

Computing and Knitting in the Context of Concrete Shell Structures

Serenay ELMAS¹, Sema ALAÇAM²

^{1,2} Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering, and Technology, Department of Informatics, Architectural Design Computing, Istanbul, Turkey

This paper was produced from the master thesis titled "Computing and Knitting: Experiments on Tailoring Concrete and Knitted Textile for Shell Structures" that published on December 2017 in ITU Architectural Design Computing Graduate Programme. The thesis proposes an integrated design and production approach to seek future construction scenarios for the complex concrete thin shell structures by utilising material behaviour and computational tools. The investigations focus on the findings and the outcomes of the composite usage of concrete (as a compressive material) and knitted textile (as a tensile material). In the scope of this study three phased experiments were conducted, which comprised of; (i) material experiments, (ii) form finding and structural analysis, (iii) production of physical prototypes. In order to achieve the feasible form alternatives the integration of material feedbacks from physical models and the structural feedbacks from digital model was provided. In order to get a deep understanding about the material limitations and to determine optimum cement mixture to obtain maximum mechanic behaviour from the composed material, microstructure analysis were completed in material scale. Motivated by the feasibility problems of complex concrete shells, the potentiality of initially delicate and flexible materials are explored to generate structurally efficient lightweight concrete shells in order to eliminate the need for formwork, minimize the production cost and time by promising less labor-intensive, more sustainable and waste-free structures.

Keywords: computational design, structural skin, concrete shell structure, textile reinforced concrete, cast-in-place formwork

Received: 03.01.2019

Accepted: 31.01.2019

Corresponding Author:

serenelmas@gmail.com

Elmas, S. & Alaçam, S. (2019). Computing and Knitting in the Context of Concrete Shell Structures. *JCoDe: Journal of Computational Design*, 1(1), 55-64.

Beton Kabuk Strüktür Tasarımı Bağlamında Hesaplama ve Örme

Serenay ELMAS¹, Sema ALAÇAM²

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim, İstanbul, Türkiye

Buyazı Aralık 2017’de İTÜ Mimari Tasarımda Bilişim Lisansüstü Programı’nda yayınlanan “Computing and Knitting: Experiments on Tailoring Concrete and Knitted Textile for Shell Structures” başlıklı tezden üretilmiştir. Tezde, karmaşık biçimlerdeki beton kabuk strüktürlerin üretilebilirliği üzerine malzeme özelliklerinden ve hesaplamalı tasarım araçlarından yararlanarak geliştirilen bütünleşik bir tasarım ve üretim yaklaşımı önerilmektedir. Araştırmada, beton ve örülmüş tekstilin kompozit kullanımı sırasında elde edilen bulgular ve çıktılar üzerine odaklanılmıştır. Başlangıçta esnek ve kolay biçimlenebilen bir malzemeden yararlanmak hedeflenirken, farklı bir kalıba gerek duyulmadan rijit bir strüktürel davranış gösteren hafif beton kabuk oluşturmanın potansiyelleri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler, malzeme deneyleri, biçim arayışı-dijital simülasyonlar ve fiziksel prototip üretimi olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Mikro ölçekte yapılan malzeme deneyleri üzerinden strüktürel davranışın iyileştirilmesi hedeflenirken aynı zamanda oluşturulan parametrik model ile form arayışının da strüktürel geri dönüşlerle süreç içinde beslenmesi sağlanmıştır. Önerilen yöntem ile, beton kabuk strüktür uygulamalarında kalıp ihtiyacı egale edilerek, üretim maliyetinin, üretim süresinin ve yoğun emek gerektiren işçiliğin minimize edilmesi ile malzeme kaynaklarının sorumlu bir şekilde kullanılması ve üretim kaynaklı atık miktarının sıfırlanması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: hesaplamalı tasarım, strüktürel kabuk, beton kabuk yapısı, tekstil betonarme, yerinde dökme kalıp

Teslim Tarihi: 03.01.2019
Kabul Tarihi: 31.01.2019

Sorumlu Yazar:
serenelmas@gmail.com

Elmas, S. & Alaçam, S. (2019). Beton Kabuk Strüktür Tasarımı Bağlamında Hesaplama ve Örme. JCoDe: Journal of Computational Design, 1(1), 55-64).

1. GİRİŞ

Malzeme ve formun doğrudan strüktürel davranışı belirlediği kabuk strüktürler mimarlık ve mühendisliğin ara kesitinde her zaman önemli role sahip bir araştırma alanı olmuştur. 1900' lerin başından itibaren betonarmenin kullanımıyla, yığma yapılara kıyasla oldukça ince kalınlıklarda geniş açıklıkların geçilmesi mümkün hale gelmiştir. Günümüzde ise, betonun akışkan bir malzeme olması sebebiyle sahip olduğu potansiyellerin, giderek karmaşıklaşan formların fiziksel olarak üretilebilirliği üzerine oluşturmaya müsait olduğu eşikler söz konusudur.

Bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) teknolojilerindeki gelişmeler, 1990'lı yıllardan itibaren artan bir ivmeyle doğrudan tasarımdan üretime geçişi kolaylaştırmıştır. Form üretiminin dijital ortamda geldiği nokta hemen hemen sınırsız olarak kabul edilse de, karmaşık formlarda tasarlanan strüktürlerin inşa edilebilirliği ile ilgili hala göz ardı edilemeyecek bir boşluk söz konusudur. Beton kabuk strüktürler çerçevesinden bakıldığında, formun inşa edilebilirliğinin malzemenin özelliği kadar kalıbın kısıtlarına da bağlı olduğunu görmek mümkündür. Bu kısıtlamalara ek olarak, tekrar kullanıma uygun olmayan rijit kalıp kullanımı toplam inşa maliyetinin yaklaşık yarısını oluşturmakta ve ciddi bir atık üretimine sebep olmaktadır (Lloret et al., 2015; Van Mele and Block, 2011). Dolayısıyla, beton kabuk strüktürlerin inşa edilebilirliği üzerine yapılan güncel çalışmalarda, malzeme olarak betonun iyileştirilmesinin ve çelmeye karşı çalışabilmesi adına kullanılan donatıların farklılaşmasının yanı sıra kalıbın yeni bakış açıları ile tekrar ele alındığı ve yorumlandığı görülmektedir.

Bu çalışmada dijital araçlardan ve malzemelerin birlikteliğinin getirdiği potansiyellerden yararlanarak, kompleks beton kabuk strüktürlerin üretilebilirliği üzerine yeni bir yaklaşım getirilmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında örülmüş tekstilin hem donatı hem kalıp olarak çalışması önerilmiş ve ayrı bir kalıp ihtiyacı ortadan tamamen kaldırılarak üretim maliyetini ve zamanını minimize eden aynı zamanda atık üretimi olmadan tamamlanan üretim süreçleri vadedilmiştir.

2. TEKSTİLİN BETON STRÜKLERDE DEĞİŞEN ROLÜ

Esnek bir malzeme olup çelmeye çalışan tekstil ile basınca çalışan rijid bir malzeme olan betonun birlikte kullanımı yarattığı ikilem bağlamında oldukça potansiyel taşıyan bir araştırma alanıdır. Bu birlikteliğin irdelenmesi ve yarattığı ikilemden fayda sağlama durumu sürekli gelişmekte olan teknoloji ve dijital araçlar çerçevesinden yeniden ele alınıyor olsa da, tekstilin beton ile birlikte kullanımına beton kabuk strüktürlerin erken dönem örneklerinden itibaren rastlanılmaktadır. Betonun basınca karşı mukavemetinin tekstilin çelmeye karşı davranışı üzerinden yorumlandığı Heinz Isler' in erken dönem beton kabuk örneklerinde analog simülasyon görevi üstlenen tekstile daha sonra alternatif donatı olarak ve/veya kumaş kalıp uygulamalarında beton ile biraradalığı çalışılan bir malzeme olarak karşılaşılmaktadır (Elmas ve Alaçam, 2018).

Günümüzde karmaşık geometrilerin fiziksel olarak üretilebilirliği üzerine oldukça fazla sayıda çalışma devam etmektedir. Betonun donmadan önce yarıkışkan bir halde olması serbest formların üretilebilirlik arayışlarına cevap olarak yeniden gündeme gelmesinde önemli bir yere sahiptir. Malzemenin özelliklerini iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar kadar gerektirdiği - gerekli olma durumu sorgulanmalı- kalıp kullanımının getirdiği çok yönlü kısıtlamalar da uzun süre bir çok çalışmanın motivasyonu oluşturmuş ve geleneksel kalıp kullanımına alternatif potansiyel üretim süreçlerinin geliştirilmesinde tetikleyici bir rol üstlenmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak; Gramazio Kohler araştırma grubunun kullanılan beton kalıplarının statik ve rijit olma durumunu sorguladığı, Smart Dynamic Casting with slip forming (Lloret et al., 2015) ve TailorCrete wax based formwork (Url-1) çalışmaları, betonun 3D yazıcılar kullanılarak deneyimlenmesi (Bhooshan et al., 2017), Danimarkalı profesyonel bir prekast firması olan ADAPA' nın çift eğrilikli yüzeylerin üretimi için geliştirmiş olduğu Adaptive Mould System (Url-2) ve C.A.S.T tarafından yürütülen kumaş kalıp çalışmaları verilebilir.

Sürdürülebilir üretim süreçlerine olan ihtiyacın giderek artması, inşaat kaynaklı atık üretiminin bir problem olarak değerlendirilmeye başlanması ve yeniden kullanıma elverişli olmayan üretim bileşenlerinin yerine tekstil kullanımının sorgulanmasını tetiklemiştir. Bu sebeplere ek olarak esnek bir malzeme olması, kolay şekil verilebilmesi ve tekstil üretimindeki gelişmeler de kumaşın beton kabuklarda kalıp olarak kullanımını adım adım ileri taşımıştır. Kumaş kalıp kullanımının yaygın olabilmesi, dijital ortamda betonun kumaş kalıp içerisinde hareketi ile fiziksel olarak kumaş kalıp içindeki davranışı arasındaki tutarlılığı arttırmayı gerektirmektedir. Bu gereklilik fiziksel ortamdaki bir çok parametreyi simülasyonun bir parçası haline getiren özelleşmiş dijital araçların geliştirilme ihtiyacını gündeme getirmiştir. Block Research Group' un fiziksel kısıtlamalar, malzeme davranışı ve kumaşta meydana gelen kırılma, defleksiyon gibi parametreleri tek bir platformda entegre etmeyi amaçlayan bir dijital eklenti geliştirme üzerine yaptığı çalışmalar biçimin oluşunu (becoming of form) kontrol edebilme açısından önemli bir adım olarak karşımıza çıkmaktadır (Veenendaal ve Block, 2012). Tekstilin çeşitli yöntemlerle kalıp olarak kullanımının yanı sıra donatı olarak kullanımını da oldukça yaygın olarak karşımıza çıkmakla birlikte, tekstil donatı kullanımı deneysel aşamada kalmamış günümüzde bir çok profesyonel şirket tarafından uygulanan bir sistem halini almıştır. Bu yazı kapsamında detaylı incelemelerine yer verilmeyecek olmakla birlikte, literatürde hem tekstil donatı kullanılan örneklere hem de kumaş kalıp kullanılan beton strüktürlere fazlaca rastlanmaktadır. Literatürde karşılaşılan örneklere kıyasla, Block Research Group tarafından tamamlanan Nest Hilo projesi, eğrisel formdaki beton kabuğun üretiliş aşamasında hem donatı olarak tekstilin tercih edilmesi hem de kalıp olarak kumaşın şilte şeklinde kullanılması ve sürece dijital araçların başarılı bir şekilde entegre olma durumu sebebiyle bu yazıda aktarılacak olan çalışma için ayrı bir yere sahiptir (Url-3).

İlgili literatür çalışmaları ve yukarıda yer verilen örneklerden farklı olarak bu çalışma kapsamında tekstil donatı ve tekstil kalıp farklı elemanlar olarak değerlendirilmemiştir. Örneğin tekstilin hem donatı hem de daha sonra bir

söküm işlemi gerektirmeyecek şekilde strüktür içinde kalan bir kalıp işlevi görmesi önerilmiştir. Sürecin önemli bir kısmında da beton ile tekstilin iplikleri arasındaki adezyon kuvveti malzeme ölçeğinde yapılan deneyler ile güçlendirilme yoluna gidilmiştir. Bu da kumaş kalıp uygulamalarında uygulanan yöntemden, çalışma kapsamında önerilen yöntemi ayıran başka bir nokta olarak kabul edilebilir.

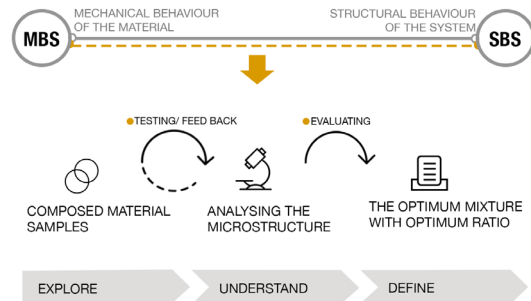
3. BETON VE ÖRÜLMÜŞ TEKSTİLİN BİRARADALIĞI ÜZERİNE YAPILAN DENEYLER

Beton karışımı ve organik yün ipliklerin kompozit bir şekilde davranışını gözlemlemeyi, irdelemeyi ve iyileştirmeyi amaçlayan bu süreç üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamaları, mikro ölçekte yapılan malzeme davranış incelemeleri, dijital ortamda gerçekleşen biçim bulma ve strüktürel simülasyonlar ve fiziksel prototiplerin üretimi oluşturmaktadır.

3.1 MALZEME DENEYLERİ

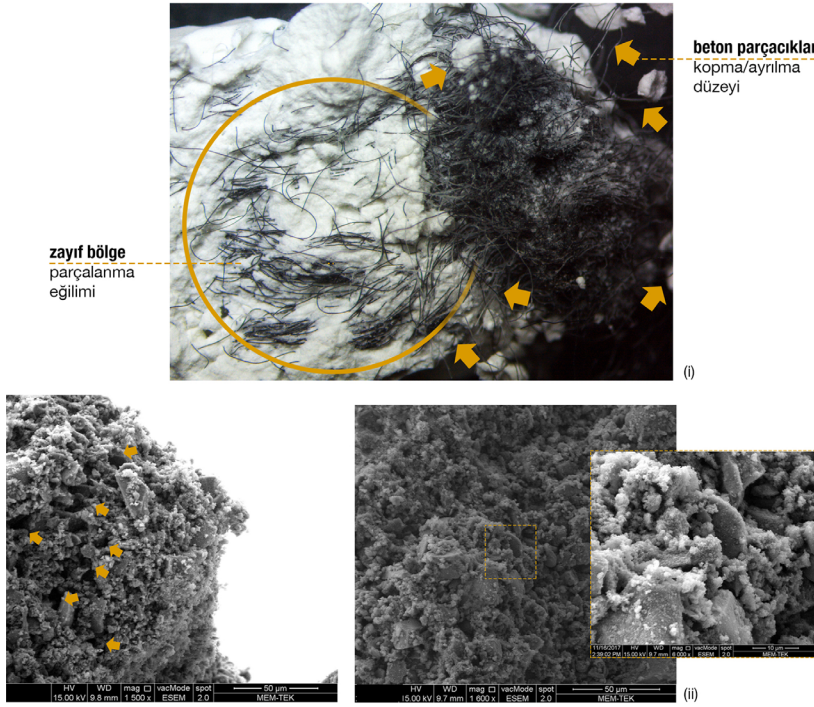
Biçim bulma, strüktürün maruz kaldığı yükler ile statik denge içinde olacak şekilde optimum geometrisini bulabilmek adına bir çok parametrenin dogrudan ve net bir şekilde kontrol edildiği bir süreçtir. Kabuk strüktürler özelinde bakıldığında maruz kalınan yuk tipik olarak ölü yük ve çoğu zaman kabuğun kendi ağırlığıdır (Adriaenssens et al., 2014, p.2). Bu sebeple sistemi malzeme üzerinden hafifleterek maruz kalınan yükün azaltılması bir alternatiftir. Beukers ve Van Hinte (2005)'nin vurguladığı gibi sistemin yükünün hafiflemesi için hafif malzeme kullanmak bir seçim olabildiği gibi bir zorunluluk değildir. Ağır malzemeler kullanılarak ta (kullanıldıkları form ve kalınlığa bağlı olarak) hafif strüktürler elde edilebilir (çelik, beton v.b). Fakat bu tür malzemeler kullanılarak sistemin hafifletilmesi malzeme kalınlığı üzerinden yapıldığında, inilebilecek minimum kalınlık sistemin yüklere karşı cevap verebileceği seviyede olmalı, malzemedan beklenen mekanik performans karşılanmalıdır.

Çalışma kapsamında yapılan malzeme deneylerinin temel amacı, kabuk strüktürlerde malzemenin mekanik davranışıyla sistemin genelinin strüktürel davranışı arasındaki ilişkiyi arttırmak ve iyileştirmek olarak kabul edilebilir. Yapılan deneylerde beton karışımının örülmüş tekstil üzerinde bir kaplama olarak davranışı gözlemlenmiştir. Bu çerçevede, kompozit bir malzeme gibi çalışması beklenen farklı içeriklerdeki çimento karışımları ile kaplanmış ipliklerden alınan kesitler üzerinden mikrostrüktür incelemeleri yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1: Malzeme deneyleri için önerilen yöntem diyagramı

Mikrostrüktür, malzemenin karakter özelliğini barındıran, atomik ve moleküler yapısı ile ilgili olan dolayısıyla da mikroskop altında gözlemlenebilen iç yapısı olarak tanımlanırken, makrostrüktür malzemenin çıplak gözle görülebilen özellikleri olarak tanımlanmaktadır (Eriç, 2002). Çalışma kapsamında uygulanan çimento karışımının inceliği sebebiyle oluşmaya ve ilerlemeye meyilli çatlakların minimuma indirilmesi ve iplik tanecikleri ile beton parçacıklarının birbirlerine uyguladığı adezyon kuvvetini arttırabilmek adına değişik oran ve içeriklerde çimento karışımları sabit kalınlık ve açıklıkla örülmüş yüzeyler üzerine uygulanmıştır. Malzemelerin birlikte nasıl davranmak istediğine yönelik daha derin bir anlayış kazanmak adına, beton hamuru karışımına daldırılan örülmüş tekstil numunelerinden ve özellikle oluşan çatlak bölgelerinden periyodik olarak kesitler alınarak hem stereo mikroskop hem de sem (statik elektron mikroskobu) altında mikrostrüktür incelemeleri yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: (i) stereo mikroskop (ii) sem ile kesit alınan bölgenin incelenmesi

1500x ile 6000x arası yapılan yakın incelemelerde moleküler ölçekte de malzemenin boşluklu yapısı kullanılan malzemelerin izin verdiği ölçüde karışım içerikleri ve oranları değiştirilerek minimize edilmeye çalışılmış, bu sayede malzemelerin birbirleriyle daha sıkı bir şekilde birleşme eğilimi göstermesi sağlanmıştır.

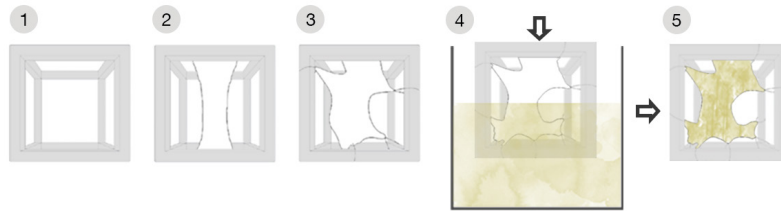
3.2 BİÇİM ARAYIŞ SÜRECİ

Parametrik tasarım ortamında yürütülen biçim arayışı ve entegre strüktürel analizler iki temel amaç üzerine kurgulanmıştır. Bunlar, karmaşık geometrilerin üretilebilirliğine cevap aramada, başlangıçta esnek ve kolay biçim verilebilen bir malzemenin potansiyellerini araştırmak ve bu sırada biçim karmaşıklıkça eş zamanlı olarak strüktürel davranış ile ilgili geri bildirimler alabilmektir.

Strüktürel geri dönüşler alınabilmesi için model 'Karamba' eklentisinin bileşenleriyle entegre çalıştırılmış, bu sayede ilmekler çekilip karkasa sabitlenerek oluşturulan form esnasında eş zamanlı olarak kabuğun genelinde meydana gelen yük dağılımını gözlemlemek mümkün hale gelmiştir. Analizler sonucu basıncın fazla olduğu sistemin altında kalan tüm ilmekler sabit ankraj noktaları olarak belirlenmiş ve metal bir tel yardımıyla birlikte çalışmaları sağlanmıştır ve alınan yük dağılım verilerine göre örgünün sıklaşıp seyrekleşebileceği bölgelere karar verilmiştir.

3.3 FİZİKSEL PROTIPLERİN ÜRETİLMESİ

Fiziksel prototipler yuvarlak örgü makinası ile 4 mm kalınlığında yün iplikler kullanılarak üretilmiştir. İpliğin kalınlığının ve örgü yönteminin belirlenmesi örgü makinasının kısıtlamalarına bağlı olarak şekillenmiştir. Atkılı örgü (weft knitting) yöntemi kullanılarak tübüler formda örülen tekstil 350mm * 350mm * 350mm ölçülerinde oluşturulan ahşap karkasa gerilerek sabitlenmiştir. İstenilen form tekstile ilmek noktalarından çekilip gerilerek verildikten sonra, daha önce malzeme deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanan optimum çimento karışımına daldırılarak sabitlenmesi ve rijit bir hal alması sağlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4: 1. Ahşap karkas, 2. Örgünün üst ve alt bölgelerinden karkasa sabitlenmesi, 3. Dijital ortamda üretilen kodlar doğrultusunda ilmeklerin karkasa çekilerek sabitlenmesi, 4. Beton karışımına daldırma, 5. Katılaşmaya bırakılan model

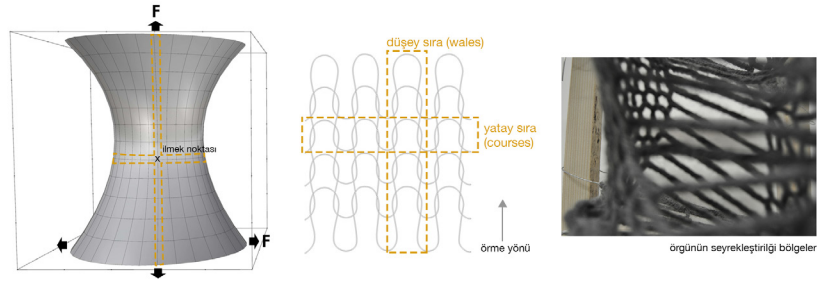
Tek tip örgü yöntemi ve aynı sayıda ilmek kullanılarak üretilen numunelerde, strüktürel simülasyonlardan alına yük dağılımları doğrultusunda örgü içinde kısmi olarak ilmekler atlatılarak açıklıklar oluşturulmuştur. Örgünün sıklaştığı veya seyrekleştiği bölgelerde yapılacak müdahaleler otomasyona bağlı olmadığı için atkılı örgü yönteminde ilmekler atlatılırken örgünün istenilenden daha çok açılması deformasyona sebebiyet vermesine rağmen deneyler kapsamında yuvarlak örgü makinesinin tercih edilmesinin üç temel sebebi vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Tübüler olarak üretilen form üst ve alt çember kesitlerinden sabitlendikten sonra yatay doğrultuda çekilerek deforme edileceği için yatay doğrultuda uygulanan çekme kuvvetine karşı maksimum esneklik ve elastiklik sağlamak,

2. Yatay doğrultuda sağlanan esneklikle karmaşık geometrilerin üretimine cevap verebilmek,

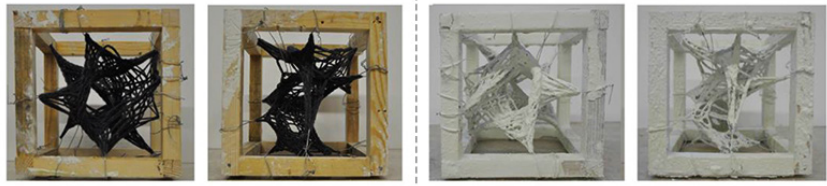
3. Makineden çıkan formun ayrıca bir dikim işlemine gerek duyulmadan tübüler olarak direkt üretilebiliyor olması ve bu sayede dijital ortamda üretilen model ile fiziksel model arasındaki tutarlılığın artırabilmektir.

Şekil 5: Atkılı örme tekniği ve örgünün seyrekleştirdiği bölgeler



getirilmesi için metallerin kaplanmasında kullanılan eloksal işleme yakın bir havuzlama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde hazırlanan beton karışımlarına daldırılan karkaslara sabitlenmiş tekstil formlar, yarı akışkan formdaki betonu iplikleri üzerine tutarak, betonun bir kaplama gibi davranması sağlanmıştır (Şekil 6).

Şekil 6: Üretilen fiziksel prototipler: Beton karışımına daldırılma işleminden önce ve sonra



Beton karışımına daldırılan örülmüş tekstil formların iplikleri üzerindeki beton katmanı kururken yerçekiminin etkisiyle aşağı doğru birikim gösterdiği ve maksimum kalınlığa ulaştığı gözlemlenmiştir. Strüktürlerin alt kısımları maksimum basınca maruz kaldığı için bu bölgedeki betonun maksimum kalınlığa ulaşması strüktürün yük taşıma özellikleri açısından pozitif olarak değerlendirilmiş olsa da, betonun bu bölgede birikme durumu oluşturulan dijital model ve strüktürel analizlerde hesaba katılmamıştır. Dolayısıyla kontrol edilemeyen bir durum söz konusu olmuştur. Betonun kuruma aşamasında belirli bir süre yapmış olduğu akışı ve buna bağlı olarak formun yapılışını/oluşunu tam anlamıyla kontrol etmek ve müdahale edebilmek için sensörlerle entegre eş zamanlı bir gözlem mekanizması kurulması gerekli olacağından çalışma kapsamında betonun akışına müdahale etme göz ardı edilmiştir. Betonun yerçekimi ile strüktürün alt kısımlarında birikme davranışını simüle etmek adına dijital modele dönülüp ekstra bir yük girdisi tanımlanmış aynı zamanda alt bölgelerdeki strüktür kısımlarının kesit özellikleri (ip kalınlığı sabit olup çevresindeki beton kaplama kalınlığı verisi artırılarak) değiştirilmiştir. Bu şekilde simülasyon güncellenmiş ve dijital ortamdaki model ile fiziksel prototiplerin birbirleri ile tutarlılığını arttırma yoluna gidilmiştir.

4. SONUÇ VE TESPİTLER

Çalışma kapsamında üretilen fiziksel prototiplerin kendi ağırlıkları altında rijit bir şekilde durmalarının yanısıra üzerine gelen yüklere karşı beklenenden daha yüksek bir direnç gösterdikleri gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler, form aktif olarak çalışan örülmüş yün ipliklerin beton karışımı ile bütünleşmesi ve tek bir eleman olarak çalışması sonucu potansiyel bir yük taşıyıcılık özelliği edindiğini göstermektedir.

Özetle geliştirilen yaklaşım, betonarme kabuk strüktürlerde kalıp kullanımını elimine ederek, üretim maliyetleri ile yapım sürelerini minimize etmeye imkan verirken, daha sürdürülebilir strüktürel üretim süreçleri vaat etmektedir. Çalışmanın bütününden elde edilen verilerin, beton ince kabuk strüktürlerin form, malzeme ve strüktürel davranış bağlamında, karmaşık doğasına dair anlaşılabilirliğin gelişmesine katkıda bulunması öngörülmüştür. Önerilen yöntemin farklı ölçekte uygulanabilirliği söz konusu olduğunda, kullanılan ipin özellikleri, üretim yöntemi/kullanılan araçlar ve örme teknikleri tekrar değerlendirilmelidir. Başka bir yaklaşımla, üretilen fiziksel prototipler deneysel çalışma kapsamındaki ölçekte bırakılıp daha büyük ölçekli bir kabuk strüktürün bileşenleri haline gelebilir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamaları için, farklı ip kalınlık ve çeşitleriyle çalışabilen, dijital modelden ve strüktürel simülasyonlardan alınan veriler doğrultusunda farklı dokularda ve sıklıklarda örgüler üreterek manuel müdahale gereksinimini ortadan kaldıran gelişmiş örgü makinelerinin ve ilgili yazılımlarının kullanımı hedeflenebilir. Bu şekilde daha kontrollü ve entegre tasarım ve üretim süreçleri elde edileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (2014). Shell structures for architecture: form finding and optimization (pp.1-5). Routledge.
- Beukers, A., & Van Hinte, E. (2005). Lightness: The inevitable renaissance of minimum energy structures, (pp.22-32). 010 Publishers.
- Bhooshan S., Van Mele T. and Block P. (2017). Equilibrium-aware shape design for concrete printing, Humanizing Digital Reality - Proceedings of the Design Modelling Symposium, 493-508. Springer Paris.
- Elmas S., & Alaçam S. (2018). Tekstil ve Betonun Biraradılığı Üzerine Deneysel Sorgulamalar. Betonart, (57), 78-83.
- Eriç, M. (2002). Yapı Fiziyi ve Malzemesi. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Kolarevic, B., & Klinger, K. (2008). Manufacturing material effects: rethinking design and making in architecture. Routledge s.103-118.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. Computer-Aided Design, 60, 40-49.
- Van Mele, T., & Block, P. (2011). A novel form finding method for fabric formwork for concrete shells. J. Int. Assoc. Shell and Spatial Structures, 52(217224), 31.
- Veenendaal, D., & Block, P. (2012). 35 Computational form-finding of fabricformworks : an overview and discussion. Proceedings of the 2nd International Conference on Flexible Formwork. University of Bath.

Url 1 <<http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html>>

Url 2 <<http://adapa.dk>>

Url 3 <<http://www.block.arch.ethz.ch/brg/project/full-scale-construction-prototype-nest-hilo-shell-roof>>