



Çift tabakalı çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin yapısal performansının incelenmesi

Evaluation of structural performance of double layer steel space lattice dome systems

Mehmet Ali Bektaş^{1*}, Mehmet Sedat Hayalioğlu²

¹ Çetinkayalar Yapı Elemanları A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Diyarbakır bektas1026@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9688-4491>

² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hosedat@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-235X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Eylül 2023
Revizyon 23 Ekim 2023
Kabul 7 Mart 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

*Uzay kafes
Çelik kubbe
Yapısal analiz
Yapısal tasarım*

ÖZ

Bu makalede, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada; Eurocode-1 yönetmeliği ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 esas alınarak yapıya etki eden yüklerin hesaplamaları ayrıca AISC 360-10 yönetmeliğine göre boyutlandırılmaları gerçekleştirilmiştir. AISC 360-10, Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliği ile büyük oranda aynıdır ve YDKT (Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım) de LRFD (Load and Resistance Factor Design) ile benzerlik gösterir. Elde edilen sonuçlar, kubbe sisteminin çember kirişlerinin etek bölümlerinde en yüksek çekme gerilmesine, tepe bölümlerinde ise en yüksek basınç gerilmesine sahip olduğunu göstermekte iken radyal kirişlerde ise en yüksek basınç gerilmesi etek bölümünde oluşmaktadır. Çift katmanlı kubbe sistemlerinde ayrıca, asimetrik yük altında kubbe sistemindeki tüm çubukların farklı çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalabileceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, tasarım aşamasında çubuklar hem çekme hem de basınç gerilmelerine göre uygun şekilde boyutlandırılmalıdır. Çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin analizi ve tasarımıyla ilgilenen mühendisler için bu çalışma önemli bir rehber niteliğindedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 September 2023
Received in revised form 23 October 2023
Accepted 7 March 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

*Space truss
Steel dome
Structural analysis
Structural design*

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the analysis and design of a double-layer steel space lattice dome system. In the study; Based on the Eurocode-1 regulation and the Turkish Building Earthquake Code 2018, the calculations of the loads acting on the structure were also carried out according to the AISC 360-10 regulation. AISC 360-10 is largely the same as Turkish Steel Structures Design Regulation and YDKT (Yüksek ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım) is also similar to LRFD (Load and Resistance Factor Design). The results obtained show that the dome system has the highest tensile stress in the skirt parts of the circle beams and the highest compressive stress in the top parts, while the highest compressive stress in the radial beams occurs at the skirt part. Double-layer dome systems It has also been determined that all bars in the dome system can be subjected to different tensile and compressive stresses under asymmetrical load. Therefore, at the design stage, the bars must be sized appropriately for both tensile and compressive stresses. This study is an important guide for engineers interested in the analysis and design of double-layer steel space lattice dome systems.

Doi: 10.24012/dumf.1359519

* Sorumlu Yazar

Giriş

Mimari tasarımlarda, geniş açıklıklı ve yapısal elemanları azaltılmış tasarımlar tercih edilmektedir. Bu nedenle, mimarlar ve mühendisler sürekli olarak geniş açıklık ve az elemanlı yapı sistemlerinin tasarımı üzerinde çalışmaktadırlar. Bu tasarım hedefleri doğrultusunda, uzay kafes sistemleri önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Uzay kafes sistemleri, geniş açıklıklı ve hafif olmaları sebebiyle birçok yapıda kullanılmaktadır. Örneğin, alışveriş merkezleri, tiyatrolar, stadyumlar, spor salonları, toplantı salonları ve sanayi yapıları gibi yapılarda geniş açıklıklı sistemlere sıklıkla rastlanmaktadır.

Tarihsel olarak, kubbe sistemleri mimarlar ve mühendisler tarafından çelik elemanlar kullanılmadan önce farklı yöntemlerle tercih edilmiştir. İlk kubbe sistemleri taş, tuğla ve ahşap gibi malzemelerden yapılmış ve daha dar açıklıklı olarak inşa edilmiştir. Örneğin, MS 120 İmparator Hadrian tarafından Roma'da yapılan Pantheon Tapınağı, tarihteki önemli kubbe yapılarından biridir. Bu tapınağın kubbesi daire plan üzerine oturtulmuştur. Daha sonra, nitelikli harçlar ve farklı malzemelerin kullanımıyla birlikte daha geniş açıklıklı kubbeler tasarlanmıştır.

Kubbe sistemlerinin gelişimi, malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle paralel bir şekilde ilerlemiştir. Betonarme kubbeler zamanında daha geniş açıklıklı olmalarına rağmen, yapım süresi ve yapı ağırlığını arttırması gibi nedenlerle çelik endüstrisinin gelişmesiyle çelik kubbeler tercih edilmeye başlanmıştır. Çelik kubbeler, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve imalat kolaylıkları sayesinde mühendisler için daha cazip hale gelmiştir. Uzay kafes sistemleri ise farklı biçim ve oluşum sistemlerine sahiptir. Bunlardan biri kubbe formundaki uzay kafes sistemleridir. Kubbe formundaki uzay kafes sistemleri, döneleli yüzey üzerinde bulunan eliptik yay veya çift eğrilikli çubuk sistemlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, iki katmanlı bir çelik ağ örgüsünden oluşur ve bu özgün yapı, yüksek dayanıklılığı ve görsel estetiği bir araya getirir. Kubbe geometrisi, yapıya yüksek bir taşıma kapasitesi sağlarken, iç mekânlarda geniş ve kolonsuz bir kullanım alanı sunar. Çalışmada SAP2000 programı kullanılarak, öncelikle kabul edilen konum özellikleri ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak, Eurocode yönetmeliği doğrultusunda Sabit yük, kar yükü [1] ve rüzgâr yükü [2] hesaplamaları yapılmış ve programa tanımlanmıştır. Bu hesaplamalar, yapıya etki eden dış yüklerin belirlenmesini sağlamıştır. Daha sonra, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e [3] göre deprem yükü etkisi dikkate alınmıştır. Deprem yükü hesaplamaları, yapıya deprem hareketlerinden kaynaklanan etkilerin değerlendirilmesini sağlamış ve yapıya dayanıklılık sağlayacak tasarım önlemleri alınmıştır. Ardından, Türk çelik yapılar tasarım yönetmeliğine [4] büyük oranda benzeyen AISC 360-10 [5] yönetmeliği kullanılarak, kubbe elemanları boyutlandırılmıştır. Bu adım, yapısal elemanların uygun

boyutlara sahip olmasını ve taşıma kapasitesini karşılamaını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Son olarak, elde edilen kubbe modelinin yük dağılımı ve kritik yük oluşun bölgeleri incelenmiştir. Bu analizler, kubbe geometrisinden kaynaklanan önemli bilgileri ortaya çıkarmış ve yapısal tasarımın geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Bu çalışma, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analiz ve tasarım sürecini ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Sonuçlar, benzer yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgilenen mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir kaynak oluşturmaktadır. Ayrıca, çelik yapıların kullanıldığı farklı uygulama alanlarında daha güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmek için bu çalışmanın sağladığı yöntemler ve sonuçlar önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. Bu çalışma, çelik kubbelerin analizi konusunda gelecekte yapılacak araştırmalara katkı sağlamak ve bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

Çelik kubbelerin analizi konusunda yapılan önemli çalışmalardan bazıları şunlardır: Timoshenko ve Woinowsky-Kriger [6] "Plak ve Kabukların Teorisi" kitabında kubbe sistemleri üzerinde gerilmelerin dağılımı ve deplasman tespiti için hesap yöntemlerini ortaya koymuştur. Timoshenko [7] "Elastik Burkulma Teorisi" kitabında kabuk elemanlarda oluşan burkulma sorununa çeşitli çözümler sunmuş ve kabuk elemanların maksimum yük noktasından önce de burkulma olabileceğini göstermiştir. Papadopoulos ve LoRico [8] Bükreş Ulusal Ekonomi Köşkü'nün çelik kubbesinin burkulma ve ters dönme sorunlarını incelemiş ve düzensiz dağılmış kar yükünün bölgesel burkulmaya yol açtığını ortaya koymuştur. Soykan [9] çember, elips ve parabol eğrilik form tiplerine sahip kubbelerin stabilitesi, deplasmanları ve birim alan ağırlığını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çiftçi [10] uzay kubbe sistemlerindeki geometrik deformasyon ve doğrusalsızlığın stabilite üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Karabulut [11] geniş açıklıklı uzay kafes çatı sistemlerinin boyutlandırılmasını ve tasarım esaslarını incelemiştir. Kara [12] farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı kubbelerin performansını ve maliyet analizlerini karşılaştırmıştır. Özcan [13] nervürlü ve schwedler tipi kubbelerin asimetric yüklerden kaynaklanan stabilitesini incelemiş ve schwedler tipi kubbenin daha rijit davrandığını belirlemiştir. Yılmaz [14] tek katmanlı kubbe sistemlerinin stabilitesini kiriş berkitmeleri kullanarak analiz etmiş ve yapı ağırlığında ciddi düşüşler elde edilebileceğini göstermiştir. Adnanoğlu [15] ribbed ve schwedler kubbe sistemlerine dayanan ekonomik ve dayanıklı kubbe tasarımları için parametrik bir çalışma yapmıştır. Wang ve Jiang [16] farklı tasarım stillerine sahip küresel yapıların rüzgâr yüklerini sistematik olarak incelemiş ve tasarım önerileri sunmuştur. Bektaş [17] çalışmasında, farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı ve çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemleri oluşturmuş daha sonra bu sistemleri AISC-360-10 yönetmeliğine göre tasarladıktan sonra Türk çelik yapılar tasarım yönetmeliğine göre kontrol etmiştir. Elde ettiği sonuçların aynı ya da yakın olduğunu göstermiştir.

Yapılan literatür araştırmasında, kubbe sistemlerinin yapısal performansını inceleyen çalışmaların yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışma çift katmanlı çelik uzay kubbe sisteminin yapısal performansını detaylı bir şekilde inceleyerek, bu kubbe sistemlerinin tasarımından kaynaklanan performanslarını araştırmayı amaçlamaktadır.

Materyal ve Metot

Kubbe Formundaki Uzay Kafes Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kubbe formundaki uzay kafes sistemleri, çift eğrilikli yüzeye sahip tek tabakalı ya da çok tabakalı olarak tasarlanabilen taşıyıcı eleman ve düğüm noktalarından oluşan ve aldığı yükü tüm çubuklara dağıtan taşıyıcı sistemlerdir. Bu formdaki uzay kafesleri, ana tasarım tiplerine göre ayrılabilir. Başlıca kubbe formundaki uzay kafes sistemleri şunlardır:

1. Radyal nervürlü kubbe sistemleri: Radyal nervürlü kubbe sistemleri, kubbe merkezinin dikey eksen etrafında radyal olarak dönen kemerlerden oluşan bir tasarımı kullanır. Bu kemerler, çubuk elemanlarının birleştiği düğüm noktalarında kesişir. Radyal nervürlü kubbeler genellikle küçük açıklıklı alanları örtmek için tercih edilir. Montaj kolaylığı sağlar ve maliyet açısından avantajlıdır. Ancak geniş açıklıklar için daha büyük kesit gerekliliği nedeniyle yüksek maliyet ve daha zor montaj gerektirebilir.
2. Schwedler kubbe sistemleri: Schwedler kubbe sistemleri, 19. yüzyılda Alman inşaat mühendisi Johann Wilhelm Schwedler tarafından geliştirilmiştir. Bu kubbe türü, simetrik olmayan yükleri güvenle alabilmesi için diyagonal nervürler kullanarak tasarlanır. Schwedler kubbeler, büyük açıklıklara sahip yapılar için ideal bir çözüm sunar. Radyal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kirişlerinin birleşim bölgelerindeki yamuk alanlar da diyagonal elemanlarla bölünmüştür. Bu yapı, yük transferini destekler ve döngüsel simetride olan nervür kirişlerini birleştiren eş merkezli halkaları daha güvenli hale getirir.
3. Lamella kubbe sistemleri: Lamella kubbe sistemleri, Alman mimar F. Zollinger tarafından 1906 yılında geliştirilmiştir. Bu sistemde, kubbenin çubuk elemanları eşkenar dörtgenlere benzeyen lamella levhaların birleşimiyle oluşturulur. Lamella levhaları, kubbenin yüzeyinde bulunur ve kubbenin stabilitesini artırır. Alt kısımda çekme çemberi ve üst kısımda basınç çemberi bulunur ve gerilmelerin dağıtılmasını sağlar. Lamella kubbeler, yüksek rüzgar yüklerine karşı dayanıklıdır ve geniş açıklıklı yapılar için tercih edilir.
4. Jeodezik kubbe sistemleri: Jeodezik kubbe sistemleri, giriş ve düzlemlerin geometrik şekillerle oluşturduğu bir sistemdir. Bu sistemde kemer sistemi yerine jeodezik yapılar kullanılır. Jeodezik kubbeler, küresel kubbe şeklinde olabilir ve yükü kendi içinde dağıtarak taşıma işlevini gerçekleştirir. Kubbe alt halkası farklı bir taşıyıcı eleman üzerine veya doğrudan zemin üzerine yerleştirilebilir.

Jeodezik kubbeler, geniş açıklıklara kadar montajı yapılabilmesi nedeniyle kullanım alanı geniştir.

5. Üç doğrultuda ızgara kubbe sistemleri: Üç doğrultuda ızgara kubbe sistemleri, çubuk elemanlarının eşit geometrilerden oluştuğu bir tasarıma sahiptir. Bu sistemde, kubbenin çubuk elemanları ana kirişlerle birbirine bağlanır ve ikincil çubuk elemanlarıyla desteklenir. Bu şekilde yükler üniform bir şekilde dağıtılır. Üç doğrultuda ızgara kubbeler, farklı geometrik formlarda tasarlanabilir ve ağırlık ve alan dağılımı açısından verimlidir. Büyük açıklıklı yapılarda kullanımı yaygındır.

Kubbe Formundaki Uzay Kafes Bileşenleri

Uzay kafes sistemleri, birçok bileşenden oluşur. Bu bileşenler, sistemin bir arada tutulmasını sağlar ve bir bütün olarak çalışmasını mümkün kılar. Bu uzay kafes sistemlerinin bileşenlerinin detayları:

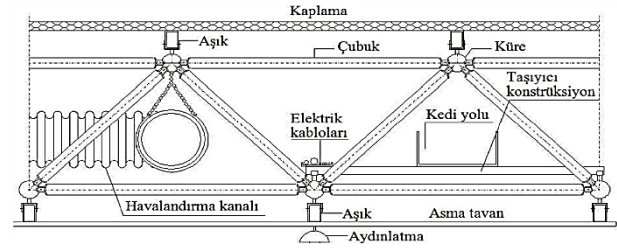
1. Çubuklar: Uzay kafes sistemlerindeki temel taşıyıcı elemanlardır. Bu sistemlerde, çubuklar yükleri aksel (axial) ve moment (bükme momenti) olarak taşıy ve aynı zamanda iki düğüm noktasını birbirine bağlar. Çubukların malzemesi ve kesit şekli, taşıması gereken yükler, uzunluk, dayanıklılık ve diğer performans kriterleri göz önünde bulundurularak seçilir. Çubukların farklı malzemelerden yapılması, farklı mühendislik gereksinimlerine cevap verebilme yeteneğini artırır. Yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında çelik, betonarme, alüminyum ve ahşap bulunur. Her bir malzemenin kendine özgü özellikleri ve avantajları vardır. Çubukların kesit şekli de önemlidir çünkü kesit şekli, çubuğun taşıyabileceği yükleri, bükme momentini ve diğer mekanik özellikleri etkiler. Genellikle dairesel kesitli çubuklar tercih edilir çünkü bu kesit şekli, eşit yük dağılımı sağlar ve çubuğun aksel yükleri daha etkili bir şekilde taşımasını sağlar. Ancak, farklı tasarım gereksinimleri doğrultusunda T, I, L, U ve kare gibi farklı kesit şekilleri de kullanılabilir. T şeklindeki kesitler, büyük momentlerin taşınması gereken durumlarda tercih edilebilir. I kesitler, yüksek dayanıklılık ve taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. L ve U kesitler, çeşitli yapısal düzenlemeler için esneklik sağlar. Kare kesitler ise basit tasarımlar için tercih edilebilir ve eşit yük dağılımı sağlar. Çubukların malzemesi ve kesit şekli, yapısal mühendislik tasarımında önemli bir rol oynar ve uygun seçimler, yapısal dayanıklılığı artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve tasarım esnekliğini artırabilir. Bu nedenle, çubukların malzemesi ve kesit şekli, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve koşullarına göre dikkatlice seçilmelidir.
2. Düğüm noktaları: Uzay kafes sistemlerindeki çubuk elemanlarını birleştiren ve sistemin stabil bir yapı oluşturmasını sağlayan önemli parçalardır. Bu noktalar, çubukları doğru konumda tutarak sistemdeki yüklerin etkili bir şekilde dağılmasını sağlar. Düğüm noktaları, çubuk tipine, boyutuna ve üzerlerine gelecek yük miktarına göre farklı şekil ve ölçülerde imal edilebilir. Her bir düğüm noktası,

taşınması gereken yükleri karşılayabilecek kadar dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, çubukların birleştirilmesi sırasında oluşabilecek hareketleri sınırlayarak sistemde istenmeyen deformasyonların meydana gelmesini engeller. Düğüm noktalarının tasarımı, mühendislik hesaplamaları ve deneyim gerektirir. Çünkü her bir düğüm noktasının, üzerindeki yükleri güvenle taşıyabilmesi için doğru boyutlara, malzemelere ve geometriye sahip olması gerekir. Ayrıca, düğüm noktalarının montajı ve bağlantıları da yapısal bütünlüğü sağlamak için titizlikle yapılmalıdır.

3. Mesnetler: Uzak kafes sistemlerinde önemli bir rol oynayan yapısal elemanlardır. Bunlar, ana taşıyıcı elemanlarla bağlantı kurarak sistemin yüklerini taşıyan ve güvenli bir şekilde aktaran bileşenlerdir. Uzak kafes sistemlerinde mesnetler, sistemin dayanıklılığını ve stabilitesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Mesnetler, genellikle doğrudan zemine veya diğer taşıyıcı elemanlara bağlanarak farklı yapısal konfigürasyonlar sağlayabilir. Mesnetlerin yerleştirilmesi ve bağlantı noktalarının belirlenmesi, yapısal mühendislik hesaplamaları ve detaylı tasarım gerektirir. Bu süreçte, mesnetlerin üzerine binen yükler, mesnetlerin taşıma kapasitesi, bağlantıların sağlamlığı ve mesnetlerin yerleştirilme konumları gibi faktörler dikkate alınmalıdır.
4. Temeller: Sistemin zemine oturan bölümüdür ve sistemdeki tüm yükü mesnet aracılığıyla zemine aktarır. Temel boyutu, kafes sisteminin tipine ve aldığı yüke göre farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilir. Sistem doğrudan zemin üzerine oturacaksa, mesnetler zemin üzerine ankraj edilerek bağlanır.
5. Örtü gereçleri: Sistemi üstten kaplayan ve koruyan elemanlardır. Bu gereçler, çeşitli malzemelerden yapılmış olabilir ve farklı şekil ve özelliklere sahip olabilirler. Örtü gereçleri, yapıyı hava koşullarından korurken aynı zamanda estetik bir görünüm sağlar. Hafif olmaları genellikle tercih edilir çünkü bu, yapıya ek yük getirmez. Ayrıca, hava koşullarına dayanıklı olmaları, uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı için önemlidir. Örtü gereçleri ayrıca, ısı ve ses yalıtımı sağlamak için uygun özelliklere sahip olabilirler. Bu sayede iç mekân konforu artırılır ve yapı daha kullanışlı hale gelir.
6. Yardımcı elemanlar: Uzak sistemleri, tasarım ve kullanım ihtiyaçlarına göre çeşitli ek elemanların kullanılmasını gerektirebilir. Bu yardımcı elemanlar, yapısal bütünlüğü sağlamak, işlevselliği artırmak veya belirli bir amaca hizmet etmek için kullanılır. Havalandırma sistemleri, yangın koruma sistemleri, ses sistemleri, aydınlatma ve elektrik kanalları gibi yardımcı elemanlar, yapıya ek fonksiyonlar ekleyebilir ve yapıyı daha işlevsel hale getirebilir. Bu elemanların tasarımı ve uygulanması, yapı mühendisliği prensipleri ve yerel düzenlemelere uygun olarak yapılmalıdır.

Bu bileşenler, kubbe formundaki uzak kafes sistemlerinin başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanmasında önemli bir rol oynar. Her bir bileşen, sistemin güvenli ve

dayanıklı olmasını sağlar ve işlevselliğini destekler. Uzak kafes sistemlerinde kullanılan başlıca elemanlar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Çelik uzak kafes bileşenleri [9]

Kubbe Formundaki Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı

Bu sistemlerin yapısal davranışı, hem yapısal malzemeye hem de kubbenin geometrisine bağlı olarak değişir. Yapısal davranışlar, sistem tasarımı ve kullanılan malzemeye göre değerlendirilmelidir. Kubbe formundaki örtü sistemlerinin yapısal davranışını anlamak için farklı malzeme ve sistemlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu örtü sistemlerinin yapısal davranışını temsil eden 7 farklı grup:

1. Yığma kubbeler: Taş ve tuğla gibi kâgir malzemelerin kullanıldığı kubbelerdir. Bu tip kubbelerde basınca karşı direnç yüksektir, ancak çekme kuvvetleri statik açıdan sorun oluşturabilir. Yanal dikme payandaları, yarım kubbeler veya uçan payandalar gibi yapısal düzenlemelerle çekme kuvvetleri kontrol edilebilir.
2. Kabuk kubbeler: Betonarme malzemeden yapılan kubbelerdir. Yük dağılımı yığma kubbelerde olduğu gibi üst bölgede basınç ve alt bölgede çekme gerilmeleri oluşur. Alt bölgedeki çekme gerilmeleri çelik donatılarla desteklenir.
3. Kemer taşıyıcı kubbeler: Bu kubbelerde merkezde birleşen basınç çemberi bulunmaz. Kubbe kemerleri birbirine paralel olarak tasarlanır. Örneğin, Oita Stadyumu en büyük açıklığa sahip kemer taşıyıcı kubbeye örnek verilebilir.
4. Kaburgalı kubbeler: Kaburga ve kaburga dilimlerinden oluşan kubbelerdir. Kaburgalar aracılığıyla yükler çemberin eteğinden aktarılır. Floransa Katedrali gibi birçok tarihi yapıda kaburgalı kubbeler kullanılmıştır. Bu kubbeler yüksek mukavemet gerektiren alanlarda tercih edilebilir ve mimari açıdan çeşitli tasarım olanakları sunar.
5. Çubuk ağı kubbeler: Kubbe yüzeyini çubuk ağları ve düğüm noktaları ile farklı geometrik formlara ayırarak oluşturulan kubbelerdir. Nervürlü, schwedler, lamella, jeodezik, üç doğrultulu sistemler bu kubbelerin örnekleridir. Gerilmeler çubuk ağları üzerinden zemine eşit bir şekilde dağıtılır.
6. Kablo sistemli kubbeler: Çekme gerilmesine direnç gösteren çelik kablolarla desteklenen sistemlerdir. Kablolar, kubbe üzerinden aldığı yükü düşey taşıyıcı sistemlere aktarır. Bu şekilde kubbe sistemleri çelik kablolarla desteklenir.

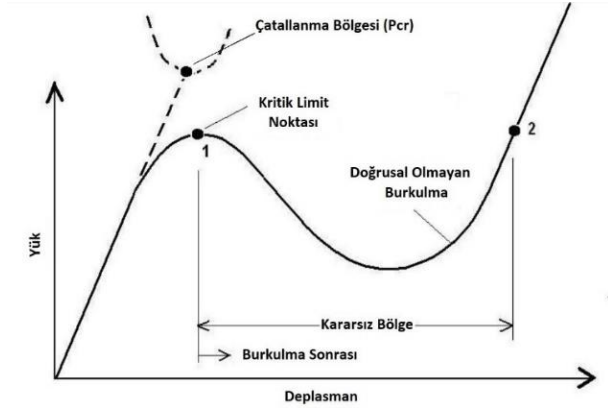
7. Pnömatik kubbeler: Basıncı hava ile gerilmeye sahip membran yüzeyi kullanılarak ayakta tutulan sistemlerdir. Bu sistemlerde membran sadece çekme gerilmesine direnç gösterir. Hava basıncıyla desteklenen kubbeler, kablolar yardımıyla üst yüzeydeki membranın stabilitesini sağlar.

Bu 7 farklı grup, kubbe şeklindeki örtü sistemlerinin yapısal davranışını temsil eder ve malzemeye, geometriye ve sistem tasarımına bağlı olarak farklı davranışlar sergiler. Kubbenin yapısal davranışının anlaşılması, doğru tasarım ve güvenli bir uygulama için önemlidir.

Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi

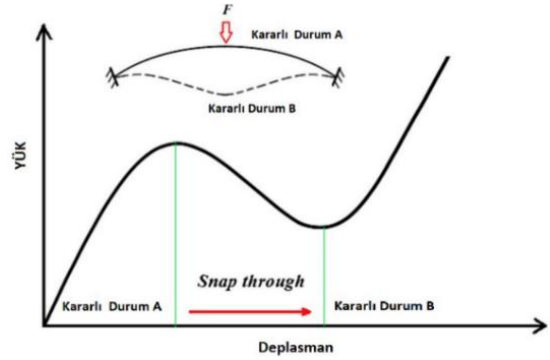
Çelik kubbe sistemlerinde stabilite, tasarım aşamasında önemli bir konudur. Özellikle burkulma davranışı, kafesli yapıların göçme güvenliği için kritik bir faktördür. Burkulma genellikle çubuk veya bağlantı elemanlarının doğrusal olmaması nedeniyle aşırı yüklemeler sonucunda ortaya çıkan bir kararsızlık durumudur. Bu durum, düzlem içi basınç kuvvetinin etkisiyle oluşur ve genellikle malzemenin mukavemetinden ziyade yetersiz stabilite nedeniyle ortaya çıkar. Bu nedenle, sistem yük altında statik olarak sağlam olsa bile burkulma analizi yapılmalı ve gerektiğinde eleman veya kafes stabilitesi artırılmalıdır. Genellikle kafes yüksekliği veya malzeme atalet momentini artırmak için tasarımlar yapılarak burkulma önlenmeye çalışılır. Özellikle kafes sistemlerinde bir elemandaki burkulma davranışı, bölgesel hatta öngörülemez sistemsel göçmelere neden olabilir. Bu nedenle, eleman burkulmasının sistemsel mukavemet üzerinde büyük bir etkisi olduğu söylenebilir.

Şekil 2'deki grafikte burkulma davranışı incelendiğinde, doğrusal olmayan ve çatallanma burkulması olarak adlandırılan bir davranış gösterir. Bu davranış grafiğinde elastik davranıştan sonra kritik limit noktasına ulaşıldığında ani bir şekil değiştirme gerçekleşir. Çatallaşma bölgesinde eleman zayıf bölgesine doğru şekil değiştirir. Bu noktada kararsız hale gelen yapı elemanı, deplasman yönüne doğru doğrusal olmayan bir burkulma eğrisini takip eder. Bu şekil değişimi hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Yüzey eğriliği olan kubbe ve tonoz gibi yapı sistemlerinde, örtü sistemi tersine burkulup dönerek yapısını tamamen kaybedebilir. Bu nedenle, kubbe ve tonoz yapılarının yükseklik/açıklık oranının burkulmadan en az etkilenmesi için mümkün olduğunca yüksek seçilmesi tercih edilir.



Şekil 2 - Nonlineer ve çatallanma burkulma davranışı grafiği [18]

Kubbe sisteminin yapısal olarak burkulma davranışı incelendiğinde, elemanın kararsız hale geldiği bir davranış sergiler. Şekil 3'te gösterilen kararlı A noktasından kararsız B noktasına kadar kritik bölgede sistem kararsızdır. Bu bölgeye kadar enerji depolayan ve kritik yük sonrası gerinin enerjisi serbest bırakan sistemde, eleman burkulup dönme gerçekleştirir ve bu şekil değişimi hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşir.



Şekil 3 - Tersine dönerek burkulma davranışında yük-deplasman grafiği [19]

Çelik kafes sistemlerinde oluşan burkulma davranışında düğüm noktalarının serbestlik dereceleri büyük ölçüde etkilidir. Düğüm noktalarında yeterli rijitlik sağlanmadığı ve elemanların aksenal gerilme dışındaki moment ve kesme kuvvetlerine uygun tasarlanmadığı durumlarda eleman burkulma davranışı gösterebilir.

Sistem üzerindeki burkulma kararsızlıkları tasarım aşamasında mutlaka kontrol edilmelidir. Burkulma analizi, lineer ve doğrusal olmayan olmak üzere iki ayrı şekilde yapılabilir. Lineer burkulma analizi, elastik yapıda burkulmanın teorik dayanımını ve çatallaşma noktasını belirler. Doğrusal olmayan burkulma analizi ise elemanın en kararsız hale geldiği noktayı bulur ve gerçeğe en yakın kritik yükü tahmin etmek için kademeli yük artışı sağlar. Burkulma sonrası stabilite kaybı ve sistem stabilitesi gibi faktörler, doğrusal olmayan burkulma analiziyle belirlenebilir.

Kubbe sistemlerinde eleman burkulması, tek bir elemanın etkilendiği burkulma davranışını ifade eder. Bu durum, tek bir elemandan kaynaklanarak yapıdaki geniş

bir alana yayılabilir. Yapının geometrisini etkileyebilir ve bölgesel veya bütünden burkulma kararsızlığını oluşturabilir. Bu hassas kararsızlık nedeniyle, burkulma boyunun azaltılması veya atalet momentinin artırılmasıyla kritik yüke maruz kalan eleman üzerindeki burkulma davranışı önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak, tek bir elemandan yapıya etkileyen burkulma kararsızlığının tasarım ve kesit dışındaki diğer faktörleri de dikkate almak önemlidir. Özellikle birleşim elemanlarının eksantrik yük iletimine neden olan kusurları, burkulma davranışını etkileyebilir. Bu nedenle, doğru bir uygulama için özenli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Eleman burkulması için Euler Burkulma teorisi kullanılarak kritik yük tespit edilebilir. Euler Burkulma teorisi, elastisite modülü, etkili uzunluk, burkulma boyu katsayısı ve atalet momenti gibi faktörleri dikkate alarak kritik yükü hesaplar.

Kubbe sistemlerinde yerel burkulma davranışı da sıkça görülebilir. Özellikle tek katmanlı kubbe sistemlerinde daha yaygın olan bu davranış, düğüm noktalarından kaynaklanır ve sınırlı bir alana etkier. Kubbe düğümlerinde bulunan içten asılı aydınlatma ve havalandırma gibi elemanlar, yerel burkulma davranışına neden olabilir. Bu elemanların kubbe düğümlerinde yarattığı yoğun tekil yük, burkulma davranışını tetikleyebilir. Yerel burkulma davranışı ayrıca, tersine dönerek burkulma (snap-through) olarak da ortaya çıkabilir. Bu durum, bölgesel veya sistemin tamamının tersine dönerek burkulması şeklinde gerçekleşebilir. Tersine dönerek burkulma, sistem stabilitesini etkileyebilir ve farklı gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde yerel burkulma davranışının öngörülmesi ve önlenmesi önemlidir.

Global burkulma davranışı ise bir yapının toptan göçmesine neden olabilen ciddi bir kararsızlık durumudur. Özellikle çift eğrilikli sistemlerde, tek eğrilikli sistemlere göre daha fazla global kararsızlık görülür. Bu tür sistemlerin yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olmasına rağmen, yapısal simetri bozulduğunda global burkulma davranışı artar. Simetrik yük dağılımları, birikmiş kar yükleri ve rüzgar dış basınçları gibi dış etkenler, bu davranışın ortaya çıkmasında önemli rol oynar. Yük dağılımı gibi dış etkenlerin yanı sıra, yapısal hatalar ve eksiklikler de global burkulma davranışını etkileyebilir. Örneğin, hatalı kaynaklar veya eğimli çelik elemanlar, yapısal simetri bozukluklarına neden olarak global burkulma davranışını artırabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde simetri ve diğer yapısal gerekliliklerin dikkatle ele alınması ve uygulanması önem taşır.

Sonuç olarak, çelik kubbe sistemlerinde stabilite ve burkulma davranışı dikkate alınması gereken önemli konulardır. Tasarım aşamasında burkulma analizi yapılmalı ve eleman veya kafes stabilitesi artırılmalıdır. Eleman burkulması, yerel burkulma ve global burkulma gibi farklı tiplerde ortaya çıkabilir ve yapısal simetri, doğrusallık ve kesit tasarımları gibi faktörler tarafından etkilenebilir. Doğru tasarım ve analiz süreci ile burkulma

davranışının kontrol altına alınması ve yapısal stabilitenin sağlanması önemlidir.

Kubbe Formundaki Uzak Kafes Tasarım ve Analizi

Makale çalışması kapsamında çift katmanlı bir model olmak üzere uzak kafes sistemi modellenmiştir. Uzak kafes sistemlerinin ticari veya akademik çalışmalarda analizleri için çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, hesaplama yöntemlerini ilgili yönetmeliklere göre ayarlayabilmektedir. Genellikle bu yazılımlar sonlu eleman yöntemini kullanarak yapısal analizleri gerçekleştirmektedir. Her kuruluş kendi yapısal analizleri için farklı bilgisayar yazılımlarını tercih edebilmektedir. Uzak kafes sistemlerinin analizlerinde en sık tercih edilen yazılımlardan biri SAP2000 programıdır. Makale kapsamında incelenen sistem modelinin analiz ve tasarımında SAP2000 programı kullanılmıştır. Bu program, üç boyutlu doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerin yanı sıra yapısal elemanların tasarım kolaylığını da sağlamaktadır. Ayrıca, çeşitli ülkelerin standartlarına uygun olarak çözümler üretebilmektedir.

Tasarım aşamasında Türk standartlarına göre tasarım yapılmıştır. Çelik yapıların tasarım ve hesaplama ilkeleri, Yük Ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları İle Tasarım (GKT) prensipleri üzerine yapılabilmektedir. YDKT prensibine göre, çelik yapıların taşıma kapasiteleri yük ve dayanım katsayılarına göre tasarlanırken, GKT prensibinde ise güvenlik gerilmelerine göre tasarım yapılır. Makale kapsamında çelik kubbe tasarımında YDKT yöntemi tercih edilmiştir.

Yük kombinasyonlarında kullanılan karakteristik yükler şunlardır:

G: Sabit Yük

Q: Hareketli Yük

S: Kar Yüğü

W: Rüzgar Yüğü

E: Deprem Etkisi

YDKT prensibine göre, tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, öngörülen yük veya yük kombinasyonlarına göre hesaplanan karakteristik dayanım değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu prensip $R_U \leq \Phi R_n$ şeklinde ifade edilir. Burada R_U , YDKT kombinasyonları altında hesaplanan dayanımı; R_n , karakteristik dayanımı; Φ ise tasarım dayanımı katsayısını temsil eder.

Tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik'te (ÇYTHYEDY) verilen YDKT yük kombinasyonları ile belirlenir. Bu yük bileşimlerinde belirtilen yük kombinasyonları, farklı sistem kombinasyonlarına ve yapısal etkilere göre tasarım dayanımını belirlemektedir.

Taşıyıcı elemanların deplasman kontrolü için ÇYTHYEDY'de belirtilen kullanılabilir sınır durumu için

verilen yük kombinasyonları altında çatı sistemlerinin düşey yer değiştirmeleri hesaplanmalıdır. Bu kombinasyonlar, yapısal kullanılabilirlik sınır durumlarını kontrol etmek için kullanılır. Yatay yer değiştirme durumunda ise kaplamaların olumsuz etkilenmemesi için kaplama malzemesi sehim durumuna bağlı olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, Makale kapsamında çift katmanlı kubbe şeklinde uzay kafes sistemi tasarlanmış ve analizi yapılmıştır. Tasarım aşamasında Türk standartlarına göre tasarım prensipleri ve YDKT yöntemi kullanılmıştır. Yük kombinasyonları ve tasarım dayanımı katsayıları, ÇYTHYEDY'de belirtilen tablolara göre belirlenmiştir. Analiz ve tasarım sürecinde SAP2000 programı tercih edilmiştir. Bu şekilde, kubbe şeklindeki uzay kafes sistemlerinin güvenli ve stabil bir şekilde tasarlanması ve analiz edilmesi sağlanmıştır.

Çift Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

Çift katmanlı çelik kubbeler, iki ayrı kubbe katmanının birleştirilmesiyle oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. Bu yapıların analizi, kubbenin boyutları, geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları gibi girdi parametrelerinin belirlenmesiyle başlar. İki katman arasındaki mesafe, malzeme kalınlığı ve çelik malzemenin özellikleri gibi faktörler, yapısal davranışı etkileyen önemli parametrelerdir.

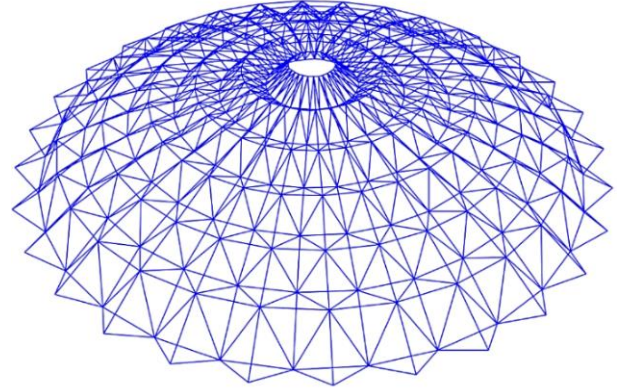
Çift katmanlı kubbelerin gerilme ve deformasyon analizi, her iki katmanın yük altında nasıl davrandığını, her iki katmanda oluşan gerilmeleri ve şekil değişimlerini hesaplar. Bu analizde her iki katmanın etkileşimi de dikkate alınır. Çift katmanlı kubbelerin yapısal davranışı, tek katmanlı kubbelerden daha karmaşıktır, ancak aynı zamanda daha yüksek dayanıklılığa ve rijitliğe sahiptirler. İki katmanın birleştirilmesi, yapısal yükün daha iyi dağılmasını sağlar ve yapıya daha fazla stabilite kazandırır.

Bu analizde çift katmanlı kubbe incelenmiştir. Model kubbe, 26 metre açıklığa, 4 metre yüksekliğe, 2 metre çapında bir basınç halkasına ve 24 metre çapında bir çekme halkasına sahiptir. Kubbe, 30 özdeş meridyen kafes sisteminden ve 7 paralel halkadan oluşmaktadır. Analiz için Diyarbakır ilindeki Dicle Üniversitesi arazisi seçilmiştir. Model kubbe elemanlarında S355 sınıfı çelik kullanılmıştır. Bu çelik sınıfının akma gerilmesi 355 MPa'dır. Kubbe elemanları boru profil elemanlarından oluşmaktadır ve çekme ve basınç etkilerine maruz kalmaktadır. Boru profillerin birleşim bölgeleri mafsallı olarak düzenlenmiştir.

Kubbenin kaplaması için lamine cam tercih edilmiştir. Cam, geniş alanları örtecek olan kubbelerin aydınlatılmasında gün ışığından faydalanmayı sağlamak için kullanılmıştır. Kubbe sisteminin yüzeyi yansıtıcı özellikli malzemelerle kaplanarak güneş ışınlarının ışınlama yolu ile neden olduğu yüksek ısınmaya engellenmiştir.

Yüklemelerde kubbenin kendi ağırlığı, kar yükü, rüzgar yükü, düzgün sıcaklık farkı etkisi ve deprem etkisi dikkate alınmıştır. Kubbenin analizi, bu yüklemelerin

etkilerini hesaplamayı içermektedir. Deprem etkisi, yapıyı dikey ve yatay yönde etkileyen bir yüklemidir. Bu bilgiler ışığında Model çift katmanlı kubbenin analizi yapılmış ve yapının davranışı incelenmiştir.

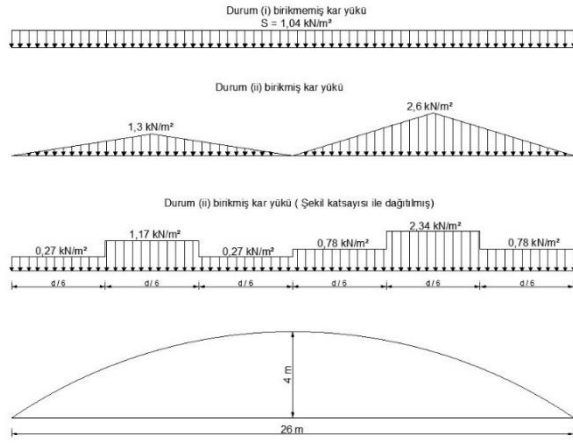


Şekil 4 - Çift katmanlı uzay kafes kubbe sisteminin perspektif görünümü [17]

Model Hesap Metodunda Kullanılan Yükler

Model için; sabit, hareketli, kar, rüzgâr, deprem yükü ve düzgün sıcaklık farkı etkisi sayısal olarak hesaplanıp SAP2000 programına ataması yapıldı.

1. Sabit ve Hareketli Yükler: Sabit yükler, kubbe şeklindeki kafesin profilleri, kaplama elemanları ve tesisat elemanları gibi yapıya etki eden sabit karakteristik yüklerdir. Bu yükler, yer çekimi ivmesi yönünde kubbeye etki eder. Cam kaplama yükünün hesaplanması için cam kalınlığına göre kütle yükü hesaplanır. Lamine camın birim hacim ağırlığı ve kalınlığına göre cam yükü hesaplanır. Ayrıca ek servis yükü de tanımlanır. Çelik kafes profil dışında sisteme etkitilecek sabit yük $0,5 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanır. Bu yüklerin toplamı, sistem hesaplamasında kullanılan toplam sabit yükü oluşturur.
2. Kar Yükü: Kar yükü, yapı hesaplamalarında TS 498 standartına göre hesaplanır. Hesaplama sürecinde yapıya etki eden coğrafi konum ve rakım değerleri dikkate alınır. Kar birikimi, yapı üzerinde asimetrik ve simetrik dağılımlar şeklinde olabilir, bu dağılımlar kar yükü hesaplamasında önemli bir rol oynar. Kar yükü hesaplaması için öncelikle kar yükü şekil katsayıları belirlenir. Bu katsayılar, kar birikiminin asimetrisi ve kubbe şekline bağlı olarak farklılık gösterebilir. Şekil katsayıları, kar yükünün dağılımını ve etkisini açıklamak için kullanılır. Kar yükü, iki farklı tipte yük kombinasyonuna etki eder. Bunlar birikmemiş tam kar yükü ve birikmiş yarım kar yüküdür. Bu yükler, kar birikiminin durumuna bağlı olarak farklı şekillerde etki gösterir. Kar yükünün kubbe modeline etkisi, yük dağılımı Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekilde, kar yükünün nasıl dağıldığı ve yapı üzerinde hangi bölgelerde yoğunlaştığı açıklanır. Bu bilgiler, yapı hesaplamalarında kar yükünün etkisini doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.

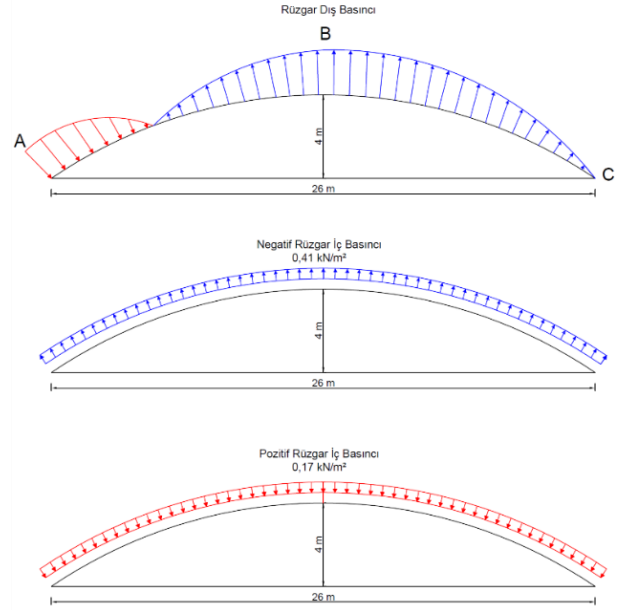


Şekil 5 - Kubbe sistemine uygulanan birikmiş ve birikmemiş kar yük dağılımı [17]

3. Rüzgâr Yükü: Rüzgâr yükü, yapısal tasarım hesaplamalarında önemli bir karakteristik yüküdür. Hesaplamalar, ortalama rüzgâr hızı ve diğer değişkenler temel alınarak yapılır. Bu hesaplamalarda engebelik katsayısı, orografi katsayısı ve diğer parametreler dikkate alınır. Rüzgâr yükü, dış ve iç basınç kuvvetleri olarak tanımlanır. Dış basınç kuvveti, rüzgârın yapının dış yüzeyinde oluşturduğu basınç ve emme kuvvetlerini içerir. İç basınç kuvveti ise rüzgârın kapalı olmayan yapıların içine girmesiyle oluşan basınç etkisini ifade eder.

Rüzgâr yükü hesaplamalarında kubbenin geometrik formuna bağlı olarak basınç katsayısı belirlenir. Bu basınç katsayısı, yapının ön, tepe ve arka noktalarında basınç farkının kubbe şeklinden kaynaklanan değişimini gösterir. Belirlenen basınç katsayısıyla birlikte bölgesel rüzgâr dış basıncı hesaplanır. Rüzgâr yükü hesaplamalarında, çift eğrilikli küresel sistemler gibi karmaşık yapılar söz konusu olduğunda, hesaplama süreci daha da karmaşık hale gelir. Bu nedenle, rüzgâr dağılımı hesaplamalarında önceden belirlenmiş formüller kullanılmalı veya rüzgâr tüneli testleri yapılmalıdır. Literatürde, kubbe formundaki sistemlere etkileyen rüzgâr yüklerini hesaplamak için rüzgâr tüneli testlerine dayanan çeşitli yöntemler ve öneriler bulunmaktadır.

Rüzgâr tüneli testleriyle gerçek gerilmelerin yakalanması zor olabilir, çünkü prototip yapı ile rüzgâr tüneline oluşan rüzgâr profili ve türbülans değerleri arasındaki ilişki karmaşık olabilir. Ayrıca, akışkan viskozitesinden kaynaklanan sınır tabakası uyumu, kubbe yüzeyinde emme ve basınç katsayılarını etkileyebilir. Rüzgâr yükleri, yapıya dışarıdan etki eder ve tamamen kapalı yapılar için dış basınç kuvveti oluştururken, kapalı olmayan yapılar için iç basınç kuvveti oluşturur. Rüzgâr yükünün kubbe modeline etkisi, yük dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6 - Kubbe sistemine uygulanan iç ve dış rüzgâr yükü [17]

4. Deprem Yükü: Uzak kafes sistemleri diğer yapı sistemlerine göre daha hafif olduğu için deprem yükü etkisi altında daha az kalmaktadır. Bu nedenle, Dicle Üniversitesi arazisi için uzak kafes sistemi tercih edilmiştir. Deprem yükünün hesaplanmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) dikkate alınmıştır. Yerel zemin sınıfı "ZB" olarak kabul edilmiştir. Spektral ivme katsayıları, AFAD'ın interaktif web haritası üzerinden elde edilmiştir. Tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanarak kullanılmıştır. Yatay elastik tasarım spektrumu ve düşey elastik tasarım spektrumu grafikleri kullanılarak yerçekimi ivmeleri hesaplanmıştır. Bina kullanım sınıfı, deprem tasarım sınıfı ve yapı yüksekliği sınıfı belirlenmiştir.
5. Düzgün Sıcaklık Farkı Etkisi: Uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan genleşme ve büzülme nedeniyle oluşan gerilmelerdir. Bu gerilmeler, çubuk ve düğüm noktalarında farklı ve ek bir yük oluşturur. Sıcaklık değişimi $\pm 20^\circ\text{C}$ olarak ele alınmıştır. Bu, elemanların sıcaklık artışı ve azalışı için kullanılan tipik bir değerdir. Sıcaklık etkisi, yapıya karakteristik bir yük olarak tanımlanır ve kombinasyonlara dahil edilmemiştir. Bunun nedeni, sıcaklık etkisinin sistemi kritik düzeyde etkilememesidir. Sıcaklık etkileri, elemanlara tatbik edilen yükleme şekliyle modellenir. Örneğin, çelik elemanların genleşmesi ve büzülmesi nedeniyle ortaya çıkan aksel gerilmeler hesaba katılır. Sıcaklık etkisinin karakteristik olarak incelenmesi, sistem davranışı hakkında bilgi sağlamak amacıyla yapılır. Bu sayede elemanların sıcaklık değişimlerine nasıl tepki vereceği anlaşılabilir. Özetle, sıcaklık etkileri, uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan gerilmeleri ifade eder. Bu gerilmeler,

elemanlara ek bir yük olarak tanımlanır ve sistemin davranışı üzerindeki etkileri incelenir. Ancak, sıcaklık etkisi bu model için diğer yüklerle karşılaştırıldığında daha az önem taşır.

Analiz Sonuçları

Kubbe Formundaki Elemanların Eksenel Gerilme Değerleri

Model'in SAP2000 programı kullanılarak analizi ve tasarımı yapılmıştır. Yapının elemanlarının tasarımında AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak YDKT yük bileşimine büyük oranda benzeyen LRFD yük birleşimi kullanılmıştır. Moment ve eksenel yük diyagramları, Model'in çift katmanlı ve çubuk birleşim elemanlarından oluştuğu ve mafsallı olduğu için sadece eksenel gerilmelere maruz kaldığı göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Bu elemanların birleşim bölgelerinde moment değeri sıfır olduğundan, analiz sonuçları eksenel yük gerilmelerine odaklanmaktadır. Ayrıca, iç ve dış katmanlar arasında farklı gerilme değerleri ve davranışları olduğu için bu durum da dikkate alınmıştır. Aşağıda, bazı örnekler için elde edilen karakteristik yük kaynaklı eksenel yük gerilmeleri verilmiştir.

Şekil 7(a)'da verilen sabit yük (G) altında eksenel yük diyagramı: Çubukların öz ağırlığı, kaplama ve ek servis yükleri sonucunda oluşan ağırlığın neden olduğu eksenel yük diyagramı incelenmiştir. İç katmanda sadece basınç gerilmesi oluşmuş olup en büyük basınç gerilmesi 14,87 kN ve en küçük basınç gerilmesi 1,67 kN olarak hesaplanmıştır. Dış katmanda ise çekme ve basınç gerilmeleri oluşmuştur. Etek bölgesinde en büyük çekme gerilmesi 1,84 kN ve basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 8,86 kN'dır.

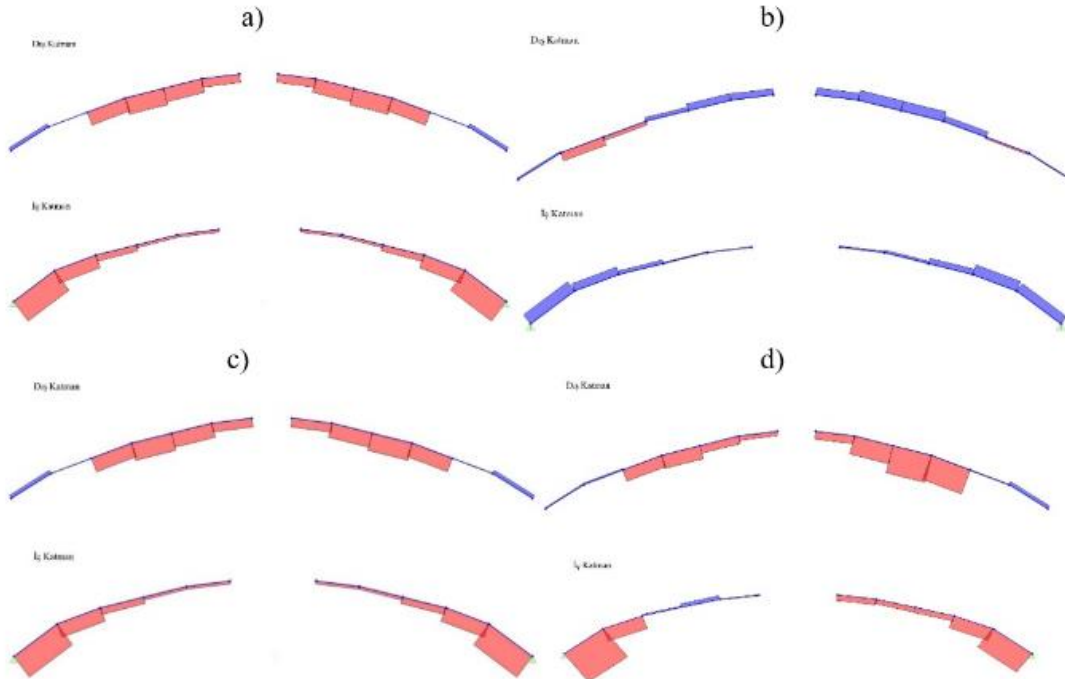
Şekil 7(b)'de verilen dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında eksenel yük diyagramı: Dış rüzgâr etkisi kubbe sistemlerinde basınç ve vakum etkileri oluşturur. Dış rüzgâr yükünün çubuklarda oluşturduğu eksenel yük diyagramında, en büyük basınç gerilmesi sol kirişte 4 kN olarak hesaplanmıştır. En büyük çekme gerilmesi ise sağ kirişte 4,7 kN'dır. İç katmanda ise tüm çubuklar çekme gerilmesine maruz kalmakta ve en büyük çekme gerilmesi sol kirişte 7,58 kN'dır.

Eksenel yük diyagramında, tam kar yükü Şekil 7(c)'de gösterilmiştir. İç katmanda, sadece basınç gerilmeleri oluşur ve en büyük basınç gerilmesi 18,38 kN, en küçük basınç gerilmesi ise 1,55 kN'dır. Dış katmanda ise çekme ve basınç gerilmeleri bir arada meydana gelir; etek bölgesindeki çekme gerilmesi 2,87 kN değerindedir, basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 10,73 kN'dır.

Şekil 7 (d)'da verilen sağ kar yükü altında eksenel yük diyagramı: Yarım kar yükü, tam kar yükü dışında sağ ve sol yarım kar yükü olarak dikkate alınır. Sağ yarım kar yükü durumunda, dış katmanda sağ kirişlerde sol kirişlere göre daha yüksek basınç ve çekme gerilmeleri oluşur. En büyük basınç gerilmesi sağ kirişte 17,95 kN ve en büyük çekme gerilmesi sağ kirişte 2,16 kN'dır. İç katmanda ise en büyük basınç gerilmesi sol kirişte 26,05 kN olarak hesaplanmıştır. Sol kirişte sağ kirişten farklı olarak 2,73 kN çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu çekme gerilmesi, dengesiz kar yüklerinin kritik yükü aşması ve bölgesel burkulma veya daha fazlasıyla sonuçlanması durumunda tersine dönerek burkulmaya neden olabilir.

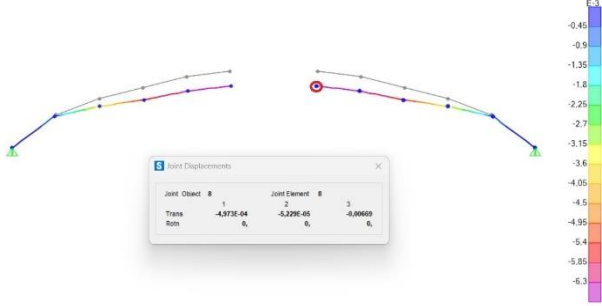
Kubbe Deplasman Sınır Kontrolü

Düşey yer değiştirme durumu: Yer değiştirmenin düşey ekseninde kontrolü için çeşitli kombinasyonlar kullanılarak maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir.



Şekil 7 - Karakteristik yükler; (a) sabit yük, (b) dış rüzgâr yükü, (c) tam kar yükü, (d) yarım kar yükü etkisi eksenel gerilme diyagramı [17]

ÇYTHYEEY madde 15.2'ye göre, düşey yer değiştirmenin açıklığa oranı 1/300 sınırını aşmamalıdır. Model'in en büyük düşey yer değiştirmesi G+Q kombinasyonunda 6,69 mm'dir, bu da sınır uzunluğu olan 86 mm değerini aşmadığını göstermektedir. Düşey yer değiştirme sınır durumu için deplasman durumu Şekil 8'de gösterildiği gibidir.



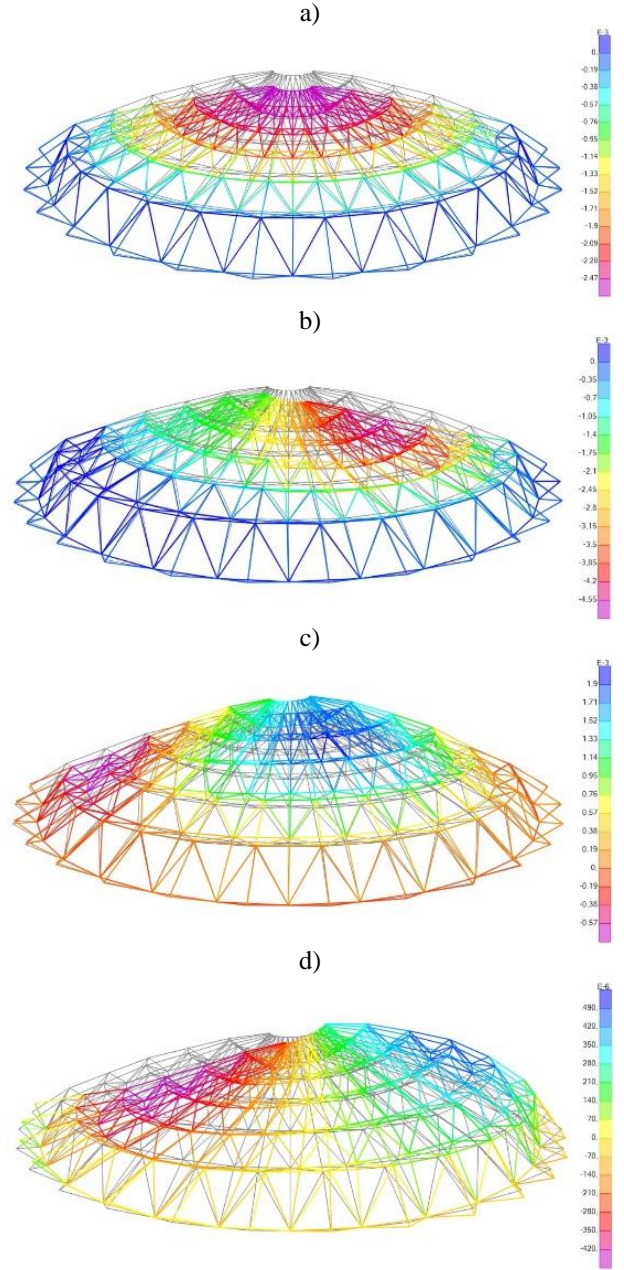
Şekil 8 – Düşey deplasman sınır kontrolü [17]

Yatay yer değiştirme durumu: Yer değiştirme kontrolü için çeşitli kombinasyonlar kullanılarak maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir. ÇYTHYEEY madde 15.3'e göre, sistemin cephe kaplaması ve türüne bağlı olarak yatay yer değiştirmenin belirli bir sınırı olmalıdır. Model'de yatay yer değiştirmeleri incelenmiş ve sınırlar içinde olduğu görülmüştür. Yatay yer değiştirme sınır durumu için deplasman durumu Şekil 9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 9 – Yatay deplasman sınır kontrolü [17]

Karakteristik yükler altında yer değiştirme durumu: Çeşitli karakteristik yükler altında düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri incelenmiştir. Deplasman, renk skalası kullanılarak düşey yer değiştirmeleri Şekil 10'da görselleştirilmiştir.



Şekil 10 - Karakteristik yükler; (a) Sabit yük, (b) yarım sağ kar yükü, (c) dış yatay rüzgar yükü, (d) deprem yükü etkisi altında deplasman durumu [17]

Sonuç olarak, Model'in düşey ve yatay yer değiştirmeleri, tasarım sınırlamalarını aşmayacak şekilde kontrol edilmiştir. Bu analiz sonuçları, yapısal hesaplamalar ve çelik elemanların boyutlandırılmasında kullanılmıştır.

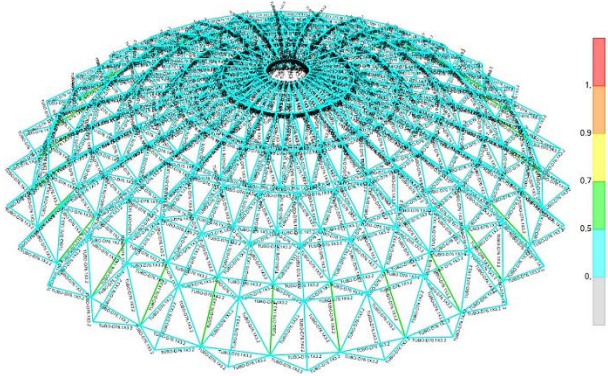
Kubbe Elemanların Tasarım Sonuçları

Model'in tasarımı, çift katmanlı kubbe sistemindeki çubuk elemanlar üzerindeki gerilme değerlerine göre yapılmıştır. Tasarım, SAP2000 programında yapılmış ve çubuk kesitleri belirlenmiştir. Tüm çubuklar aynı kesite sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımda burkulma davranışı da göz önünde bulundurularak kesit seçimi yapılmıştır.

Şekil 11'da çubuk elemanların "Etki/Kapasite" oranlarına göre renk skalası verilmiştir. Tasarım sonucunda en kritik yük kombinasyonu olan $1.2G+1.6Q+0.5S_{Yarım}$ yük kombinasyonu altında TUBO-D76,1x3,2 boru profili uygun kesit olarak belirlenmiştir. Her çubuk için aynı kesit kullanılarak imalat, nakliye ve montaj süreçlerinde kolaylık sağlanması ve hatalı işlemlerin önlenmesi amaçlanmıştır.

Ek A'da, sistemde en kritik çubuk olan kubbenin etek bölümündeki iç katman çubuğun tasarım detayları verilmiştir. Bu elemanın tasarımı, basınç etkisi altındaki eleman esaslarına göre belirlenmiştir. Tasarım detaylarına göre gerekli kesit ve boyutlar belirlenmiştir.

Örnek olarak, en kritik çekme yükü altında eleman tasarımı da incelenmiştir. Kubbe sisteminde $0.9G+1.6W_2$ yük kombinasyonu altında oluşan kritik çekme gerilmesi için program tarafından belirlenen tasarım detayları Ek B'de verilmiştir.



Şekil 11 – Çift katmanlı kubbe sisteminin tasarımı ve etki/kapasite oranına göre eleman renklendirilmesi [17]

Bu tasarım sonuçlarına göre, Model için uygun kesitler belirlenmiş ve tasarım detayları belirlenmiştir. Tasarımın yapısal gereksinimleri karşıladığı ve yapıya dayanıklılık sağladığı görülmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Model'in kubbe geometrisi gereği, etek bölgelerinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Ayrıca, kubbenin çift katmanlı yapısı, alt ve üst tabakaların yükün çeşidine ve uygulama yerine bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Özellikle düzgün yayılı olmayan yükler veya simetrik olmayan büyük tekil yükleme durumunda, iç ve dış katmanlar stabiliteyi korumak ve dengede kalmak için farklı şekillerde gerilmelere maruz kalmaktadır.

Çember kirişleri, simetrik yükler altında çekme gerilmelerine maruz kalırken, tepe noktasına doğru çekme gerilme değeri azalmakta ve basınç gerilmesi artmaktadır. En büyük basınç gerilmesi, çember kirişlerinde tepe noktasında meydana gelmektedir. Bununla birlikte, asimetrik yükler altında çubuk elemanları yük durumuna bağlı olarak bazen çekme bazen de basınç gerilmesine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, çubuk elemanlarının tasarımı sırasında hem

çekme hem de basınç gerilmelerini karşılayacak şekilde tasarım yapılması gerekmektedir.

Radyal kirişler, simetrik yükler altında iç katmanda sadece basınç etkisine maruz kalırken, dış katmanda etek bölümünde çekme gerilmesi oluşur. Ancak tepe noktasına doğru ilerledikçe, basınç gerilmesi etkisi artarak devam eder. Bu durum, radyal kirişlerin yük durumuna bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını gösterir. Asimetrik yüklemeler altında ise her bir radyal kiriş, çekme ve basınç gibi farklı gerilme durumlarına maruz kalabilir. Bu nedenle, radyal kirişlerin tasarımında her bir elemanın çekme ve basınç gerilmelerine uygun şekilde analiz edilmesi ve tasarlanması önemlidir. Yapının stabilitesi ve dayanıklılığı açısından, her bir radyal kirişin yük durumuna bağlı olarak çekme ve basınç gerilmelerine karşı uygun dayanım sağlaması gerekmektedir.

Tüm bu faktörler, Model'in kubbe geometrisi, çift katmanlı yapısı ve yük durumlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalmasını göstermektedir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarımda önemli bir rol oynamaktadır ve Model'in stabilize, dayanıklılık ve yapısal gereksinimleri karşılamasını sağlamaktadır.

Sonuçlar

Çalışma kapsamında oluşturulan çift katmanlı model sisteminin analiz ve tasarımının gerçekleştirildiği ve yapısal gereksinimleri karşılanmıştır. Kubbenin geometrisi nedeniyle etek bölgelerinde çekme gerilmelerinin oluştuğunu ve çift katmanlı yapının iç ve dış katmanlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını ortaya koymaktadır. Radyal kirişler, simetrik yükler altında iç katmanda sadece basınç etkisiyle karşılaşırken, dış katmanda ise etek bölümünde çekme gerilmeleri oluşmakta ve tepe noktasına doğru basınç gerilmesi etkisi artmaktadır. Özellikle asimetrik yükler altında her elemanın farklı gerilme durumlarına maruz kalabileceği tespit edilmiş ve tasarımının buna göre yapılması sistem stabilitesi için önemlidir. Çekme ve basınç gerilmelerine karşı dayanıklı çubuk ve kiriş kesitlerinin seçimi önemlidir. Sonuçlar, kubbe modelinin yapısal stabilize, güvenlik ve dayanıklılık açısından gereksinimleri karşıladığını ve farklı yük durumları altında başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir.

Bu çalışmanın sonucunda, çift katmanlı çelik kubbe modelinin analiz ve tasarımının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve yapısal hesaplamaların doğru yapıldığı ortaya çıkmıştır. Kubbe geometrisi, çift katmanlı yapısı ve yük durumlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalma durumunu göstermektedir. Tasarım sürecinde, çekme ve basınç gerilmelerine uygun elemanların seçilmesi sistem güvenliği için önemlidir. Kubbe modelinin yapısal gereksinimleri karşılaması, güvenlik sağlaması ve dayanıklılığı göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Bu çalışma, inşaat ve yapı mühendisleri, mimarlar, yapısal analiz ve tasarım uzmanları için yararlı olabilir. Ayrıca, çift katmanlı kubbe sistemleri veya benzer yapısal sistemlerin analizi ve tasarımıyla ilgilenen araştırmacılar, akademisyenler ve öğrenciler de bu çalışmadan faydalanabilir. Yapı mühendisliği alanında çalışan profesyoneller, bu çalışmadaki bulguları ve yöntemleri gerçek dünya projelerinde kullanarak yapıların dayanıklılığını ve performansını artırabilir. Mimari ve yapısal tasarım süreçlerinde, çift katmanlı kubbe sistemlerinin özellikleri ve davranışlarına ilişkin bu çalışmanın sonuçlarından yararlanarak daha güvenli ve etkili tasarımlar yapılabilirler.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur” “Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Kaynaklar

- [1] TS EN 1991-1-3, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-3: Genel etkiler, kar yükleri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [2] TS EN 1991-1-4, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-4: Genel etkiler - rüzgâr etkileri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [3] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [4] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018.
- [5] AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [6] S. P. Timoshenko ve S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, Singapore: McGraw-Hill, 1959.
- [7] S. P. Timoshenko, Theory of Elastic Stability, New York: McGraw-Hill Book Co. Inc, 1961.
- [8] C. M. Papadopoulos ve M. T. LoRizzo, «Symmetry-adapted computation: A case study of the Bucharest dome,» %1 içinde *In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, Canada, 2006.
- [9] K. Soykan, Çelik uzay kubbe sisemlerin ağırlıkça optimum dizaynı, (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi: Konya, 2007.
- [10] C. Çiftçi, Stability of steel dome structures, (Yüksek lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi: İstanbul, 2009.
- [11] U. Karabulut, Geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin ilgili türk ve avrupa standartları uyarınca karşılaştırmalı olarak incelenmesi, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon, 2018.
- [12] T. Kara, Tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistemlerinin yönetmelikler açısından değerlendirilmesi, (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul, 2019.
- [13] M. Özcan, Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisinin belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2019.
- [14] G. Yılmaz, Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2021.
- [15] A. Adnanoğlu, Farklı açıklıklara sahip dolu gövdeli kubbe kafes sistemler ile dairesel boşluklu kubbe kafes sistemlerin tasarım ve maliyet karşılaştırılması, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2022.
- [16] F. Wang ve G. Jiang, «Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations,» *Buildings*, pp. 12(11), 1832, 2022.
- [17] M. A. Bektaş, Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımı, Dicle Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).Diyarbakır, 2023.
- [18] A. H. Glenn, «Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures,» %1 içinde *In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, 2010.
- [19] Y. Li ve Y. L. Xu, «Tuning and switching of band gap of the periodically undulated beam by the snap through buckling,» *AIP Advances*, p. 7(5), 2017.

Ek A

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 887 X Mid: -8,174 Combo: 1,2G_1,6Q_0,5SL Design Type: Brace
 Length: 2,5 Y Mid: -7,36 Shape: TUBO-D76.1X3.2 Frame Type: SCBF
 Loc : 1,25 Z Mid: 0,75 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=1, 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0,282 AlphaPr/Pe=0,453 Tau_b=1, EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9 PhiC=0,85 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
 PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,75

A=7,329E-04 I33=0, r33=0,026 S33=1,282E-05 Av3=3,653E-04
 J=0, I22=0, r22=0,026 S22=1,282E-05 Av2=3,653E-04
 E=210000000, Fy=355000, Ry=1,1 z33=1,702E-05
 RLLF=1, Fu=510000, z22=1,702E-05

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1,2G_1,6Q_0,5SL)
 Location Pu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
 1,25 -73,281 0,042 0, 0, 0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
 D/C Ratio: 0,657 = 0,65 + 0,007 + 0,
 = (Pr/Pc) + (8/9) (Mr33/Mc33) + (8/9) (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)

| Factor | L | K1 | K2 | B1 | B2 | Cm |
|---------------|----|----|----|----|----|----|
| Major Bending | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, |
| Minor Bending | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, |

| | Lltb | Kltb | Cb |
|-----|------|------|-------|
| LTB | 1, | 1, | 1,316 |

| | Pu Force | phi*Pnc Capacity | phi*Pnt Capacity |
|-------|----------|------------------|------------------|
| Axial | -73,281 | 112,807 | 234,162 |

| | Mu Moment | phi*Mn Capacity | phi*Mn No LTB | phi*Mn Cb=1 |
|--------------|-----------|-----------------|---------------|-------------|
| Major Moment | 0,042 | 5,438 | 5,438 | 5,438 |
| Minor Moment | 0, | 5,438 | | |

| | Tu Moment | Tn Capacity | phi*Tn Capacity |
|---------|-----------|-------------|-----------------|
| Torsion | 0, | 5,69 | 4,267 |

SHEAR CHECK

| Status | Vu Force | phi*Vn Capacity | Stress Ratio | Check |
|-------------|----------|-----------------|--------------|-------|
| Major Shear | 0, | 70,248 | 0, OK | |
| Minor Shear | 0, | 70,248 | 0, OK | |

Kritik basınç yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]

Ek B

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 686 X Mid: -1,989 Combo: 0,9G_1,6W2 Design Type: Beam
 Length: 0,418 Y Mid: 5,175E-05 Shape: TUBO-D76.1X3.2 Frame Type: SCBF
 Loc : 0,418 Z Mid: 3,5 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=1, 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0,08 AlphaPr/Pe=0,004 Tau_b=1, EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9 PhiC=0,85 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
 PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,75

A=7,329E-04 I33=0, r33=0,026 S33=1,282E-05 Av3=3,653E-04
 J=0, I22=0, r22=0,026 S22=1,282E-05 Av2=3,653E-04
 E=210000000, Fy=355000, Ry=1,1 z33=1,702E-05
 RLLF=1, Fu=510000, z22=1,702E-05

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 0,9G_1,6W2)
 Location Pu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
 0,418 20,819 0, 0, 0,011 0, 0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1b)
 D/C Ratio: 0,044 = 0,044 + 0, + 0,
 = (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1b)
 Factor L K1 K2 B1 B2 Cm
 Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
 Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,

LTB Lltb Kltb Cb
 1, 1, 1,002

Axial Pu phi*Pnc phi*Pnt
 Force Capacity Capacity
 20,819 217,027 234,162

Major Moment Mu phi*Mn phi*Mn phi*Mn
 Moment Capacity No LTB Cb=1
 0, 5,438 5,438 5,438
 Minor Moment 0, 5,438

Torsion Tu Tn phi*Tn
 Moment Capacity Capacity
 0, 5,69 4,267

SHEAR CHECK

| Status | Vu | phi*Vn | Stress | Check |
|-------------|-------|----------|--------|-------|
| | Force | Capacity | Ratio | |
| Major Shear | 0,011 | 70,248 | 0, OK | |
| Minor Shear | 0, | 70,248 | 0, OK | |

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

| | VMajor Left | VMajor Right |
|------------|-------------|--------------|
| Major (V2) | 0,011 | 0,011 |

Kritik çekme yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]