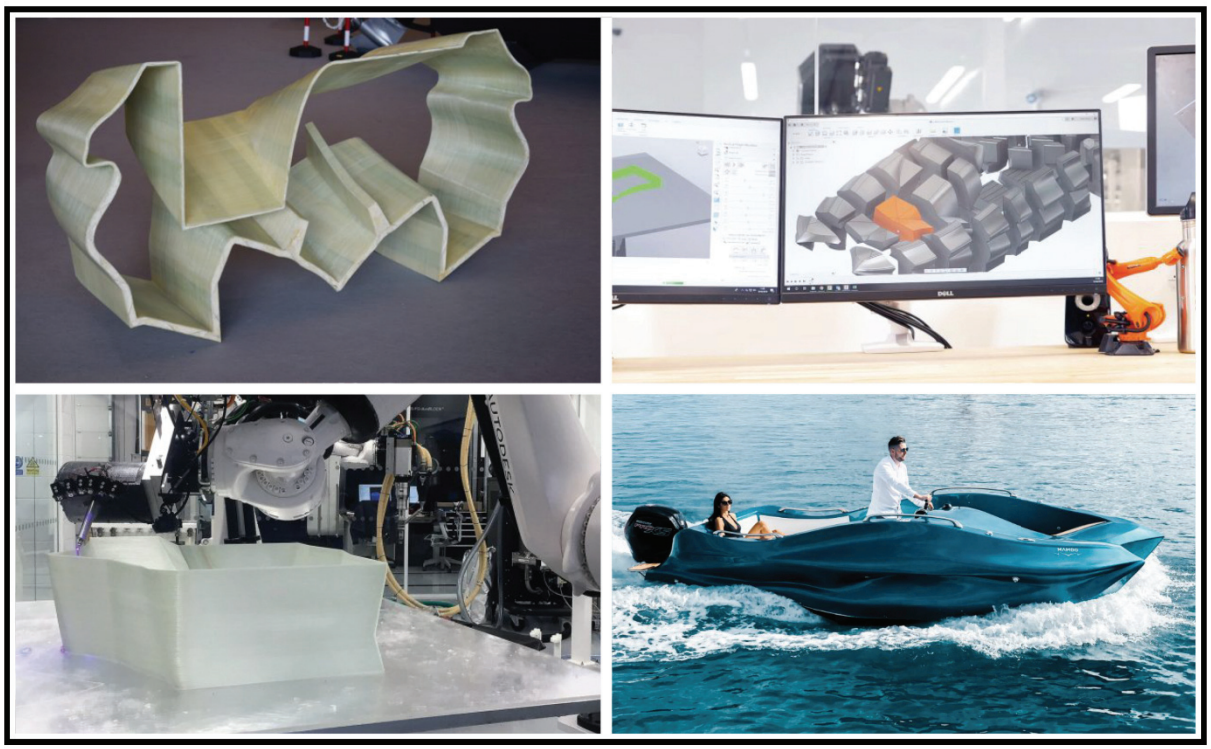
1980'lerde ilk örnek uygulamalara rastlanmaktaysa da özellikle son on yıldır, yazıcıların, dolayısıyla yazılabilen ürünlerin boyutlarının büyümesi ve teknoloji üreticilerinin artışıyla yaşanan rekabet nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin düşmeye başlamasıyla bu imalat yöntemiyle tekne üretimi ilgi çekici, hatta alışılagelmiş yöntemlerle karşılaştırıldığında rekabetçi bir konuma gelmiştir (Wohlers ve Gornet, 2016; Strickland ve Strickland, 2016). Yalnız tekne gövdesi üretimi değil, pervane gibi özel malzeme içeriğine sahip, yaygın olarak yararlanılan termo plastiklerden ve onların kompozitlerinden çok daha karmaşık bir teknoloji ve süreci gerektiren tekne bileşenleri için de çözümler sunan bu imalat yöntemi akıllı, işlevsel, hafızalı malzemeler gibi dördüncü boyut olarak zamanın da içerildiği üretimler için olanaklar sunmaktadır (Taş vd., 2019; Kumar vd., 2021; Momeni vd., 2017; Sharma ve Srinivas, 2020; Wang vd., 2020).

Tekne üretimi uygulamalarına ilk örnek olarak, Maine Üniversitesi İleri Kompozit Malzemeler Merkezi'nde 72 saat gibi rekor bir sürede ve bir bütün olarak üretilen, polimer kompozit temelli 7,64 metre tam-boyundaki tekneyi anmak gerekecektir (Şekil 1). Bu tekne, eklemeli imalat yönteminde zorlukla ulaşılan "uygun yüzey pürüzlülüğü" anlamında da başarılı bir uygulama olarak görülmelidir.



Şekil 1. Maine Üniversitesi İleri Kompozit Malzemeler Merkezi'nde üç boyutlu yazıcı ile üretilen tekne, (İleri Kompozit Malzemeler Merkezi, 2019)

Teknenin kendini, modelini veya kalıbını üretmek için uyumlu altyapının belirleyici unsuru olan yazıcının bir bütün olarak üretime uygunluğu beklense de bir üretimin maliyetlerini oldukça yükseltecek böyle bir yatırım yerine, teknenin bölümler halinde üretilmesi seçeneği de söz konusudur. Modüler yaklaşım, üretim sırasında meydana gelebilecek hataların azaltılması / sınırlandırılması olanağı da daha esnek ve güvenilir bir üretime de yardımcı olacaktır. Çok parçalı üretimde, modüllerin birleştirilmesi tasarımcının çözmesi gereken bir problem olarak ortaya çıkacaktır. Bu problem mekanik, termal ve/veya kimyasal birleştirme yöntemleriyle çözülebileceği gibi, çözüme farklı kaplama malzemelerinin özgün uygulamalarıyla daha yaratıcı yaklaşımlar geliştirilerek de yaklaşılabilir. Modüler üretime örnek olarak ise MOI Composite firmasının alışılagelmiş yöntemlerle üretilemeyecek oldukça radikal bir formdaki günlük gezi teknesi verilebilir (Şekil 2). Bu tasarımın üretimi eklemeli imalat yöntemiyle mümkün olmuştur ve modüler bir şekilde üretilen parçalar elyaf ve reçine ile kaplanarak birleştirilebilmiştir. Süreçte, iskeleti üretmek ve kurmak kolay olsa da yüzeyin iyileştirilmesi için oldukça uzun süreli ve maliyetli bir yüzey işlemi gerekmiştir.



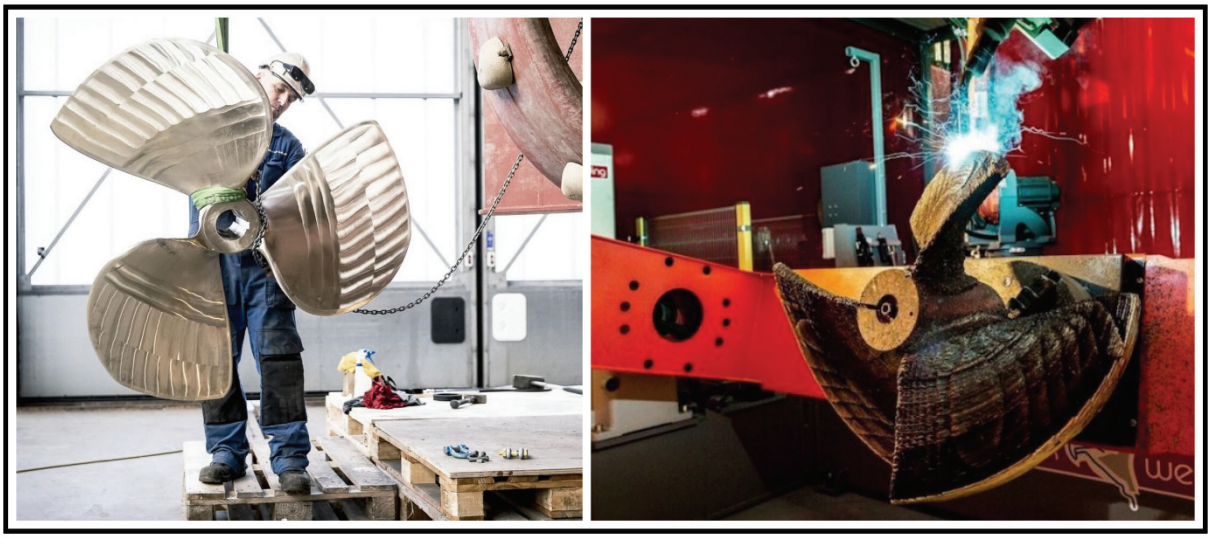
Şekil 2. Modüler olarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bir günlük gezi teknesi, (MOI Composite, 2020)

Eklemeli imalat yöntemi büyük endüstriyel uygulamaların yanı sıra,

- Kolay ulaşılabilirlik niteliğiyle, genellikle hobi amaçlı amatör çalışmalarda, polimer bazlı malzemeler kullanmak suretiyle gittikçe yaygınlaşmaktadır. Örneğin bu yöntemin denizcilik kültürünün vazgeçilmez bir parçası olan ve el becerisi gerektiren gemi maketçiliğine, parça ve bir bütün olarak ürününün üretimini kolaylaştırıcı katkıları bu geleneğin gençler tarafından sevilmesi ve yaygınlaşması anlamında önemsenmelidir. Amatörce uygulamaya bir diğer örnek ise, yetişkinlerin katıldığı “bir metre sınıfı” uzaktan kumandalı yelkenli veya motor-bot formundaki tekne yarışları için veya yine uzaktan kumandalı teknelerle yapılan amatör balıkçılık faaliyetleri için tekne üretimidir. Ekleme imalat yöntemi, oldukça ilgi çeken bu boyut ve nitelikteki teknelerin üretiminin maliyetlerini düşürerek desteklemektedir.

- Gemilerin havuz deneyleri için model üretiminde de eklemeli imalat yöntemi gerek hız gerek yüksek duyarlılık ve gerekse azaltılabilen malzeme miktarı ile yararlanılacak bir seçenek olarak görülebilir.
- İnsansız küçük deniz araçlarının (özellikle düşük derinliklere dalış yapabilen veya su yüzeyinde hareket eden) yapısal elemanları veya bir bütün olarak üretimi için eklemeli imalat yöntemi yine polimer esaslı malzemeler temelinde oldukça kullanışlıdır. Son yıllarda yaygınlaşan teknoloji festivalleri de sualtı robotları, uzaktan kumandalı görüntüleme cihazları, insansız yüzen araçların tasarım ve üretimini eklemeli imalat yöntemi sayesinde yaygınlaştırmış ve bu olanağın mühendislik öğretimine katkısı da dikkate değer boyutlara ulaşmıştır.

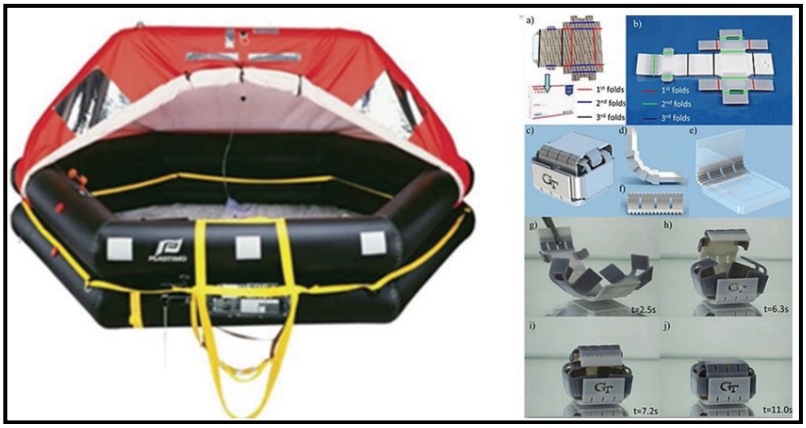
Eklemeli imalat yöntemlerinin denizcilikteki uygulama alanları bağlamında önemli bir potansiyel, karmaşık geometriye sahip metalik yapısal elemanların hızlı ve düşük maliyetli olarak üretilebilmesidir. Örneğin pervane tasarımı ve üretimi yetkinlik gerektiren, maliyetli ve uzun süren bir süreçtir ki pervane üretiminin eklemeli imalat yöntemiyle gerçekleştirilmesinde bir ilk, Damen Tersanesi'nin RAMLAB (Rotterdam Additive Manufacturing LAB) laboratuvarının Autodesk yazılım firmasıyla ortaklaşa başardığı ve Bureau Veritas tarafından onaylı metal pervanedir. Üretilen pervane (Şekil 3) yoğun bir son işlem görmüştür ki buna rağmen üretim süresi konvansiyonel yönteme nazaran oldukça kısalmıştır. Bu deneysel bir çalışma olduğu için maliyet değerlendirmesi yapmak çok gerçekçi olmasa da metal parçaların eklemeli imalatla üretilip, sertifikalandırılabileceğini göstermesi açısından çok önemli bir çaba olarak değerlendirilmelidir. Benzer şekilde vana, impeller, gemi dümeni, yeke gibi donanımların ve/veya bunların elemanlarının metal hammaddelerden üretilmesi gerçekçi bir yaklaşımdır.



Şekil 3. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen gemi pervanesi, (RAMLAB, 2017)

Eklemeli imalat yönteminde akıllı malzemelerden yararlanma, sürece dördüncü bir boyut katmaktadır ki denizcilik endüstrisinde bundan yararlanmak son derece etkin çözümlere ulaşmakta faydalı olacaktır. Güneş ışığına bağlı olarak kendiliğinden kararan camlar, ısıyla renk değişebilen ısıya maruz malzemeler, operatörleri uyarmak için karanlıkta kendiliğinden ışıyan malzemeler, vb. malzemelerden uygun modifikasyonlarla eklemeli imalatta yararlanılabilecektir. Son yıllarda akıllı malzemeler ile ilgili en büyük gelişmelerden birisi hafıza şekilli olanlarıdır. Bu uygulamalarda malzemeye dıştan gelen nem/su, sıcaklık, güneş ışığı gibi uyaranlar malzemenin tepki vermesine ve şekil değiştirmesine neden olmaktadır. Eklemeli imalatın bu teknoloji ile birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan yazım olanağına dört boyutlu yazım (4D printing) denmektedir. Şekil hafızalı malzemelerin denizcilik endüstrisinde kullanılabileceği alanlara örnek olarak can salları üretimi verilebilir. Zira kütlesi 40 kg civarında olan 8-

10 kişilik can sallarının tehlike anında suya atılması, küçük teknelerde insanların fiziksel gücüne dayanmaktadır ki bu durum denizci havalarda oldukça zor ve zaman zaman imkansızlaşır. Salın ağırlığının büyük bileşenlerinden olan ve otomatik olarak aktive olmama riski de yüksek olan şişirme tüpünün ortadan kaldırılmasına yardımcı olacak akıllı malzemelerle ve eklemeli imalat ile üretilmiş bir can salı ciddi bir seçenektir (Şekil 4). Bu tasarımda şişirme tüpünden tamamen vazgeçilmese bile tüp ve şişirme mekanizması küçültülerek can salı hafifletilebilecektir.



Şekil 4. Akıllı malzemelerin denizcilik endüstrisinde kullanımı ile ilgili bir örnek, (Shie et al., 2019)

Küresel anlamda konuyla ilgili yapılan araştırmalar, kullanılan üretim malzemesi temelinde başta termo plastikler ve onların kompozitleri (%28,2) olmak üzere, biyo-malzemeler (%19,8) ve çeşitli metaller (%13,5) odaklıdır ki uygulama alanı temelinde ise tıp (%18,9), inşaat (%3,5) ve otomotiv (%2,2) endüstrisi ön plandadır. Bu bağlamda, denizcilik endüstrisine ilişkin araştırmalar %0,4'lük küçük bir paya sahiptir (Güngör., 2020). Sertifikasyona özen gösteren denizcilik endüstrisinde, bu anlamda eklemeli imalat alanındaki eksikliklerin giderilmesinin ardından bu yönteme dayalı üretimin ivmeleneceği beklentisi vardır. Bununla birlikte eklemeli imalatın sertifikasyonunun, geleneksel üretim yöntemlerindeki gibi malzemenin yalnız kullanımını değil imalata paralel olarak üretimi de içeren süreç nedeniyle farklı yetkinlikleri de içeren karmaşık bir yapıda olması da beklenmelidir (Bekker vd., 2017).

Ürünün bilgisayar destekli olarak tasarlanmasının üretimin bir parçası olduğu eklemeli imalatta vektörel olarak veya bir ağ yapısı içinde modellenen ürünün, 1987'den beri geçerli bir şekilde kartezyen koordinat sistemine sahip üçgensel bir bilgisayar diliyle yani Standart Üçgen Dili (Standard Triangle Language; STL) (Zhou vd., 2015) yazıcıya tanıtılmasıyla başlayan bu süreç, yazıcı üreticisinin sağladığı veya tercihen açık kaynak kodlu bir yazılım ile sıcaklık, baskı hızı, tabla sıcaklığı ve filament çapı gibi kritik üretim parametrelerinin eklenmesiyle yaratılan ve düşük seviye bir dil olan, 1950'li yıllarda sayısal kontrollü üretim tezgâhları (CNC)'ler için geliştirilmiş olan G-code tabanlı bir veri dosyası oluşturulmasıyla devam edecektir. Ardında, bir hafıza kartı veya bir data kablosu yardımıyla üç-boyutlu yazıcıya okutulan bu dosya ve satırlar halinde yazıcı tarafından okunarak işlenir (Delgado vd., 2018).

Katı bazlı, akışkan ve toz temelli olmak üzere üç farklı malzemeden yararlanılarak, bağlayıcı püskürtme (blinder jetting), doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition), toz yataklı kaynaştırma (powder bed fusion), plaka katmanlama (sheet lamination), hazne polimerizasyonu (vat polymerization), materyal püskürtmesi (material jetting) ve materyal ekstrüzyonu (material extrusion) olmak üzere yedi farklı teknik ile (Colorado vd., 2020) uygulanan eklemeli imalat yönteminde maliyet etkin seçenek olarak termo plastik malzeme ile ekstrüzyon kombinezonu ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada da termo plastik polimerler ve onların kompozitleri tabanlı, ektrüze edilmiş anılan malzemeden yararlanan eriyik filamanla imalattan (fused filament fabrication, FFF) yararlanılmıştır ki bu teknik literatürde de

en sık rastlanılanıdır (Mohamed vd., 2015) ve viskoz termo plastik malzemenin ısıtılmış bir uç aracılığıyla platform üzerine veya önceden basılmış katmanlar üzerine katman katman biriktirilmesini içerir (le Duigou vd., 2020).

2. Üç Boyutlu Yazım İyileştirmesi İçin Deneysel Yaklaşım

Eklemeli imalatta performansın iyileştirilmesi için baskı parametrelerinden biri olan malzeme dolgu yoğunluğu ve tekrarlayan yazım geometrisi olarak tanımlanabilecek yazım örüntüsü üreticinin sürecin herhangi bir aşamasında yeniden belirleyebileceği, yönlendirebileceği araçlardandır. Sadece bu iki parametreyle yapılacak optimizasyon dahi beklenen mekanik özelliklerde, daha hafif veya tasarımcı-yönlü ürünlere varmak için yeterli olabilecektir. Bu yaklaşım gerek polimer esaslı gerekse de metalik malzemeler için geçerlidir. Bununla birlikte, polimer malzemelerde mekanik özelliklerin ürün hacmince dağılımının düzgünlüğüne (izotropi) de anılan parametreler hakkında karar verilirken ve özellikle ürünün işletme ömrü boyunca taşıyacağı yükler değerlendirilmek suretiyle özen gösterilmesi gereklidir.

Polimer esaslı malzemelere dayalı yazıcılar görece olarak düşük maliyetli ve kolay üretilebilir, erişilebilir olduğu için bunlardan yararlanılarak PLA ile yapılmış, optimizasyon çalışmalarına literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

Yararlanılacak örüntünün, mekanik özelliklere kritik ve doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Lubombo ve Huneault, 2018) aynı dolgu yoğunluğuna sahip, farklı dolgu örüntüleri arasında çekme mukavemeti açısından iki kata yakın farkın oluştuğu görülmüştür. Bazı araştırmacılara göre ise yazım yoğunluğu ve çekme mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki olsa da bu eğilim yazım örüntüsüne güçlü bir şekilde bağlı olarak değişmektedir (Pandzic vd., 2019). PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) kullanılarak yapılan bir çalışmada ise, yazım örüntüsünün etkisinin malzemeden bağımsız olarak ele alınmasına rağmen, bu yaklaşımın çok doğru olamayacağı, zira yazım örüntüsüyle malzeme arasında göz ardı edilemeyecek bir ilişkinin olduğu; anılan çalışmanın PLA ile yapılmış eşdeğerine vurgu yapılarak ortaya atılmıştır. PETG'nin, bu çalışmada PLA'dan çok daha yüksek katmanlararası yapışmaya sahip olduğu da görülmüştür ve bu nitelik denizel uygulamalar için PETG'nin verimli olabileceğinin altı çizilmiştir (Srinivasan vd., 2020).

Ayrıca polimerlerin cam ve karbon elyafı gibi fiberlerle güçlendirilerek kompozit filamentler üretilmesi ve kullanılması da malzemeyi anizotropik hale getirdiği için yazım örüntüsünün seçimini değiştirebilmektedir (Ma vd., 2021). Bununla birlikte, oluşan bu kompozit çatlak ilerlemesine karşı oldukça duyarlıdır. Dekoratif amaçlı olarak üretilen PLA matrisli ahşap kompozit ile yapılan çalışmaların elektron mikroskop görüntülerinin değerlendirmesinde ise kompozit bileşenlerin ara yüzeylerinde iyileştirme yapılmadığı için yüksek miktarda boşluk bulunmuştur ki böyle bir oluşum ürün performansını olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Kariz vd., 2018). Sonuç olarak eklemeli imalat yönteminde örüntünün etkisini inceleyen çalışmaların malzeme bağlamında tasarlanması önerilmektedir. Nitekim beton ile ilgili yapılan bir çalışmada, yazım örüntüsünün sadece polimerler için değil katmanlararası mukavemet çok iyi olsa da metaller gibi diğer malzemeler için de irdelenmesi ve tasarıma katılması gereken bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır (Heras vd., 2020). Ek olarak, her katmanda şaşırtmalı ve birbirinden farklı olarak ilerleyen üç boyutlu diye nitelenebilecek yazım örüntüsünün basma yüklerinde daha dayanıklı olduğu saptanmıştır (Aloyaydi vd., 2020).

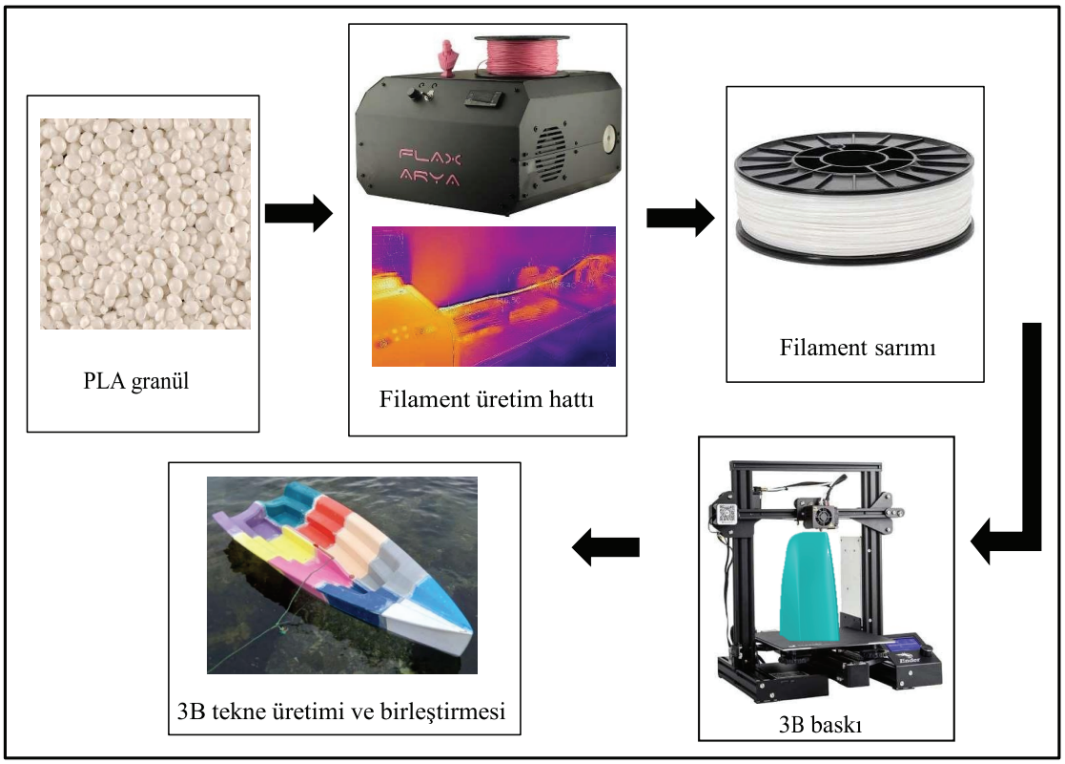
2.1. Malzeme ve Yöntem

Dolgu yoğunluğunun ve yazım örüntüsünün tekne üretimi üzerindeki bileşik etkisinin irdelendiği bu deneysel çalışmada, standart bir yazıcıda kolaylıkla başvurulabilen ve ilgili pazardan temin edilebilen

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

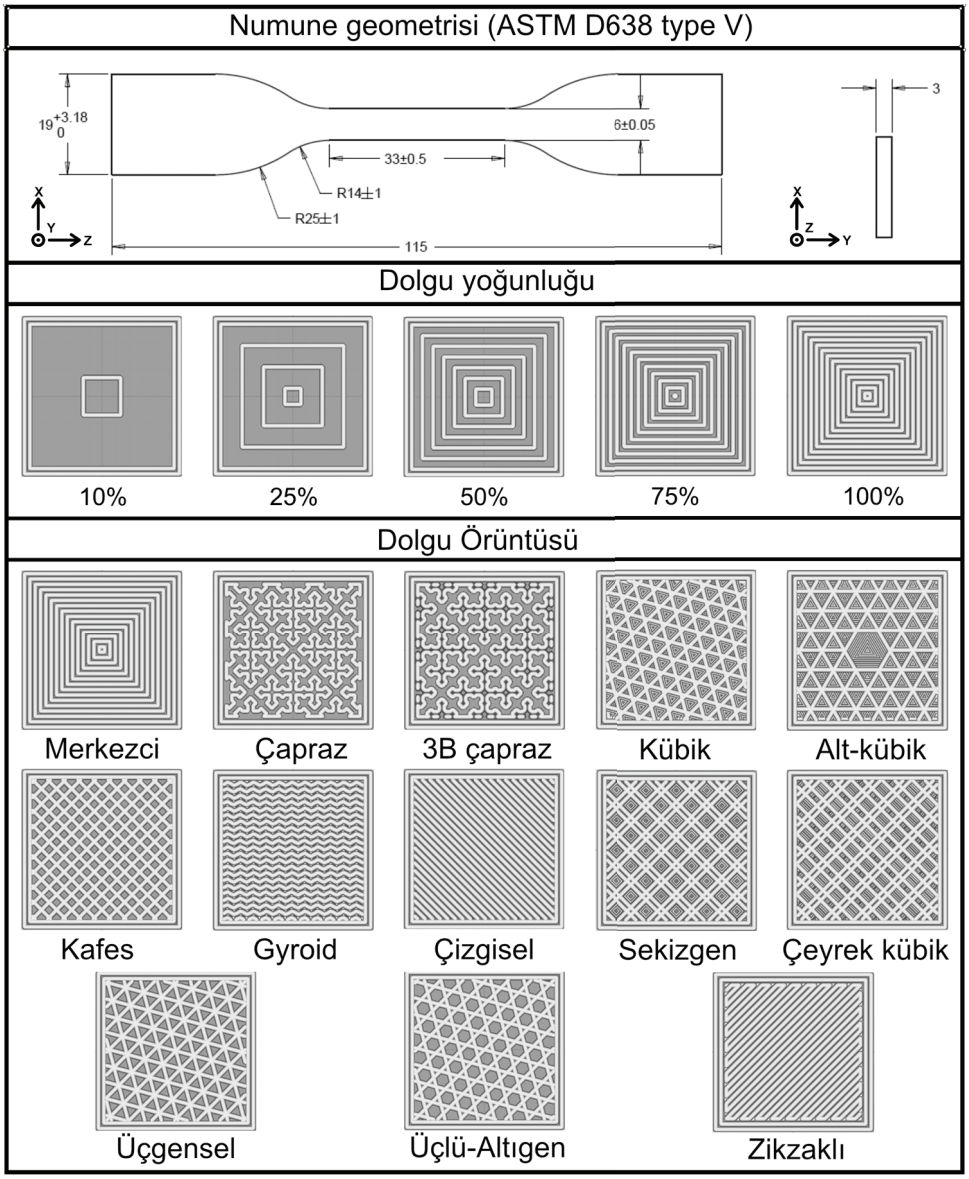
Bio-Flex firmasının F7510 polilaktik asit (PLA) ürünü kullanılmıştır. Bu malzemenin öz kütlesi 1,25 gr/cm^3, erime sıcaklığı 155°C ve akış indeksi 190°C'de 2–4 g/10 dakikadır. Yalnız adı geçen malzeme değil, genel olarak, PLA biyo-bozunur bir malzeme olduğu ve organik olarak doğal süreçlerden elde edildiği için sürdürülebilir malzemeler arasında değerlendirilmektedir.

Granül PLA'dan filaman, üretimi ve tekne modüllerinin yazımı DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, eklemeli imalat laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü Eklemeli İmalat Laboratuvarındaki yazım düzeneği

Çalışma kapsamında 13 farklı yazım örüntüsü ve %10, 25, 50, 75, 100 olmak üzere beş farklı doluluk oranıyla hazırlanan numuneler çekme testlerine Instron 1114 makinasında, 1 mm/dak çekme hızına tabi tutulmuştur (Şekil 6). Her bir mukavemet değeri üç numune testinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. "Kübik, alt-kübik, sekizgen, çeyrek küp" gibi geometriler numune yüksekliği doğrultusunda her katmanda şaşırtmalı olarak işlenerek üç boyutlu bir kafes yapısı meydana getirmektedirler. "Zikzaklı, merkezci, ızgara, üçgensel" formlarında ise her katmanda birbirine zıt yönde olmak üzere iki boyutlu bir yapı oluşmaktadır. Yazım örüntülerinin oluşturulması ve programlanması Creality Slicer V4.8.2'de gerçekleştirilmiştir. Yazım sırasında materyal ekstrüzyonu yöntemlerinden birisi olan FFF tercih edilmiştir. Ürünler cr-200b yazıcısında 40 mm/sn baskı hızında 200°C derecede 0.4 mm nozzle ile, 50°C derecelik cam tablaya alınmıştır. Baskı sonrası ısıl işlem uygulanmamıştır.

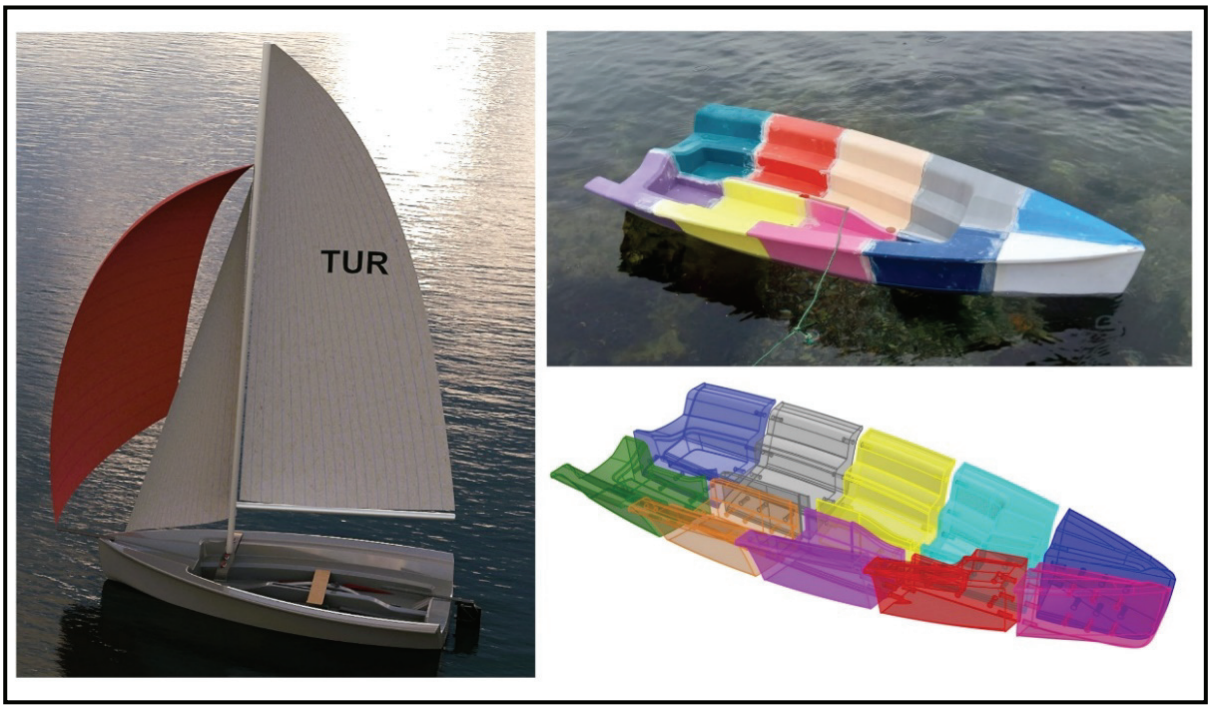


Şekil 6. Numune geometrisi, dolgu yoğunluğu ve yazım örüntüsü

Katmanların baskı yönünde, Şekil 6'da gösterildiği gibi Z ekseni doğrultusunda, yapılan çekme testleri (ASTM,2016) literatürle de uyuşmakla ürün üretimi için düşük yoğunluklarda "kübik" algoritmasının z ekseni doğrultusunda daha iyi mukavemet sonuçlarını sunduğu görülmektedir. Sonuç ürün olarak 5 metre tam boya sahip bir yelkenli tekne gövdesi, 1/5 ölçeğinde %25 doluluk oranında ölçeklenerek Şekil 7'deki gibi üretilmiştir. on farklı parçada üretilen tekne, mekanik ve kimyasal olarak birleştirilmiştir. Buradan elde edilecek sonuçların gerçek ölçekli üretim için yol göstermesi planlanmıştır. Yazım hızı 30 mm/sn, yazım sıcaklığı 200°C alınmış ve 50°C sıcaklığa sahip ısıtmalı tabla kullanılmıştır. Yazım süresi her bir parça için yaklaşık iki tam gün olup ve üretim bir ayda tamamlanmıştır.

Ardından denizel çevresel aşınmadan korumak amacıyla tekne prototipi ürün Termo plastik Poliüretan (TPU) ile kaplanmıştır. Her parçanın farklı renkte üretilmesinin sebebi modüler üretime vurgu yapmak içindir. Bağlantı parçaları sebebiyle tekne ağırlığı %5 oranında artmıştır.

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

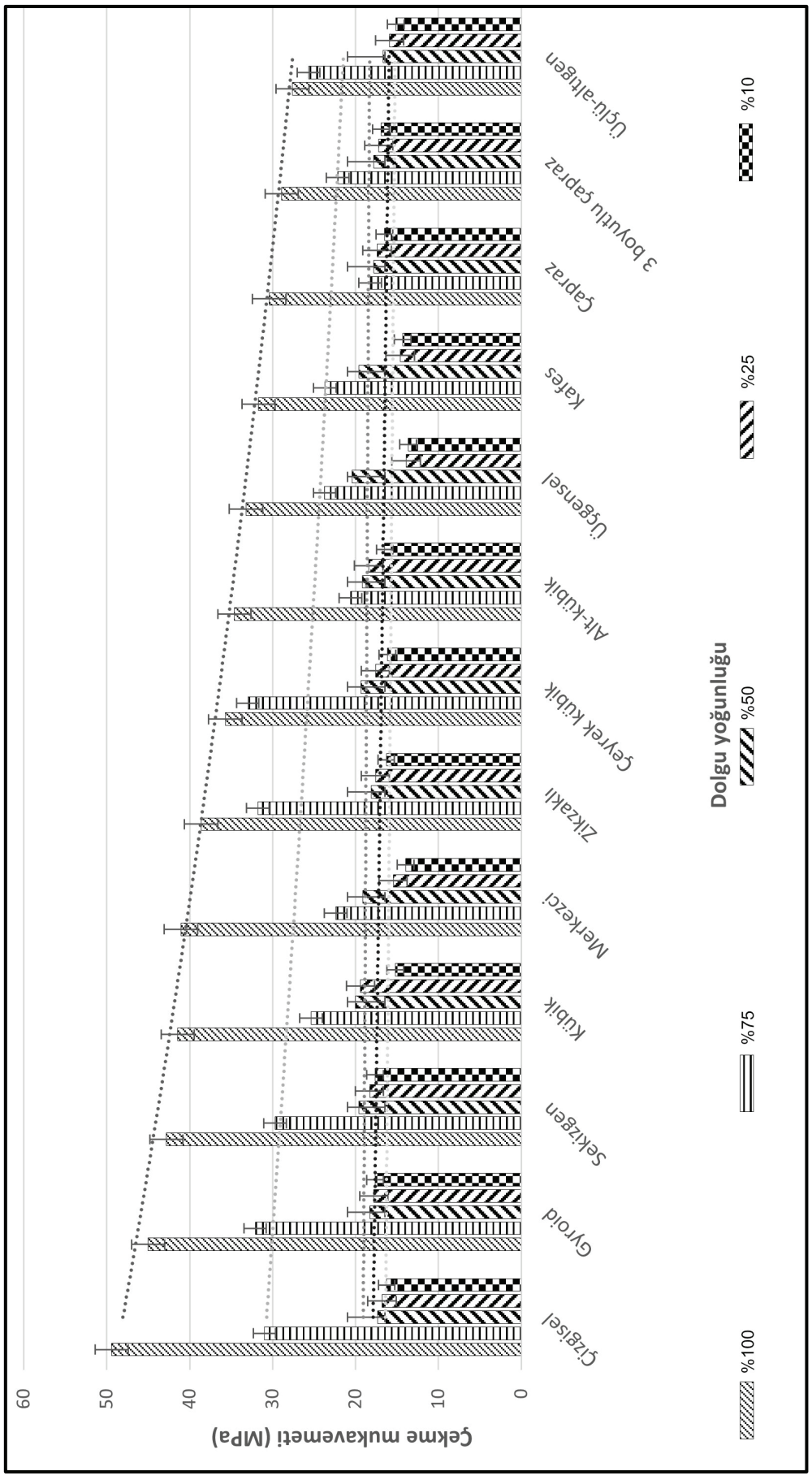


Şekil 7. Üzerinde çalışılan ve eklemeli imalatla 1/5 ölçekte gövdesi üretilen yelkenli tekne

2.2. Sonuçlar

Çekme testi sonuçları incelendiğinde %100 dolgu yoğunluğuna sahip olan parçalar en yüksek mukavemet değerlerine ulaşırken, yoğunluğu azaldıkça mukavemette hızlı ve dramatik bir düşüş görülmüştür. Bu düşüş eğrisi %50 yoğunluk oranından sonra sabitlenmiştir. Üç boyutlu yapıya sahip örüntüler %100 dolgu yoğunluğu oranlarında en yüksek değerlere ulaşamasa da iki boyutlu olanlar düşük yoğunluk oranlarında daha iyi performans sergilemektedir. 2 Boyutlu örüntülerin özellikle, düşük yoğunluklarda, katman basma yönünde, Z ekseni doğrultusunda katman yapışma problemi yaşadığı tespit edilmiştir. Örüntü türlerinin, dolgu yoğunluğu değişimlerine farklı tepki verdiği gözlenmiştir. %10 ve %25'lik dolgu yoğunluğu arasında ise çok düşük farklar bulunmaktadır. Bu yoğunluklar değerlendirilirken, küçük teknelerdeki dış ve iç cidarlara benzer duvar yapılarının yapıyı desteklediği göz ardı edilmemelidir.

Çekme testlerinden ve literatürden alınan sonuçlar ışığında eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yelkenli modelinin deniz testleri başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Tekne deniz durumu 3'e kadar test edilmiş olup üzerine yine ölçekli olarak iki adet yetişkin ağırlığı yerleştirilmiştir. Direk bölgesindeki lokal mukavemet çalışılmamıştır. Çıplak gözle yapılan sörveyde herhangi bir çatlak veya katman ayrışmasına rastlanmamıştır. Su geçirmezlik, anılan kaplama sayesinde başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Yapılan kaplamanın PLA'yı dış ortamlardan yalıtıp, yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmüştür.



Şekil 8. Dolgu yoğunluğu ve örüntüsünün çekme mukavemetine etkisi

Yazım yoğunluğu ile çekme mukavemeti arasındaki ilişkinin, yazım örüntüsüne de oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Farklı örüntüler, yoğunluk azaldıkça mukavemette farklı karakterlerde düşüş eğilimlerine yol açmıştır. Buradan ayrıca, yazım düzlemindeki performansın bu düzleme dik doğrultuda Z ekseni boyunca oldukça azaldığı katmanlar arası bağlanmanın sorunlar yaratmaya başladığı izlenmiştir. Bu durum, "kübik" veya "çapraz" gibi üç boyutlu dolgu örüntülerinin seçilmesinin yani ürünün yazım düzlemine dik doğrultudaki mukavemetine katkısından da anlaşılmaktadır. Dik doğrultudaki mukavemet, tüm yapıyı destekler niteliktedir.

Şekil 8'de görüldüğü gibi, %50 ile %10 doluluk oranına sahip numunelerde, örüntülere göre mukavemet değişimi bağlamında daha dar bir sınırda değişimler gözlenmiştir ki bu olgunun numune boyutundan kaynaklandığı açıktır. Yapıyı bir arada tutmak için, yazım sırasında dış, üst ve alt duvarların eklenmesi zorunluluğu görülmektedir. Numune boyutları çok büyük olmadığı için, belli bir doluluğun altında bu yapıyı artık bu destek elemanları temel olarak taşımakta ve dolgu parametrelerinin önemi azalmaktadır.

Benzer ağırlıklarda, farklı dolgu yoğunluklarına ve malzeme kalınlıklarına sahip gövde yapıları karşılaştırıldığında yazım süresi bağlamında ise tam doluluğa sahip ürünlerin yazım süresi %20 daha uzundur. Bu sebeple iç dolgu yoğunluğunu düşürüp, yapının kalınlığını arttırmak, üretim süresinden kazanç sağlamaktadır.

Yapılan saha testlerinden gözlemlendiği kadarıyla, PLA her ne kadar biyo-bozunur bir malzeme olsa da esnek bir plastik polimer ile kaplandığında, denizel çevresel etkilerden korunmakta ve dolayısıyla iyi bir ömür düzeyinde ulaşmaktadır. Su geçirmezlik böylelikle başarılı bir şekilde sağlanmıştır.

3. Değerlendirme

Yazım parametrelerinden yoğunluk ve örüntünün mekanik özelliklerin iyileştirilmesi bağlamında deneysel olarak incelendiği ve elde edilen sonuçlarla da bir örnek teknenin yazıldığı bu çalışmada, PLA temelinde eriyik filaman yönteminden yararlanılmıştır. Sonuçlar, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur ki bu sonuçlardan tekne üretiminde gerekli yapısal dayanımı sağlamak için temelde iki yaklaşım olduğu görülmektedir: %100 dolgu yoğunluğuna sahip numuneler yüksek bir performans göstermişlerdir fakat yüksek dolgu yoğunluğu sebebiyle, ağırlıkları yüksektir. Bu yüzden, ya ince bir dış kabuk ile gövde üretimi tam dolu ürün veya daha hacimli ve %25 dolulukta ürün seçenekleri arasında karar verilebilir.

Eklemeli imalat yönteminin genel anlamda denizcilik endüstrisi için henüz başlangıç düzeyinde bir tanınırlığa ve temel düzeyde bir uygulanabilirliğe sahip olduğu açıktır. Yöntemin geleneksel metotlara göre birçok avantaj barındırmasına karşın, küçük deniz araçlarının gövde üretimi bağlamında halen bir boyut-maliyet doğru orantılı ilişkisinin çok etkin olduğu yani yazım boyutu veya tekne/parça boyutu büyüdükçe altyapı maliyetlerinin üstel olarak arttığı görülmektedir. Bununla birlikte modüler üretimlerde doğru birleştirme teknikleriyle; eşdeğerlerine nazaran bütünsel üretime göre yeteri kadar mukavemet ve hatta daha iyi hafiflikte sonuçlara varılabileceği bu çalışmayla ortaya konmaktadır.

Üretim sırasında meydana gelebilecek kalite risklerinin yazım parametrelerinin deneysel olarak iyileştirilmesiyle giderilebileceği görülmektedir. Bu çalışmadaki eklemeli imalat yöntemiyle tekne üretimi söz konusu olduğunda, ayrıca dış yüzey iyileştirme işlemlerinin gerekliliği vardır.

Eklemeli imalat yöntemi her üretim gereksinimine yanıt verme anlamında büyük bir potansiyel vaat etse de bu konuda denizcilik endüstrisi özelinde yapılmış araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu üretim bağlamında ise uzun dönemli yorulma davranışı ve hasar mekanizmaları ile ilgili araştırmalara ihtiyaç

duyulmaktadır. Özellikle eklemeli imalat ile üretilmiş tekne gövdelerinin çatlak ilerlemesine karşı daha duyarlı olduğunu belirtmek gerekir.

PETG ise çok iyi katman yapışması sağlaması sebebiyle iyi bir alternatif olarak gelecek çalışmalar için değerlendirilebilir. Ayrıca teknenin kaplanması direnci arttıran yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. Katmanlar arasında kalan boşluklar bu kaplama ile doldurulmaktadır. Bunun da bir maliyet getireceğini ve zaman gerektireceğini belirtmek gerekir.

Petrol bazlı polimerler kullanılarak yapının ömrü uzatılabilir fakat ABS, HDPE veya PETG ile çalışmanın PLA ile çalışmaya göre uzmanlık ve daha yüksek maliyetli kapalı kabinli bir yazıcı gerektirdiğini belirtmek gerekir. İş ve çevre güvenliği, açısından da petrol bazlı polimerler ile çalışırken zehirli gaz emisyonlarına önlem almak potansiyel üretimin vazgeçilmez unsuru olacaktır.

Referanslar

Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., Mustafa, A. (2020). Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed polylactic-acid. Polymer Testing, 87. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106557

American Society for Testing and Materials, (2016), Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, 82(C), 1–15., doi: 10.1520/D0638-14.1.

Bekker, M., Verlinden, C., Galimberti, G. (2017). Challenges In Assessing the Sustainability of Wire + Arc Additive Manufacturing for Large Structures., Solid Freeform Fabrication Symposium,

Colorado, H. A., Velásquez, G., Monteiro, N. (2020). Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. Journal of Materials Research and Technology, 9(4), 8221–8234. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062

Delgado, D., Clayton, P., O'Brien, W., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. Automation in Construction, 89, 110–119. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031

Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R., Castro, M. (2020). A review of 3D and 4D printing of natural fibre bio composites. In Materials and Design, 194, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911

Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H., Yang, A. (2018). Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold? California Management Review, 60(3), 112–132. https://doi.org/10.1177/0008125617752695

Güngör, A., (2020). Türkiye'de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri. Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 218, 36 – 53.

Heras, D., Genedy, M., Reda Taha, M. M. (2020). Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete. Construction and Building Materials, 262. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559

İleri Kompozit Malzemeler Merkezi, (2019). https://composites.umaine.edu/3dirigo-the-worlds-largest-3d-printed-boat/ [Online] [Erişim 10.05.2022]

Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M., Kuzman, K. (2018). Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. Materials Today Communications, 14, 135–140. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016

Khoo, X., Teoh, J., Liu, Y., Chua, C., Yang, S., An, J., Leong, K., Yeong, Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. Virtual and Physical Prototyping, 10(3), 103–122. https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054

Kumar, R., Kumar, M., Chohan, S. (2021). The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review. In Journal of Manufacturing Processes, 64, 828–850. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.022

Lubombo, C., Huneault, A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. Materials Today Communications, 17, 214–228. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.09.017

Ma, Q., Rejab, M. R. M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., Tang, J. (2021). Effect of infill pattern, density and material type of 3D printed cubic structure under quasi-static loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(19), 4254–4272. https://doi.org/10.1177/0954406220971667

Mohamed, A., Masood, H., Bhowmik, L. (2015). Optimization of fused deposition modelling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing, 3(1), 42–53. https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7

MOI Composite, (2020). https://www.polimi.it/en/articles/mambo-the-worlds-first-3d-printed-fiberglass-boat/ [Online] [Erişim 10.05.2022]

Momeni, M., Mehdi, N., Liu, X., Ni, J. (2017). A review of 4D printing. Materials and Design, 122, 42–79. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068

Pandzic, A., Hodzic, D., Milovanovic, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process., Proceedings of the International DAAAM Symposium, 30(1), 545–554. https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.074

Rotterdam Additive Manufacturing (RAMLAB), (2017). LABhttps://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/ [Online] [Erişim 10.05.2022]

Sharma, K., Srinivas, G. (2020). Flying smart: Smart materials used in aviation industry. Materials Today: Proceedings, 27, 244–250. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.115

Shie, M. Y., Shen, Y. F., Astuti, S. D., Lee, A. K. X., Lin, S. H., Dwijaksara, N. L. B., Chen, Y. W. (2019). Review of polymeric materials in 4D printing biomedical applications. In Polymers., 11(11). https://doi.org/10.3390/polym11111864

Srinivasan, R., Nirmal Kumar, K., Jenish Ibrahim, A., Anandu, K., Gurudhevan, R. (2020). Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part. Materials Today: Proceedings, 27, 1801–1805. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.777

Strickland, J., Strickland, D. (2016). Applications of Additive Manufacturing in the Marine Industry. Practical Design of Ships and Offshore Structures, https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29930.31685

Taş, Ş. O., Şener, B. (2019). The Use of Additive Manufacturing in Maritime Industry. International Journal of Engineering Trends and Technology, 67(6). http://doi.org/ 10.14445/22315381/IJETT-V67I6P209

Wang, B., Zhang, Z., Pei, Z., Qiu, J., Wang, S. (2020). Current progress on the 3D printing of thermosets. Advanced Composite Hybrid Materials, 3, 462–472 https://doi.org/10.1007/s42114-020-00183-z
Wohlers, T., Gornet, T. (2016). History of Additive Manufacturing, Wohlers Report, 2-28.

Zhou, Y., Huang, W. M., Kang, S. F., Wu, X. L., Lu, H. B., Fu, J., Cui, H. (2015). From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. Journal of Mechanical Science and Technology, 29(10), 4281–4288. https://doi.org/10.1007/s12206-015-0925-0