

Türk Üçgeninin Parametrik Modellenmesi ve Robotik Üretimi Üzerine Bir Yöntem

Barış Çağlar ¹; Hakan Oğuz Bor ²; Serbürent Vural ³

^{1,3} Karadeniz Teknik Üniversitesi; ²İstanbul Teknik Üniversitesi

¹baris.caglar.mimar@gmail.com; ²oguzbor@gmail.com; ³svural@ktu.edu.tr

Özet

Çalışma, geleneksel mimarinin temel yapı elemanlarından olan kubbenin, kare planlı bir mekânın üzerine inşa edilebilmesi için geliştirilmiş çözümlerden biri olan Türk üçgenin ele almaktadır. Bu bağlamda günümüzde sayısal teknolojiler ile bu yapı elemanının nasıl tasarlanabileceği ve üretilebileceğine ilişkin bir model geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Anadolu'da Selçuklu ve Osmanlı İmparatorluğu Dönemlerinde, kubbenin inşa edilebilmesi için geliştirilmiş özgün çözümlerden biri olan Türk üçgeni rasyonel, işlevsel, sağlam ve estetik olması nedeniyle önemli bir değer olarak görülmektedir. Türk üçgeninin gelişen teknolojik olanaklarla yeniden ele alınması, biçimsel karakterinin ve özelliklerinin sayısal olarak çözümlenmesini ve sayısal fabrikasyon yöntemleriyle üretilmesi bu yapı elemanının algılanması ve yorumlanması açısından önemli bulunmaktadır.

Geleneksel bir yapı elemanı olan Türk üçgeninin günümüz teknolojisinin olanakları ile yeniden ele alınmasıyla; Türk üçgenine ait geometrik kuralların açığa çıkarılması, iç mekandaki kubbe ile kare mekân arasındaki geçiş ilişkisinin araştırılması, restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere bir altlık sağlanması, yeni inşa edilecek projelere referans olarak kullanılması, mimari ve kültürel bir değer olarak konunun tanıtılması amaçlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntem, geleneksel mimaride kubbeye geçişi sağlayan Türk üçgeninin sayısal ortamda parametrik bir modelini geliştirmek ve ardından bu parametrik modelin ölçekli bir kesitini robot kol kullanarak frezeleme yöntemiyle üretmektir.

Özünde daire planlı bir kubbenin kare planlı bir mekân üzerine yerleştirilme problemine bir çözüm olarak geliştirilmiş Türk üçgeni, rasyonel bir geometrik mantık içermektedir. Böylelikle üretilen parametrik model, Türk üçgeninin içerisinde barındırdığı mantığı strüktürel açıklık, kuşak yüksekliği, ikincil üçgenlerin derinliği gibi çeşitli parametrelere göre hızlıca yeniden kurulmasını sağlamıştır. Benzer yapısal özellik gösteren binalar için parametrik modellerin esnekleşmesi çalışmanın özgün olduğu düşünülen noktalardandır.

Çalışma kapsamında Bursa Hacılar Cami incelenerek Türk üçgeni elemanı geometrik olarak çözümlenmiş, parametrik olarak sayısal ortamda üretilmiş ve 1/10 ölçekli köşe kesiti EPS malzeme kullanılarak robot kol ile üretilmiştir.

Mimarlıkta gelişen teknolojiye dayanarak, geleneksel yöntemlerle uzun zaman alacak tasarımların hızlıca modellenmesine aynı zamanda karmaşık geometrilerin çözümlenmesine ve fiziksel olarak yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Parametrik modelleme, robotik fabrikasyon, türk üçgeni, üçgenler kuşağı, kubbe.

APA Stilinde Kaynak Gösterimi: Çağlar, B., Bor, H. O., & Vural, S. (2021). kinetik cephe sistemleri özelinde iç mekân işlevi ile cephe yüzeyi ilişkisi üzerine bir üretken tasarım yaklaşımı. G. Çağdaş, M. Özkar, L. F. Gül, S. Alaçam, E. Gürer, S. Yazıcı, B. Delikanlı, Ö. Çavuş, S. Altun, & G. Kırdar (Editörler), *Mimarlıkta Sayısal Tasarım XV. Ulusal Sempozyumu* (sf. 159–169). <https://mstas2021.itu.edu.tr/sempozyum/bildiri-kitabi>

Parametric Modelling of the Turkish Triangle and A Method on Robotic Production

Barış Çağlar ¹; Hakan Oğuz Bor ²; Serbülent Vural ³

^{1,3} Karadeniz Technical University; ² Istanbul Technical University

¹ baris.caglar.mimar@gmail.com; ² oguzbor@gmail.com; ³ svural@ktu.edu.tr

Abstract

The study's aim is to create a model proposal for how the Turkish triangle, a traditional transition between the square planned space and the dome, might be built and constructed today using digital technologies. The Turkish triangle, one of the original solutions developed for the construction of the dome, occupies an important place, particularly in symbolic buildings in Anatolia during the Seljuk and Ottoman Empire Periods. It is regarded as an important value due to its rational, functional, robust, and aesthetic qualities. Reconsidering the Turkish triangle using today's digital technology, quantitatively defining its formal aspects, and producing it with a digital fabrication method are all important for today's understanding and interpretation of this fundamental structural element.

Thus, by producing the Turkish triangle using today's digital design and fabrication processes, it is aimed to disclose the geometric rules, to investigate the transition relationship between the dome and the square space, give a base for restoration work, serve as a reference for new projects to be developed, and introduce the subject as an architectural and cultural asset.

The method used in this study develops a parametric model of the Turkish triangle in a digital environment and then mill a scaled section of this parametric model using a robotic fabrication method.

The Turkish triangle, created as a solution to the challenge of placing a circular dome over a square planned space, has a rational geometric logic. This allows the system to be digitally evaluated and parametrically modeled. As a result of the generated parametric model, the Turkish triangle could be swiftly reconstructed based on various parameters such as structural span, girdle height, and depth of secondary triangles. One of the study's original statements is the flexibility of buildings with similar structural features using parametric models.

Within the scope of the study, Bursa Hacilar Mosque was analyzed and the Turkish triangle element was analyzed geometrically, parametrically fabricated in digital environment and 1/10 scale corner section was produced with a robot arm using EPS material.

Utilizing new technology in architecture allows designs that would take a long time to model using traditional methods to be modeled fast, as well as solving complex geometries and producing them with high physical precision.

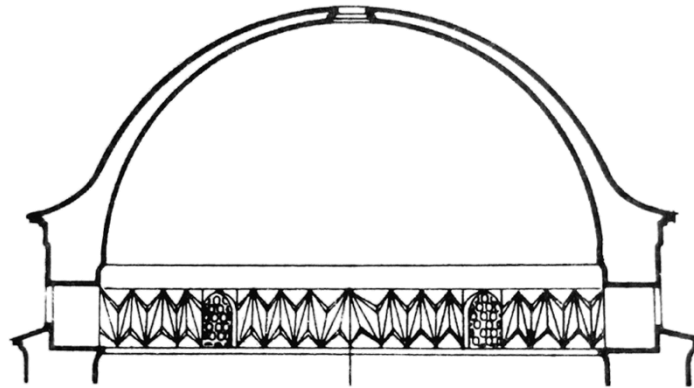
Keywords: Parametric modelling, robotic fabrication, turkish triangle, drum, dome.

Citation in APA Style: Çağlar, B., Bor, H. O., & Vural, S. (2021). Parametric modelling of the turkish triangle and a method on robotic production. In G. Çağdaş, M. Özkar, L. F. Gül, S. Alaçam, E. Gürer, S. Yazıcı, B. Delikanlı, Ö. Çavuş, S. Altun, & G. Kırdar (Eds.), *Computational Design in Architecture, 15th National Symposium* (pp. 159–169). <https://mstas2021.itu.edu.tr/sempozyum/bildiri-kitabi>

1. Giriş

Geleneksel mimarinin en temel yapı elemanlarından biri olan kubbenin kare planlı bir mekânın üzerine inşa edilebilmesi için geliştirilmiş çözümlerden biri olan Türk üçgeninin, günümüzde sayısal teknolojilerin olanakları ile nasıl tasarlanabileceği ve üretilebileceğine ilişkin bir model önerisi bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir. Özellikle Anadolu'da Selçuklu ve Osmanlı Dönemlerindeki simgesel binalarda önemli bir yer tutan kubbenin inşa edilebilmesi için geliştirilmiş özgün çözümlerden biri olan Türk üçgeni rasyonel, sağlam ve estetik olmaları nedeniyle önemli bir değer olarak görülmektedir (**Şekil 1**). Türk üçgeninin günümüz sayısal teknolojilerinin getirdiği olanaklarla yeniden ele alınması, biçimsel karakterinin ve özelliklerinin sayısal olarak tanımlanması ve fiziksel olarak robotik yöntemle üretilmesi bu geçiş elemanının günümüzde algılanması ve yorumlanması açısından önemli bulunmaktadır.

Böylelikle gerçekleştirilen çalışmada geleneksel bir yapı elemanı olan Türk üçgeninin günümüz teknolojisine ait sayısal tasarım ve fabrikasyon yöntemleriyle üretilerek; Türk üçgenine ait geometrik kuralların açığa çıkarılması, iç mekandaki kubbe ile kare mekân arasındaki geçiş ilişkisinin araştırılması, restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere bir altlık sağlanması, yeni inşa edilecek projelere referans olarak kullanılması ve mimari ve kültürel bir değer olarak konunun tanıtılması amaçlanmıştır.



Şekil 1: Türk üçgeni (Hasol, 2008)

Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntem geleneksel mimaride kubbeye geçişi sağlayan Türk üçgenini sayısal ortamda oluşturan parametrik bir modeli geliştirmek ve ardından örnek olarak seçilen bir binanın (Bursa Hacılar Cami) geliştirilen parametrik model kullanılarak sayısal ortamda üretilmiş ölçekli bir kesitini robot kol (manipülatör) kullanarak frezeleme yöntemiyle fiziksel olarak üretmektir. Geliştirilen parametrik model; kubbe, Türk üçgeni ve taşıyıcı duvarı bir arada oluşturmaktadır. Kubbe ve taşıyıcı duvarda yer alabilecek fener, pencere, kapı, geçit gibi açılıklar bu çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

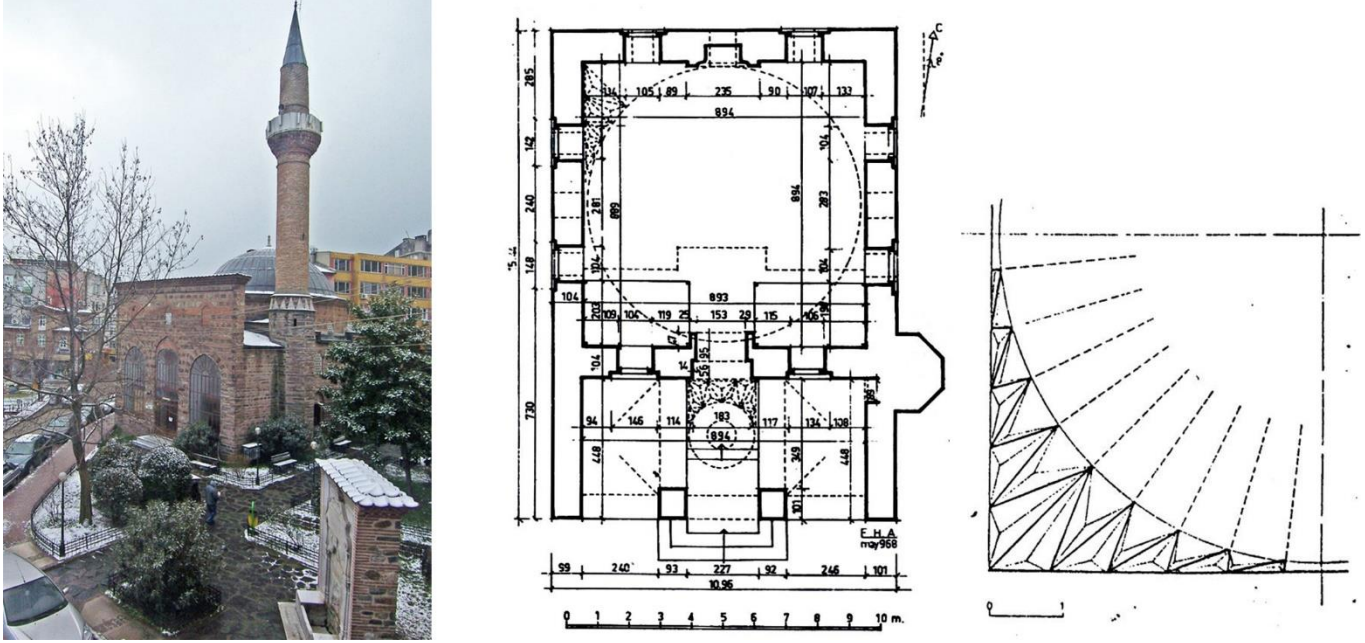
Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Sayısal Tasarım Araştırma ve Fabrikasyon Birimi'nde (CODE FAB) yer alan ekipman ve olanaklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla sayısal ortamda parametrik modelin oluşturulması, CAM yazılımları ile takım yollarının hazırlanması ve robot kol kullanılarak ölçekli bir modelin fiziksel olarak üretilmesidir. İlk aşamada, gerçekleştirilen literatür çalışmasıyla kubbelerle geçişte Türk üçgeni barındıran binalara ilişkin çeşitli teknik çizimlere (plan, kesit, görünüş) ve metinlere ulaşılmıştır. Türk üçgeni kendi içerisinde pek çok çeşit barındırdığı için içlerinden prizmatik üçgenler çalışma kapsamında seçilmiştir. Seçilen örneklerle ilişkin çizimler analiz edilerek üçgenler kuşağının oluşturulmasına yönelik bir sayısal model parametrik olarak Rhinoceros 3D (Version 7-7.1.20343.9491, 8.12.2020) yazılımı ve Grasshopper (Build 1.0.0007) ortamında oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, Bursa Hacılar Camisi'ne ait Türk üçgeni, literatürden elde edilen bilgiler ve yerinde gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen verilere göre geliştirilen parametrik model kullanılarak sayısal ortamda üretilmiştir. Sonraki adımda modelin ¼ köşe kesiti kubbe, Türk üçgeni ve mekân duvarlarını içerecek şekilde kısmi olarak alınmıştır. Ardından Grasshopper ortamında üretilen kısmi model MasterCAM yazılımına aktararak gerekli takım yolları freze üretim yöntemi için çıkarılmıştır. MasterCAM yazılımındaki takım yolları Octopuz robot programlama ve simülasyon

yazılımına aktararak üretimin gerçekleştirilebilmesi için gerekli robot hareketleri ve çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü aşamada, Octopuz yazılımından elde edilen G-Code alınarak robot kontrol ünitesine aktarılmıştır. Üretim robot kol ile EPS plaka malzemelerin tanımlanan takım yollarına göre frezeleme yöntemiyle üretilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 2: Bursa Hacılar Cami (Cavaç, 19 Ekim 2011) (Sol), planı ve Türk üçgeni (Şimşek, 2010) (Sağ)

2. Kubbeye Geçiş Elemanı: Türk Üçgeni

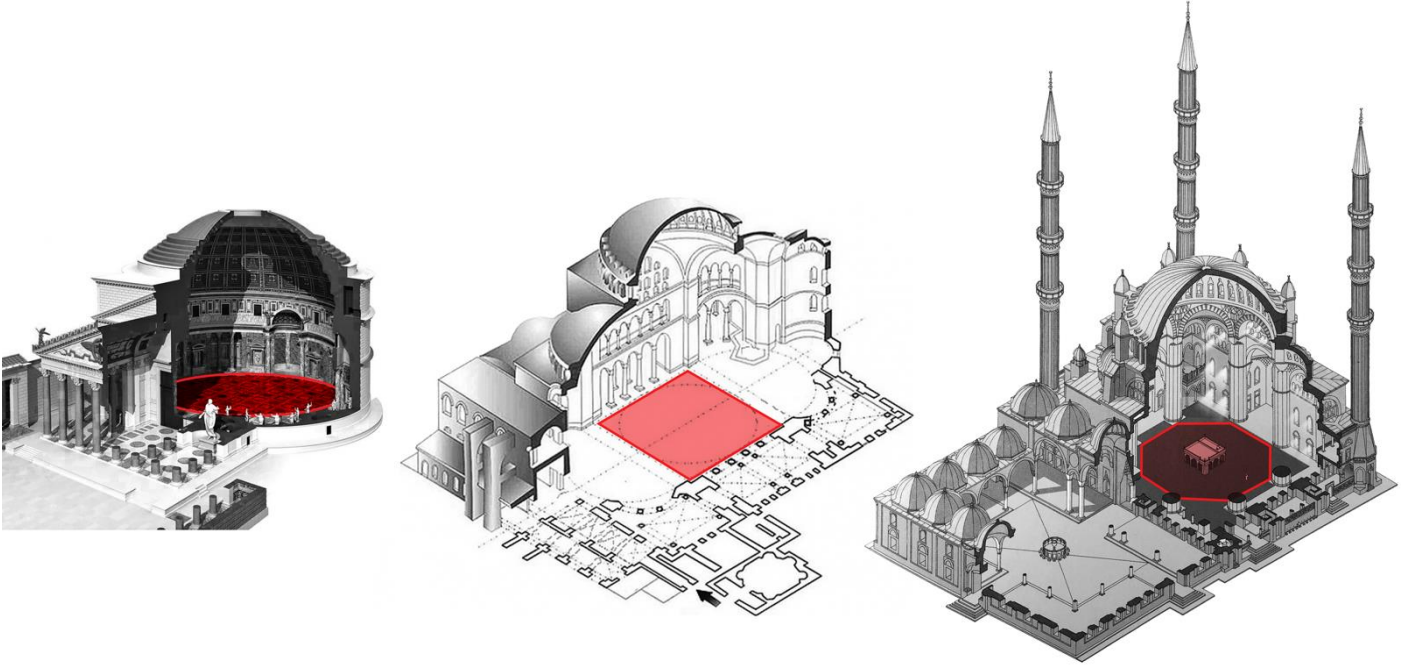
Kubbe, mimarlıkta kökenleri Mezopotamya Mimarisine dayanan, Roma Dönemi'nde etkin olarak geliştirilen ve günümüze kadar yaygın olarak kullanılan önemli bir yapı elemanıdır (Şimşek, 2010). Doğan Hasol (2008) kubbeyi, küre takkesi, yarım küre ya da toparlakça kümbet biçimi verilen yapı örtüsü; bir kemerin, yayının tepe noktasından inen dikin çevresinde dönmesiyle meydana gelen örtü olarak tanımlamıştır. Roth (2006) da kubbenin temelini bir kemere dayandığını belirtmiştir. Merkezi etrafında üç boyutta döndürülen bir kemer bir kubbe oluşturur. Bu yöntemle beşik kemer düşey eksen etrafında döndürülerek yarım küre şeklinde bir kubbe elde edilir ve bu en temel kubbe formudur.

Tarih boyunca kubbeler dairesel, kare veya çokgen planlı mekanları örtmekte kullanılmıştır (Hasol, 2008). Roma Dönemi'nde Pantheon gibi yapılarda büyük açıklıkların üzerini örten büyük kubbeler inşa edilerek son derece etkileyici mekânlar oluşturulmuştur. Ancak o günün mimari birikimi ve teknolojisiyle bu kubbeler dairesel planlar üzerine oturtulabilmiştir. Kubbenin altında yer alan dairesel plan ise geometrisinden kaynaklı olarak başka mekânların eklenmesini ve binanın iç mekân alanının artırılmasını olanaksız kılmamaktadır. Kubbe altındaki mekanların başka mekanlarla birleştirilmesi ihtiyacı özellikle MS 4.yy'da iyice belirgin hale gelmiştir.

Bu soruna Bizanslı mimarların bulduğu çözüm kubbeyi altta kare planın üzerine oturtmak olmuştur. Kare plan hem simetrik yapısı nedeniyle statik olarak kubbeye uyumludur hem de karenin düz kenarlarına başka mekanlar eklenebilir. Bunu yapabilmek için de kare planlı mekândan daire planlı kubbeye geçişi olanaklı kılan pandantif denilen eğri küresel üçgen bingiler geliştirmişlerdir. Pandantif kullanımının en eski ve önemli örneklerinden biri 532-537 tarihleri arasında Miletli İsidoros ve Trallesli Anthemios tarafından tasarlanan İstanbul'da yer alan Ayasofya'da görülür (Roth, 2006).

Özellikle Roma Dönemi Mimarisinde kubbeye örtülmüş merkezi plan şemasına sahip yapılara daha sık rastlanmaktadır. İmparatorluk Dönemi'nin başlangıcında ortaya çıkan hamam ve imparatorluk sarayı gibi yeni yapı tiplerinde uygulanan kubbeler, mekânın üzerini örtme amacının ötesinde anıtsal bir form olma özelliğini de desteklemek amacıyla kullanılmışlardır (Müller ve diğ., 2012). Anadolu'da benzer şekilde Selçuklu ve Osmanlı

Dönemlerinde kubbe mimarlıkta bir yapı elemanı olarak bir mekânın üzerini örtme işlevinin ötesinde, yapısal geometrisinin sonucu olarak ortaya çıkan küresel formu simgesel anlamlar taşıdığı için kullanılmıştır. Bu nedenle kubbe tarih boyunca pek çok önemli dini ve idari yapıda görülmektedir (**Şekil 3**).



Şekil 3: Daire, kare, çokgen plan üzerine oturan kubbeler. Sırası ile: Pantheon, Ayasofya (Bilgiç, t.y.) ve Selimiye Cami (Kuban, D. & Emden, C., 2007)

Farshid Moussavi (2009), kubbelerin biçim yönünden çeşitli değişkenleri olduğunu belirtmiştir:

Ölçek: Kubbenin geometrisi, kesitinin eğrilik aralığı ve planda daha küçük yarım kubbeler, yan kemerler veya pandantiflerle bir araya getirilmesiyle oluşturulabilen formda çeşitlilik gösterir.

Derinlik: Kubbe bölümünün eğrilik aralığı, sığdan dikine kadar, genel derinliğini değiştirebilir.

Profil: Kubbeler, plan düzleminde merkezden yayılan eş merkezli çemberler ve bunları dik kesen ışınlar ile alt parçalara ayrılabilir.

Etki: Bir kubbenin altında yer alan mekanların optik algısı, çevresel etkenler ve işlevsel ihtiyaçlara yönelik çözümlerle sınırlarının ötesine geçebilir. Örneğin, ana kubbeye eklenen yarım kubbeler ile simetrik algısının bozulması buna örnek olarak gösterilebilir.

Kubbe kendi başına bir kürenin parçası olması nedeniyle oldukça dayanıklı bir formdur. Bu form plan düzleminde bir çember ile başlamaktadır. Buna rağmen genellikle üzerini örttükleri mekanlar ise çokgen (genellikle kare) planlıdır. Bu da geometrik olarak mekânın üzerinin tam örtülememesi ve kubbenin yerleştirilememesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun çözümü ise çokgen planlı mekândan (kare, altıgen, sekizgen vb.) daire planlı kubbeye geçişi sağlayan ara geçiş elemanlarının geliştirilmesi ile mümkün olmuştur (**Şekil 3**). Uluengin ve diğ. (2001) Osmanlı Mimarisinde hangi geçiş elemanının hangi durumlarda kullanılacağına dair kesin bir kural olduğunu söyleyemeyeceğini bununla birlikte Türk üçgeni ve trompün daha çok Anadolu'da, pandantifin ise İstanbul ve Trakya'da kullanıldığını vurgulamışlardır.

Kare veya çokgen planlı bir mekândan dairesel planlı bir kubbeye geçişi sağlayan elemanlar dört grup altında değerlendirilebilir (**Şekil 4**):

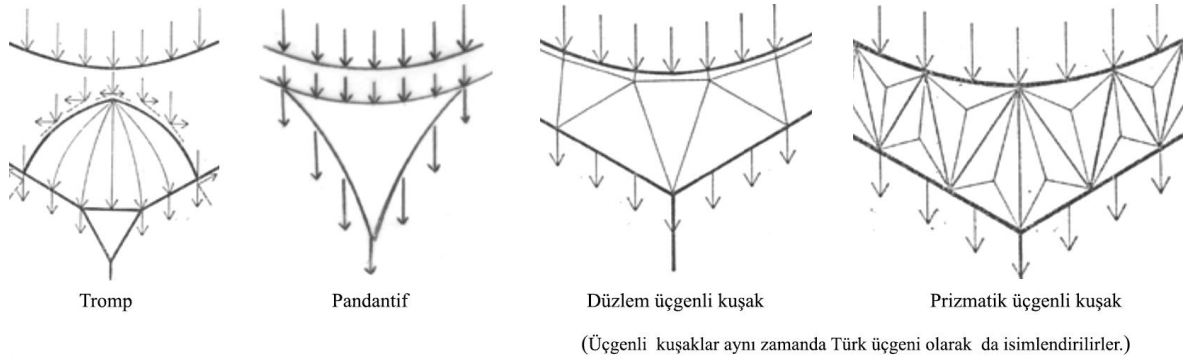
Pendantif (aslan göğsü, sarkan), bir kubbeyi taşıyan kemerler ile kubbe kaidesinin arasını kapatan ve kare bir plandan kubbenin dairesel kaidesine geçmeyi sağlayan küresel üçgendir. Bu küre parçası biçimindeki üçgenler, tabandaki çember, karenin dışından geçtiği durumlarda kubbeye bütünleşirler. Taban çemberi, karenin içinde ise, pandantifler bağımsız öğeler olarak görünürler (Hasol, 2008). Kuban (2002) kubbe çapının büyüdüğü zaman geçiş kuşaklarının da yüksekliğinin arttığını ve bununla birlikte mekân yüksekliğinin arttığını, bu durumun istenmediği durumlarda ise kubbe geçişinin pandantifle yapılmasının daha uygun olduğunu belirtmiştir.

Tromp, bir bina köşesine bindirmeli olarak örülen tonoz parçası; kare planlı kubbeli bir yapının duvarları arasındaki köşelerin üst bölümüne yapılan ve binanın üstünü sekiz kenarlı bir şekil haline koyarak kubbenin oturmasına elverişli bir kaide meydana getirmek üzere köşeleme örülen tonoz, tonoz bingi, köşe tonozudur (Hasol, 2008). Başka bir ifadeyle tromp temelinde bir yarım kubbeden oluşur. Üzeri örtülecek mekânın köşelerinde yer alarak örtülecek alanı plan düzleminde sekizgen hale getirir. Tromp tek başına kare mekânı örtmeye yeterli değildir, bunun için küçük pandantiflerle desteklenmesi gereklidir (Uluengin ve diğ., 2001).

Türk üçgeni (üçgenler kuşağı, yedi sekiz), kübik bir alt yapı ile dairesel bir üst yapı olan kubbenin birleşmesi için alt yapının üzerine kuşak şeklinde yerleştirilen üçgenlerin, bir ters, bir düz olarak yerleştirilerek bitiş seviyesinde dairesel plan oluşturan mimari elemandır (Şimşek, 2010). Türk üçgeni, Türk Mimarlığında duvarla kubbe arasında bir geçiş ögesi olarak kullanılmıştır. Bu üçgenlerden meydana gelen kuşak, kubbeye yumuşak bir geçiş sağlar. Türk üçgenlerinin en basit uygulamaları Uygur kubbelerinde görülse de olgunlaşması Selçuklular Dönemi'ne rastlar (Hasol, 2008). Üçgenler kuşağının ana yapı sistemi prizmatik üçgendir. Kuşak içinde prizmatik üçgenler dışında düzlem üçgenler de kullanılmıştır (Şimşek, 2010).

Türk üçgeni temelinde kubbe hattı boyunca ardışık olarak yerleştirilmiş ters ve düz üçgenlerden oluşur. Bu ters ve düz üçgenler Arapça'daki yedi ve sekiz sayıları arasındaki biçimsel benzerlikleri nedeniyle "yedi sekiz" olarak da adlandırılmaktadır ($7=V$, $8=\Lambda$). Türk üçgeninde geçiş yapılan elemanlar geometrik olarak küçüldükçe üçgenleri oluşturan kırıklıkları arası azaldığından genellikle tuğla gibi kırılarak şekillendirilmesi kolay malzemeler tercih edilmiştir. Taş malzemenin tercih edildiği durumda blok taş kullanılmıştır. Türk üçgenlerinin çok sade bulunduğu durumlarda onu süslemek için içlerine kabartma veya çökertme, ikincil üçgenler, üç kollu yıldızlar yapılmıştır (Uluengin ve diğ., 2001).

Diğer Geçiş Elemanları, olarak sınıflanabilecek karnak ve taşıma (basit taşıma, mukarnas taşıma, üçgen taşıma) kubbelerin alttaki mekanlarla ilişkisini sağlayan diğer sistemlerdir (Şimşek, 2010).



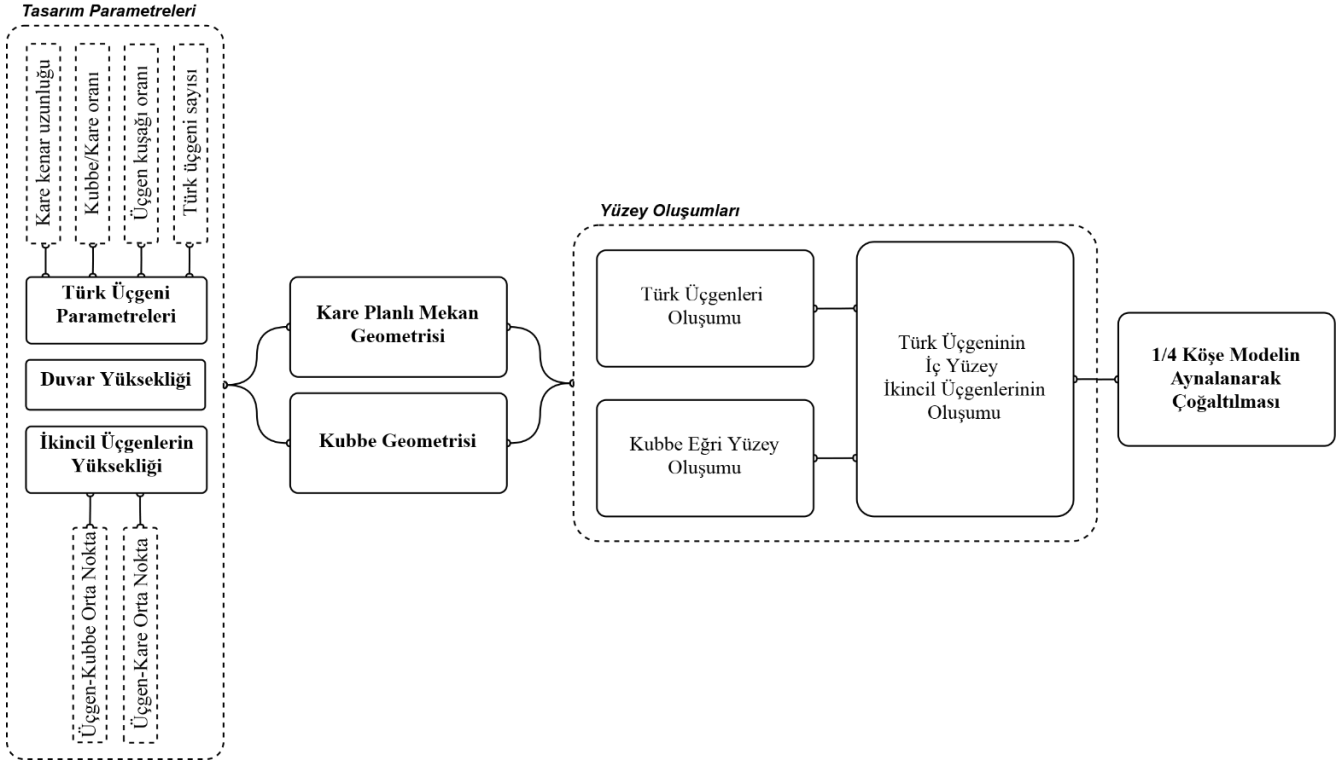
Şekil 4: Kubbe geçiş yapı elemanları diyagramları (Turan, Ş. N., & Yaldiz, E., 2018)

3. Çalışmalar

3.1. Türk Üçgenin Geometrik Yapısının Çözülmesi ve Parametrik Modelin Oluşturulması

İlk aşamada Grasshopper ortamında kare tabanlı bir mekân üzerine, kubbe örtüsü yerleştiren ve aradaki geçişi Türk üçgeni ile sağlayan bir parametrik model oluşturulmuştur. Model içerisinde kullanıcının istekleri doğrultusunda modeli hızlıca değiştirebileceği bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler üç grupta ele alınmıştır. Bunlardan

ilki, kare kenar uzunluğu, kubbe/kare oranı, üçgen kuşağı oranı, kuşak yüksekliği, üçgen sayısı alt parametrelerinden oluşan Türk üçgeni parametreleridir. İkincisi, duvar yüksekliği parametresidir. Üçüncüsü ise üçgen-kubbe orta noktası ve üçgen-kare orta noktası alt parametrelerinden oluşan ikincil üçgenlerin parametreleridir (Şekil 5).



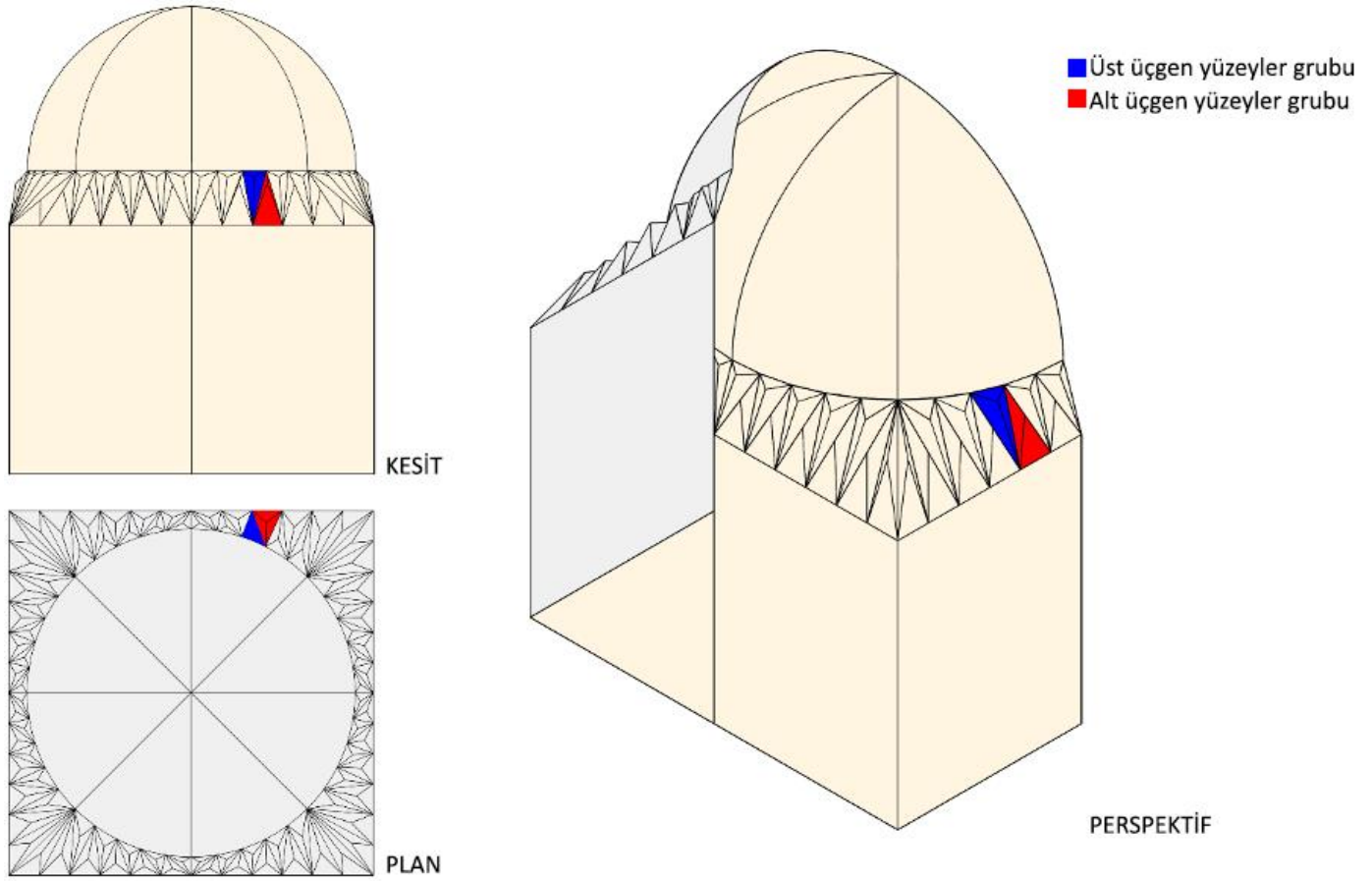
Şekil 5: Türk üçgeni oluşturan Grasshopper örüntü diyagramı

Parametrik modelin oluşturulması için öncelikle Türk üçgeni ile inşa edilmiş binalar literatür üzerinden incelenmiş ve bu binalardaki geometrik ilişkiler araştırılmıştır. Türk üçgeni temel olarak kubbe altındaki çember ile kare mekânın üst tarafında yer alan kenarları birbirine bağlar. Bu geçiş sistemi kubbe ve kare mekân arasında bir kuşak oluşturur ve bu kuşağın yüksekliği kubbe boyunca değişmez. Ayrıca bu kuşağın yüksekliği derinliğinden genellikle fazladır. Bu da statik olarak kuşağı daha güçlü kılar. Türk üçgeni içerisinde birbirini bir düz bir ters olarak takip eden üçgenler yer alır (Şekil 6). Bu üçgenler kare planın köşe noktalarında en uzun ve en yatık açıda, orta noktalarında ise en kısa ve en dik açıdadır.

Parametrik model önce kubbe, Türk üçgeni ve duvarı içeren 1/8 dilimlik bir kesit tanımlar. Ardından model bu kesitin simetrisini birkaç kez alarak tüm modeli tamamlar. Bu üçgenlerin oluşumu için çember parçası n sayıda eş dilime bölünürken, kare kenarı parçası $n+1$ sayıda eş dilime bölünür. Ardından bu bölünen noktalar arasına üçgenleri oluşturacak çizgiler ve ardından da yüzeyler oluşur.

Türk üçgenlerinin içerisinde yer alan ikincil üçgenler modelde ikinci aşamada oluşturulmaktadır. Bunlar birincil üçgenler içerisinde otomatik olarak tanımlanan bir noktanın, üçgenin köşe noktalarına bağlanmasıyla elde edilir. Bu noktaların yüksekliği yüzeye derinlik katmak amacıyla z ekseninde parametrik olarak hareket ettirilebilir. Geliştirilen parametrik model tam bir kubbe, Türk üçgeni kuşağı ve duvarları oluşturmaktadır.

Örnek çalışma kapsamında Bursa Hacılar Camisi'nin Grasshopper ortamında parametreleri kare plan kenar uzunluğunu 447 cm (894 cm/2), kubbe çapının kare plana oranının 0.96, Türk üçgenler kuşağının yüksekliği 180 cm, üçgen sayısı 5 adet (çember yayında 5, kare kenar diliminde 6 parça); duvar yüksekliği 608 cm olarak girilerek sayısal model oluşturulmuştur (Şekil 6).



Şekil 6: Grasshopper modeli ile üretilen Bursa Hacılar Cami Elemanları

3.2. CAM Takım Yollarının Hazırlanması ve Robot Simülasyon Yazılımında G-Code Üretilmesi

İkinci aşama, sayısal ortamda parametrik olarak elde edilen 1/10 ölçekli Türk üçgeni köşe kesit modelinin, robot kol kullanılarak üretilmesi için gerekli takım yollarının hazırlanmasını kapsamaktadır. Üretilcek fiziksel modelin iç mekanının görülebilir olması amacıyla modelin plan düzleminde ¼ kesiti alınmıştır. Bursa Hacılar Cami için üretilen fiziksel modelin ölçeği 1/10 olarak belirlenmiştir. Bu aşamada MasterCAM ve Octopuz yazılımları kullanılmıştır. MasterCAM yazılımı takım yollarının çıkarılması sağlamaktadır. Bu yazılım 2, 3 ve 5 eksenli takım yolu üretmeye izin vermektedir.

Tablo 1: MasterCAM takım yolu ayarları

Üretim Çalışması	MasterCAM Takım Yolu	İlerleme Hızı (Feed Rate)	Dalma Oranı (Plunge Rate)	Geri Çekme Oranı (Retract Rate)	Uç Dönüş Hızı (rpm)	Uç Çapı (mm)	Uç Kesim Boyu (mm)	Uç Kanal Sayısı
1	Multisurface Pocket	20	80	100	12000	8	120	2
	Swarf	20	30	100	12000	8	120	2
2	Facing	20	80	100	12000	8	120	2
	Surface High Speed (Equal Scallop)	30	100	100	12000	8	120	2
	Contour (2D)	10	60	100	12000	8	120	2

Fiziksel modelde Türk üçgeninin yüksekliği 18 cm olmaktadır. Bu geçiş elemanının 4 cm (1 plaka) ve 8 cm (2 plaka) kalınlığındaki EPS plakalardan üretileceği düşünüldükçe sayısal model yatay düzlemde 3 dilime bölünmüştür.

Türk üçgeninin üretimi için 2 deneme gerçekleştirilmiştir. İlk üretim çalışmasında “multi-surface pocket” ve “swarf” takım yolları kullanılmıştır. İkinci üretim çalışmasında ise “facing”, “surface high speed (equal scallop)” ve “contour (2D)” takım yolları tanımlanmıştır. MasterCAM yazılımında modelin işlenebilmesi için belirlenen ve denenilen takım yollarına ilişkin bilgiler **Tablo 1**'de yer almaktadır.

MasterCAM yazılımında elde edilen takım yolu Octopuz yazılımına aktararak robot kolun çalışabilmesi için gerekli hareket tanımlamaları, hız değerleri girilmiş ve çarpışma kontrolü simülasyonu yapılmıştır. Ardından bu yazılımda robot kolun kullanacağı üretim aşamalarını içeren G-Code üretilerek robot kol kontrol ünitesine aktarılmıştır.

3.3. Fiziksel Üretimin Robot Kol ile Gerçekleştirilmesi

Üçüncü aşamada kubbe, Türk üçgeni ve duvar kesitinin ölçekli olarak üretimi robot kol kullanılarak frezeleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçekli modelin üretim için işlemesi kolay, yeterli detay kalitesini gösterebilen, görece ucuz EPS (Expanded Polystyren Foam) plaka malzemenin kullanılması planlanmıştır. Çalışma için kullanılan EPS plaka 50x100x4 cm boyutlarında, 30-32kg/m³ yoğunlukta, beyaz ve ince dokulu yapıdadır.

Robot kol flanşına (bağlantı aynası) entegre edilmiş spindle motor (end effector) ile frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

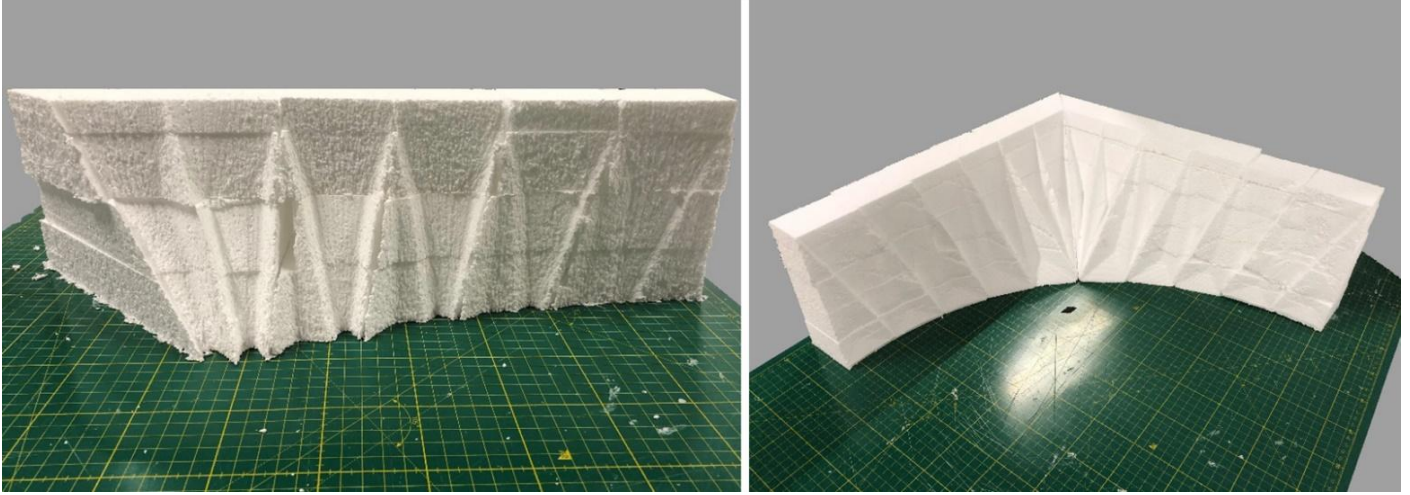


Şekil 7: Robot kola entegre edilmiş spindle motor ile gerçekleştirilen frezeleme işlemleri

Çalışma sırasında plaka yerine blok türünde bir malzemenin bütün olarak ele alınarak işlenmesi denenmiştir. Fakat Octopuz yazılımında, kesici ucu uzunluğunun yetersiz kalması dolayısıyla, 5 eksenli kesim hareketlerinde ucu tutan takım tutucunun (pens) ve robot kol flanşının stok malzemeye çarpacak kadar eğilmesi durumu görülmüştür. Bu nedenle bu yöntemden vazgeçilmiştir. Bu nedenle çalışma sırasında mevcut bulunan en uzun strafor ucu (toplam boy: 20 cm, kesim boyu: 12 cm, çap: 8 mm) ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Üretim için tek bir plaka (4 cm) ve iki plakanın üst üste yapıştırılmasıyla (8 cm) çalışma gerçekleştirilmiştir (**Şekil 7**).

İlk fiziksel üretim denemesinde özellikle 5 eksenli çalışan “swarf” takım yolunda kesici ucu tutan takım yolunun stok malzemeye çarpması/ sıyırması durumu yaşanmıştır. “Swarf” takım yolunda kesim işlemi bıçağın ucuyla değil yan yüzeyi ile gerçekleşmektedir. Kullanılan ucun yan kesim işlemindeki sonucu istenilen düzeyde yüzey kalitesi verememiştir. Üretim sırasında zaman zaman stok malzemede parçalanmalar da yaşanmıştır. Kaliteyi arttırmak için

hızın oldukça düşürülmesi bir çözüm olmasına karşın, üretim süresinin optimizasyonu göz önünde bulundurulduğundan çalışmanın devamında bu teknik tercih edilmemiştir (**Şekil 8**).



Şekil 8: Üretim çalışması 1 (Sol) ve üretim çalışması 2 (Sağ)

İkinci fiziksel üretim denemesinde belirlenen takım yolları 3 eksenle çalışmaktadır. Bu durum, pensin stok malzemeye çarpmasını önlemektedir. Bu takım yolları ile gerçekleştirilen üretimde, yalnızca kesici ucun uç kısmının kullanılması Türk üçgeninin yüzeylerinde kaliteyi “swarf” denemeye göre belirgin şekilde arttırmıştır. 3 eksenli kesimin zayıf yönü ise kare planın orta noktalarındaki dik açılı Türk üçgeni yüzeylerinde yeterli hassasiyeti elde edememesi olmuştur (**Şekil 8**). EPS plakadan üretilen parçalar strafor yapıştırıcı ile yapıştırılarak üretim tamamlanmıştır (**Şekil 9**).



Şekil 9: 1/10 ölçekli EPS malzemeden üretilmiş Bursa Hacılar Cami köşe modeli

4. Sonuç ve Değerlendirme

Çalışma kapsamında geliştirilen model, geleneksel bir yapı elemanı olan Türk üçgeninin günümüz olanakları ve bakış açısıyla yeniden değerlendirilmesini sağlamıştır. Özünde daire planlı bir kubbenin kare planlı bir mekân üzerine yerleştirilme problemine bir çözüm olarak geliştirilmiş Türk üçgeni, rasyonel bir geometrik mantık içermektedir.

Bu da sistemin çözümlenerek, sayısal ortamda parametrik olarak modellenbilmesini sağlamıştır. Böylelikle geliştirilen parametrik model, Türk üçgeninin içerisinde barındırdığı mantığı strüktürel açıklık, kuşak yüksekliği, ikincil üçgenlerin derinliği gibi çeşitli parametrelere göre hızlıca yeniden kurabilmeyi sağlamıştır. Parametrik tasarım araçları yardımı ile üretilen sayısal modeller, benzer üçgenler kuşağı bulunduran binaların da dijital modellerinin hızlıca üretilmesine olanak sağlayacaktır.

Geliştirilen parametrik model; kubbe, Türk üçgeni ve taşıyıcı duvarı bir arada oluşturmaktadır. Kubbe ve taşıyıcı duvarda yer alabilecek fener, pencere, kapı, geçit gibi açıklıklar bu çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında model geliştirilerek kubbe ve Türk üçgeni içerisinde pencere açıklıklarının otomatik olarak üretilmesi planlanmaktadır.

1/10 ölçekli model üretimi çalışması kapsamında kullanılan EPS plakalar 30-32kg/m³ yoğunluktadır. Bulunabilen en yüksek yoğunluktaki levhaların bunlar olması nedeniyle çalışma kapsamında tercih edilmişlerdir. Bu çalışma için yeterli detay kalitesine ulaşıldığı düşünülse de daha yüksek hassasiyetteki üretimler için daha yüksek yoğunluklu malzeme tercih edilebilir. Malzemenin homojen beyaz renkte olması, model üzerindeki geometriye dikkat çekmesi ve ışık gölge etkilerinin değerlendirilebilmesi için olumlu bulunmuştur.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında 1/1 ölçekli üretim denemeleri yapılması planlanmaktadır. Bu kapsamda mevcut yapılarıdaki biçimi ve boyutlarına sadık kalınarak tuğla ve taş ile sayısal fabrikasyon üretim denemeleri yapılması düşünülmektedir. Bunun için kubbe, Türk üçgeni ve duvarları bütün olarak çıkartan modelin geliştirilerek yapı bileşeni ölçeğinde de modeller üretecek hala gelmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma ile mimarlıkta gelişen sayısal teknolojilerden faydalanmanın, geleneksel yöntemlerle uzun zaman alacak tasarımların hızlıca modellenmesine aynı zamanda karmaşık geometrilerin çözümlenmesine ve fiziksel olarak yüksek hassasiyette üretilmesine olanak sağladığını göstermiştir.

Teşekkür

Üretim sürecine olan katkılarından dolayı Anıl Emir ve Lütfullah Emre Taşan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bilgiç, D. E. (t.y.). *Mimar Sinan Camilerindeki strüktürel ve mekânsal yorumların mimarlık tarihindeki yeri*, Yapı Dergisi, erişim tarihi 07 Haziran 2021, <https://yapidergisi.com/mimar-sinan-camilerindeki-strukturel-ve-mekansal-yorumlari-mimarlik-tarihindeki-yeri/>
- Cavaç, U. (19 Ekim 2011). *Bursa Hacılar Camii*, Wowturkey, erişim tarihi 12 Haziran 2021, http://wowturkey.com/t.php?p=/tr485/ugurcavac_hacilarcamii.jpg
- Hasol, D. (Ed.) (2008). *Ansiklopedik mimarlık sözlüğü*. YEM Yayınevi.
- Kuban, D. (2002). *Selçuklu çağında Anadolu sanatı*: Yapı Kredi Yayınları-Promat AŞ.
- Moussavi, F. (2009). *The function of form*. New York: Actar.
- Müller, W., Vogel, G., Szasz-Jacobi, I., & Szasz, I. (2012). *Mimarlık Atlası* (D. Tuna, Trans.). İstanbul: Yem Yayın.
- Roth, L. M. (2006). *Mimarlığın öyküsü: Öğeleri, tarihi ve anlamı* (E. Akça, Trans. 3 ed.). İstanbul: Kabalcı Yayınevi.
- Şimşek, H. (2010). *Erken Osmanlı mimarisinde kubbeye geçiş sistemlerinden üçgenler kuşağı*. (Tez Künye Numarası 313918) [Yüksek Lisans Tezi], Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
- Uluengin, F., Uluengin, B., & Uluengin, M. B. (2001). *Osmanlı anıt mimarisinde klasik yapı detayları*: Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları.