

Atf İçin: Arslan KY, Çelik İD, Öztürk Y, Efe ME, 2021. Betonarme Soğutma Kulesi Tipi Yapıların Rüzgâr ve Sıcaklık Yükleri Etkisi Altındaki Davranışı. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 1218-1229.

To Cite: Arslan KY, Çelik İD, Öztürk Y, Efe ME, 2021. Behavior of Reinforced Concrete Cooling Tower Type Structures Under Wind and Thermal Loads. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2): 1218-1229.

Betonarme Soğutma Kulesi Tipi Yapıların Rüzgâr ve Sıcaklık Yükleri Etkisi Altındaki Davranışı

Kılıç Yasin ARSLAN^{1*}, İlyas Devran ÇELİK¹, Yusuf ÖZTÜRK^{1,2}, Mehmet Erkan EFE¹

ÖZET: Soğutma kuleleri, başta doğalgaz işletme tesisleri, nükleer enerji ve elektrik santralleri, petrol rafinerileri olmak üzere endüstriyel tesislere soğutma suyu sağlamak amacıyla tasarlanan yapılardır. Ülkemizin ekonomik ve siyasi durumu dikkate alındığında endüstriyel tesislere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Çok yüksek ve büyük çapa sahip yapılar oldukları için rüzgâr kuvvetine maruz kalan büyük bir yüzey alanına sahiptir. Farklı iklim koşulları ve soğutma kulesinin içinde dolaşan sıcak su dikkate alındığında termal etki de soğutma kulelerinde etkin bir rol oynar. Bu bağlamda yapılan bu çalışmada soğutma kulesi model parametresi olarak 120, 160, 200 m yüksekliğe sahip beton kabuğa 18 m olarak seçilen çelik kolonlar 37.5 m s-1 rüzgâr hızıyla birlikte tüm kabuğa +20 °C, +40 °C, -40 °C ve hava akışına bağlı olarak 30-60 °C arasında değişen sıcaklıklar kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak rüzgâr yükü ile kombine edilen sıcaklık yüklerinin kule kabuğunda kayda değer bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Soğutma kulesi, rüzgâr yükü, sıcaklık yükü, eksenel simetrik yapılar.

Behavior of Reinforced Concrete Cooling Tower Type Structures Under Wind and Thermal Loads

ABSTRACT: Cooling towers are structures mainly used in industrial zones such as natural gas facilities, nuclear energy plants, power plants and petrol refineries for supplying cooling water and designed accordingly. The need for industrial facilities in our country has been increasing every passing day. Cooling towers are quite tall and have a big diameter which is why they are exposed to wind loads due to their wide surface area. Considering different seasonal conditions and the hot water circulation, it can be said that thermal effects also have an impact for the cooling towers. In this study that is within this context, as model parameters; 120 m, 160 m, 200 m of heights for concrete shell, 18 m steel columns, 37.5 m s-1 wind speed and temperatures of +20 °C, +40 °C, -40 °C, 30-60 °C are chosen for analyses. Analysis results are evaluated for the chosen parameters. As a result, it was observed that the temperature loads combined with the wind load had a significant effect on the tower shell.

Keywords: Cooling tower, wind loading, thermal loading, axisymmetric structures.

¹ Kılıç Yasin ARSLAN ([Orcid ID: 0000-0002-4433-9204](https://orcid.org/0000-0002-4433-9204)), İlyas Devran ÇELİK ([Orcid ID: 0000-0001-9011-4041](https://orcid.org/0000-0001-9011-4041)), Yusuf ÖZTÜRK ([Orcid ID: 0000-0002-8450-1253](https://orcid.org/0000-0002-8450-1253)), Mehmet Erkan EFE ([Orcid ID: 0000-0001-8198-9997](https://orcid.org/0000-0001-8198-9997)), Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Yusuf ÖZTÜRK ([Orcid ID: 0000-0002-8450-1253](https://orcid.org/0000-0002-8450-1253)), Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Senirkent Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Kılıç Yasin ARSLAN, e-mail: kyarslan92@gmail.com

GİRİŞ

Endüstriyel tesislerin soğutma ihtiyacının karşılanması için yüksek miktarlarda suyun sisteme verilip, sistemde ısınan suyun tekrar soğutulması gerekmektedir. Soğutma kuleleri, tesislerdeki soğutma işlemini gerçekleştirmek için sistemde dolaştırılan suyun doğal hava akışıyla soğutulmasını sağlamaktadır. Bu sayede sistemde ısınan su göl ve nehirlerle tekrar verilip ekolojiye zarar vermemekle birlikte daha az miktarda su kullanılarak soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Soğutma kuleleri tasarımsal olarak ayak ve kabuk olarak iki bölümden oluşmaktadır. Kabuk olarak tasarlanan bölüm betonarme veya çelik konstrüksiyon olarak inşa edilebilmektedir (Zhang ve ark., 2017; Ma ve ark., 2019). Soğutma işleminin gerçekleşmesi için hava akımının sağlandığı ayak bölümü ise betonarme olarak tasarlanabileceği gibi çelik konstrüksiyon olarak da tasarlanabilmektedir (Wang ve ark., 2019). Ayak bölümünün yüksekliği, soğutma kulesinin bulunduğu bölgedeki hava akışı dikkate alınarak 6-30 m aralığında değişebilmektedir (Abedi-Nik ve Sabouri-Ghomi, 2008; Sabouri-Ghomi ve ark., 2006). Soğutma kulesinin kabuk bölümü ise sıcak su ve görelî soğuk havanın yardımıyla ısı transferi sağlamaktadır. Kabuk bölümü hem hava geçişinin hızlandırılması hem de yapısal sistemin yüksekliği boyunca rijitlik kazanıp ağırlık merkezinin zemine daha yakın olması için hiperbolik bir tasarımdadır (Ge ve ark., 2019; Ye, 2015). Soğutma kulelerinin hizmet verdiği amaç doğrultusunda maruz kaldığı sıcaklık iç kabukta 30-70 °C aralığında değişmektedir. Dış kabukta ise iklim koşullarına bağlı olarak göreceli olarak 80 °C farklar oluşabilmektedir (Jahangiri ve ark., 2019; Li ve ark., 2015).

Rüzgâr, deprem yükleri ve sıcaklık etkisi Soğutma kulelerinin tasarımına etki eden belirleyici yüklerdir (Lin ve ark., 2013). Literatürde yapılan çalışmalarda sarsma tablası deneyleri ve bilgisayar destekli analizler sonucunda sismik yüklerin, soğutma kulesinin geometrik özelliklerinden dolayı simetrik, hafif ve rijit bir dizayna sahip olmasından dolayı genellikle yapı kapasitesi bakımından belirleyici olmadığı sonucuna varılmıştır (Yu ve ark., 2016). Günümüzde gelişen teknolojilerin getirdiği artan ihtiyaçlar dolayısıyla daha yüksek soğutma kulesi ihtiyaçları doğmuştur (Lin ve ark., 2014). Soğutma kulesi yüksekliklerinin artışından kaynaklı olarak rüzgârla etkileşimde olan yüzey alanı çok fazla olduğu için rüzgâr yükü bu tip yapılarda genellikle etkin yük durumunu oluşturmaktadır (Noh, 2006; Liu ve ark., 2018). Rüzgâr kuvvetinin yapıya nasıl etki ettiğini bulmak için rüzgâr tüneli testleri tekil ve yan yana grup şeklinde hizmet veren soğutma kuleleri için uygulanmış bu test sonuçları sayısal modellerle doğrulanarak dizayn prosedürleri oluşturulmuştur (Zhang ve ark., 2017).

Literatürde soğutma kulesi tipindeki yapılarda Eurocode 1991-1-4, etkin olarak karşılık bulmaktadır (Eurocode 1991-1-4, 2005). Ülkemizde aynı yönetmeliğin uyarlaması olarak TS EN 1991-1-4 olarak yürürlüğe girmiştir ve hesaplamalar bu kapsamda yapılmaktadır (TS EN 1991-1-4, 2007). Soğutma kulelerinin boyutsal etkileri dikkate alındığında, etkin rüzgâr yükü TS EN IEC 61400-1 (2019)'de ortalama olarak 37.5-50 m s⁻¹ hızlar tasarımsal yaklaşımlar için dikkate alınmıştır.

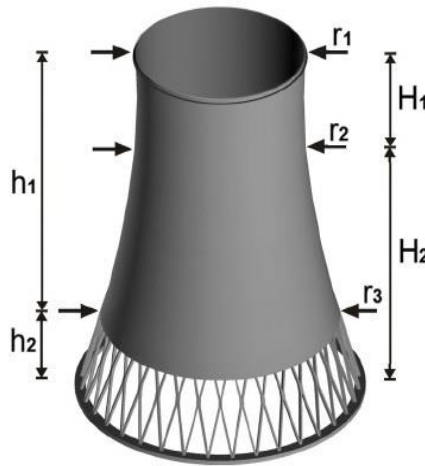
Yapılan bu çalışmada; 120, 160 ve 200 m kabuk yüksekliğine ve 18 m ayak yüksekliğine sahip 3 adet sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal modellerin tamamında kullanılan rüzgâr hızı 37.5 m s⁻¹ seçilmiştir.

İşletme durumu göz önüne alındığında kabuğun içindeki hava akışına bağlı olarak 30-60 °C arasında değişen sıcaklık oluşmaktadır (Jahangiri ve ark., 2019). İşletme durumunda olmayan soğutma kulesi için sırasıyla +20, +40, -40 °C değerleri seçilmiştir. Bu sıcaklık değerleri 37.5 m s⁻¹ rüzgâr ile kombine edilmiştir. Çalışmada, Sap2000 sonlu elemanlar programı kullanılmış olup elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

MATERYAL VE YÖNTEM

İşletme koşullarındaki soğutma kulesi tipi yapıların farklı kabuk ısıları altında rüzgâr yükü ile olan etkileşimin incelendiği bu çalışmada; kabuk yüksekliği, rüzgâr hızı ve kabuk sıcaklıkları üç ayrı parametre olarak kullanılmıştır.

Soğutma kulelerinin boyutsal parametrelerindeki değişkenlerin rüzgâr yükü ve sıcaklık ile olan ilişkisini ortaya koyabilmek için hiperbolik eğri ve kalınlıklar tüm modellerde sabit tutulmuştur. Beton kabuk yüksekliği ve buna bağlı olarak taban çapı üst çap ve boğaz çapları değişkendir. Şekil 1'de modellere ait boyutsal parametreler gösterilmiştir.



Şekil 1. Soğutma kulesi boyutsal değişkenleri (Sabouri-Ghomi ve ark., 2006).

Şekil 1'de ifade edildiği üzere h_1 : beton kabuk yüksekliğini, h_2 : ayak yüksekliğini temsil etmektedir. Analizlerde beton kabuk yüksekliği 120 m, 160 m ve 200 m olarak üç yükseklik için ele alınmıştır. Ayak yüksekliği olarak ise 18 m yükseklik durumlarına sahip kolonlar ile kombinasyonu yapılmıştır. Çizelge 1'de analizlerde dikkate alınan modellerin boyutsal değişkenleri detaylı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 1. Modellere ait boyutsal parametreler

Model	SM1*	SM2*	SM3*
h_1	120	160	200
h_2	18	18	18
H_1	27,69	34,06	49,15
H_2	92,31	125,94	153,85
r_1 (çap)	58,43	79,72	97,38
r_2 (çap)	57,36	78,26	95,6
r_3 (çap)	98,72	134,69	164,53

* SM: Sayısal Model

Çalışmada kullanılan sayısal modellerde kabuk kalınlıkları için tanımlanan boyutsal parametreler tüm modellerde sabit tutulmuştur. Bu kapsamda r_3 çap tanımlı bölüm yani ayak üst kotunda 1.4 m alınmıştır. r_2 noktasına kadar azalarak r_2 noktasında 0.27 m, r_1 noktasına kadar artarak kabuk tepe noktasında yani r_1 noktasında 0.4 m alınmıştır. Ayak bölümü kolon elemanları çelik konstrüksiyon olarak modellenmiş olup tüm modellerde çapı 1300 mm olan dairesel kesitli profilde 50 mm cidar

kalınlığı kullanılmıştır. Çizelge 2 ve Çizelge 3’ te analizlerde kullanılan yapı elemanlarının malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

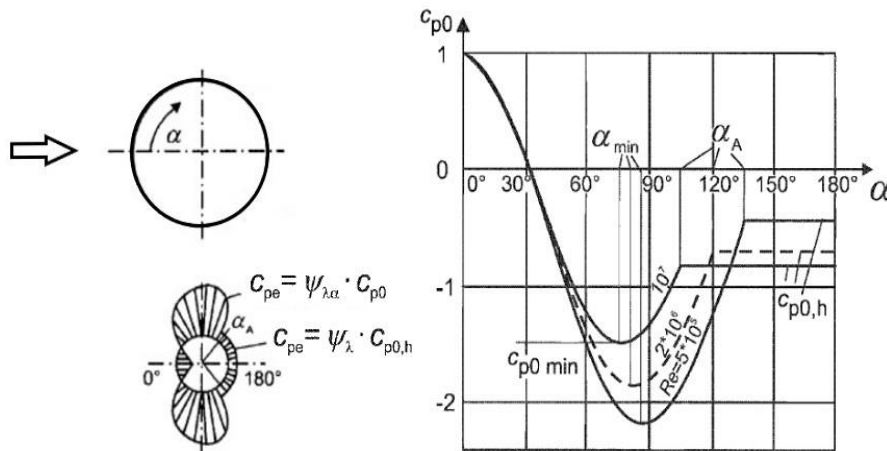
Çizelge 2. Kabuk betonu malzeme özellikleri

Beton Sınıfı	Silindirik Numune Basınç Dayanımı, f_{ck} (Mpa)	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı, f_{ck} (Mpa)	Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk} (Mpa)	28 Günlük Elastisite Modülü E_c
C40	40	50	2,2	34000

Çizelge 3. Çelik konstrüksiyonun malzeme özellikleri

Çelik Sınıfı	Min. Akma Muk. f_y (Mpa)	Min. Çekme Mukavemeti f_u (Mpa)	Min. Çekme dayanımı/Akma dayanımı Oranı	DeneySEL Akma dayanımı/Karakteristik Akma Dayanımı oranı
S355	355	490	1,15	1,3

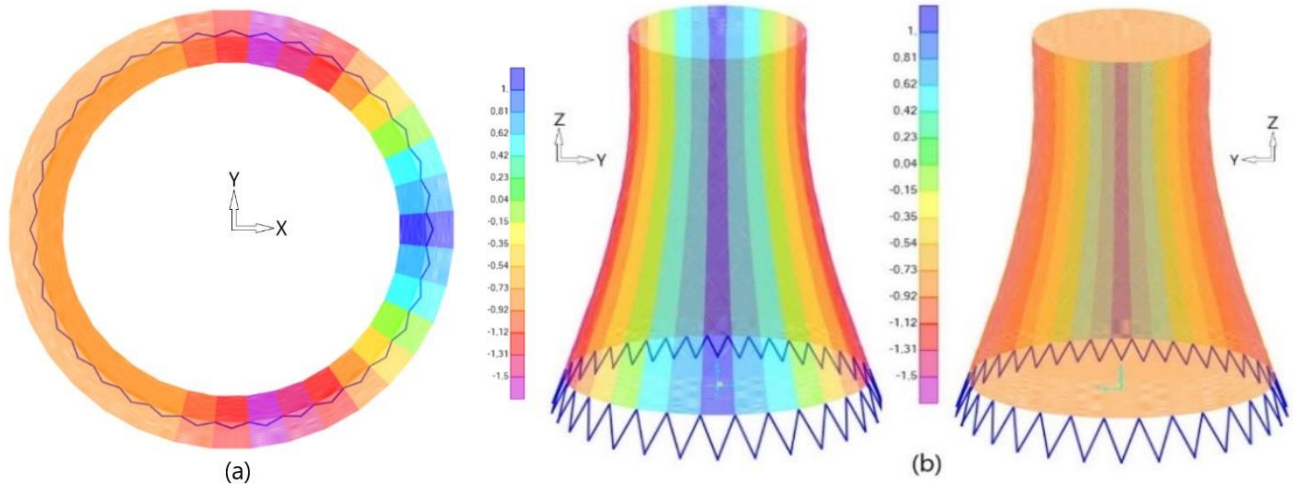
Değişen boyutsal parametrelere göre rüzgâr yükünün yapısal davranışa etkisinin incelendiği bu çalışmada, rüzgâr yükü TS EN 1991-1-4 yönetmeliği kapsamında tanımlanmıştır. İlgili yönetmelikte Arazi Kategorisi II olarak seçilmiştir. Bu kategori az seviyede bitki örtüsü bulduran veya rüzgâra engel olacak yapı yüksekliğinin en az 20 kat uzaklığa sahip olduğu durumlar için kullanılacak kategoridir. Bu durum için engebelilik uzunluğu (z_0) değeri 0.05 ve en düşük yükseklik (z_{min}) değeri 2 olarak seçilmiştir. Orografi faktörü $C_0(z)$, rüzgâr etkin yönündeki arazinin eğim ortalamasının 3 dereceden az olduğu durumlarda dikkate alınmadığı için bu değer 1 olarak seçilmiştir. Türbülans faktörü (K_1) değeri 1 alınmıştır. Dairesel kesitli yapılarda, rüzgâr kuvveti basınç dağılımı dairesel geometri açısal değişime göre değişen katsayılar için tanımlanmıştır. Şekil 2’de tanımlanan grafikte en etkin basınç kuvveti katsayıları (c_{p0}) açısal olarak elde edilmiştir. Rüzgârın etkilediği yönde rüzgârı dik olarak karşılayan kısma 0° ve tam karşısına ise 180° açı değerleridir. Burada ara değerler enterpolasyon yöntemi yardımıyla hesaplanmaktadır. Soldaki görselde ise basınç katsayılarının dağılımları verilmiştir. Rüzgâr hızı ise TS EN IEC 61400-1 (2019)’de rüzgâr türbin sınıflarına göre referans rüzgâr hızları Türbin Rüzgâr Sınıfı III. için 37.5 m s^{-1} olarak verilen değer seçilmiştir.



Şekil 2. Rüzgâr basınç katsayıları (TS EN 1991-1-4, 2007)

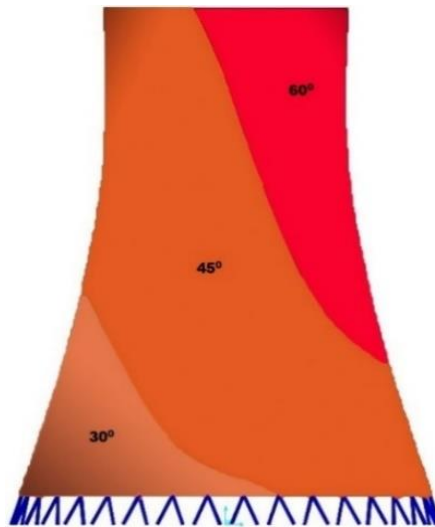
TS EN 1991-1-4’de tanımlanan katsayı değişkeni kullanılarak hesaplanan rüzgâr yükü, sayısal modellere basınç kuvveti olarak etkiltilmiştir. Şekil 3’te modellere etkileyen gerilme dağılımları kN m^{-1} olarak verilmiştir. Dağılımların verildiği görsellerde kullanılan renk skalasında pozitif değerler basınç,

negatif değerlerde çekme (emme) etkilerini temsil etmektedir Şekil 3a'da sisteme etkiyen basınç dağılımının plan görünümü verilmiştir. Şekil 3b'de kesit görünümü verilen dağılımlarda sol taraftaki görselde rüzgârın etkiye doğrultusu boyunca basınç bölgesini temsil ederken sağ taraftaki görselde emme yönü dağılımı verilmiştir.



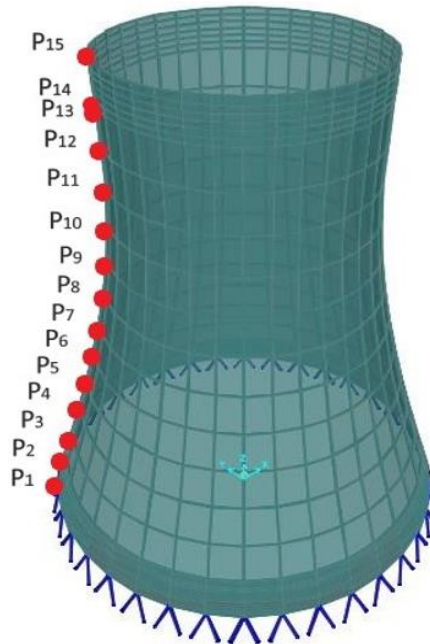
Şekil 3. Rüzgâr yükü basınç dağılımı. (a) Rüzgâr yükü basınç dağılımı plan görünümü (b) Rüzgâr yükü basınç dağılımı kesit görünümü

(Jahangiri ve ark., 2019), Soğutma kulelerinin kabuk sıcaklığının, kule içindeki hava sirkülasyonundan dolayı 30-60 °C aralığında değerler aldığı ifade etmiştir. Çalışmada çapraz sıcaklık olarak ifade edilen bu 30-60 °C aralığında sıcaklık değerleri alan kulenin sıcaklık dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Kulenin bulunduğu konum dikkate alındığında kabuk iç yüzeyi ile dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı göreceli olarak 0-80 °C aralığında olabilmektedir. Sıcaklık etkisinin yapı malzemesi, genişleme faktörü ile ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda, bu durumda analizlere bir değişken olarak dahil edilmiştir. Bu kapsamda sıcaklık etkisi tüm kabuk sisteminde +20 °C, +40 °C, -40 °C ve Şekil 4'te tanımlandığı üzere rüzgâr yönü etkisi altında kabuk yüzeyindeki sıcaklık farkları dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Rüzgâr etkisinde kabuktaki sıcaklık dağılımları

Tüm modellerde yer değiştirme ölçüm noktaları P_{14} hariç eşit aralıklarla seçilmiştir. P_1 - P_2 ve P_{13} - P_{15} aralığında kalınlık değişimleri gerçekleştiğinden dolayı daha doğru çözüm yapabilmek adına daha fazla parçaya bölünmüştür. Şekil 5'te yer değiştirmelerin okunduğu referans noktalar gösterilmektedir.

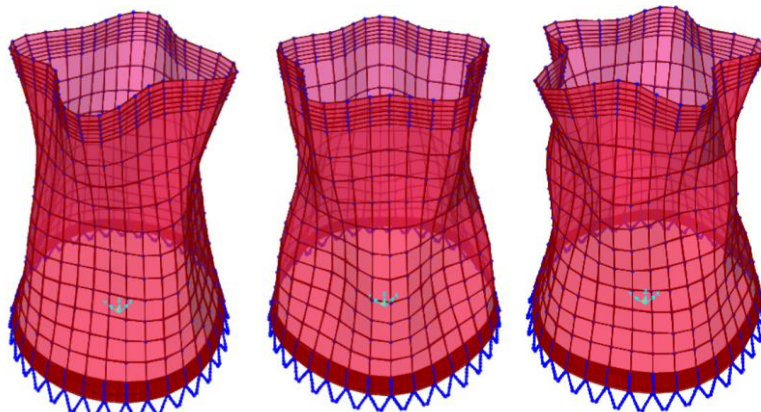


Şekil 5. Yer değiştirmelerin ölçüldüğü noktalar

BULGULAR VE TARTIŞMA

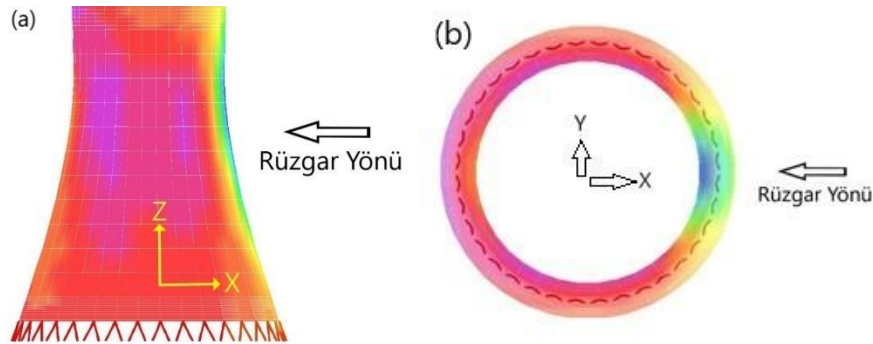
Soğutma kulesi tipi yapıların işletme koşullarındaki oluşabilecek farklı kabuk ısıları dikkate alınarak rüzgâr yükü ile olan etkileşimin incelendiği bu çalışmada; kabuk yüksekliği, rüzgâr hızı ve kabuk sıcaklıkları üç ayrı parametre olarak kullanılmıştır.

Kabuk üzerinde dairesel kesitte rüzgâr yönüne göre itme ve emme kuvvetlerinin en etkin olduğu konum 80° açıdaki konumdur (TS EN 1991-1-4, 2007). Şekil 2'de basınç dağılımı bir katsayı üzerinden detaylandırılmıştır. Buna göre 0° ve 180° açı rüzgârın yapıyla ilk buluştuğu ve terk ettiği bölüm olmakta ve yük değeri direk olarak etkilenmekte, bir katsayı artırımı uygulanmamaktadır. Açı değeri 80° 'de katsayı Şekil 2'de tanımlandığı üzere maksimum değer olan 2.1 olarak alınmıştır. Bu konumların okuma noktaları olarak seçilmesinde en belirleyici durum silindir tipi yapıların "M" tipi deformasyonuna yol açmaktadır (Ke ve ark., 2018). Şekil 6'da silindir bir geometride meydana gelen "M" tipi deformasyon hali gösterilmiştir.



Şekil 6. Rüzgâr etkisinde kabuktaki sıcaklık dağılımları

Tanımlanan deformasyon durumları incelendiğinde, silindir geometrideki kabuk sisteminin birbiri ile ters yönde içe-dışa doğru yer değiştirme sergilediği görülmektedir. Kule yüksekliği boyunca değişen yer değiştirme değerlerinin verildiği grafiklerde; soğutma kulesi sayısal modellerinin koordinat takımına yerleşim şekline bağlı olarak X ve Y değerleri pozitif ve negatif yönde dağılım göstermektedir. Buna göre rüzgâr etkime yönü dikkate alındığında X yönü verilerinin pozitif olduğu durumlar rüzgâr etki yönüne ters yönde hareketi, negative veriler rüzgâr yönündeki hareketi temsil etmektedir. Y yönü yer değiştirme değerleri negatif olduğu durumlar kule kabuğunun içe doğru, pozitif veriler dışa doğru yer değiştirme olduğunu ifade etmektedir. Şekil 7’de soğutma kulesinin koordinat takımına yerleşim şekli gösterilmiştir.



Şekil 7. Soğutma kulesinin eksen takımına yerleşim şekli görünümü (a) X-Z eksenli plan görünümü (b) X-Y eksenli plan görünümü

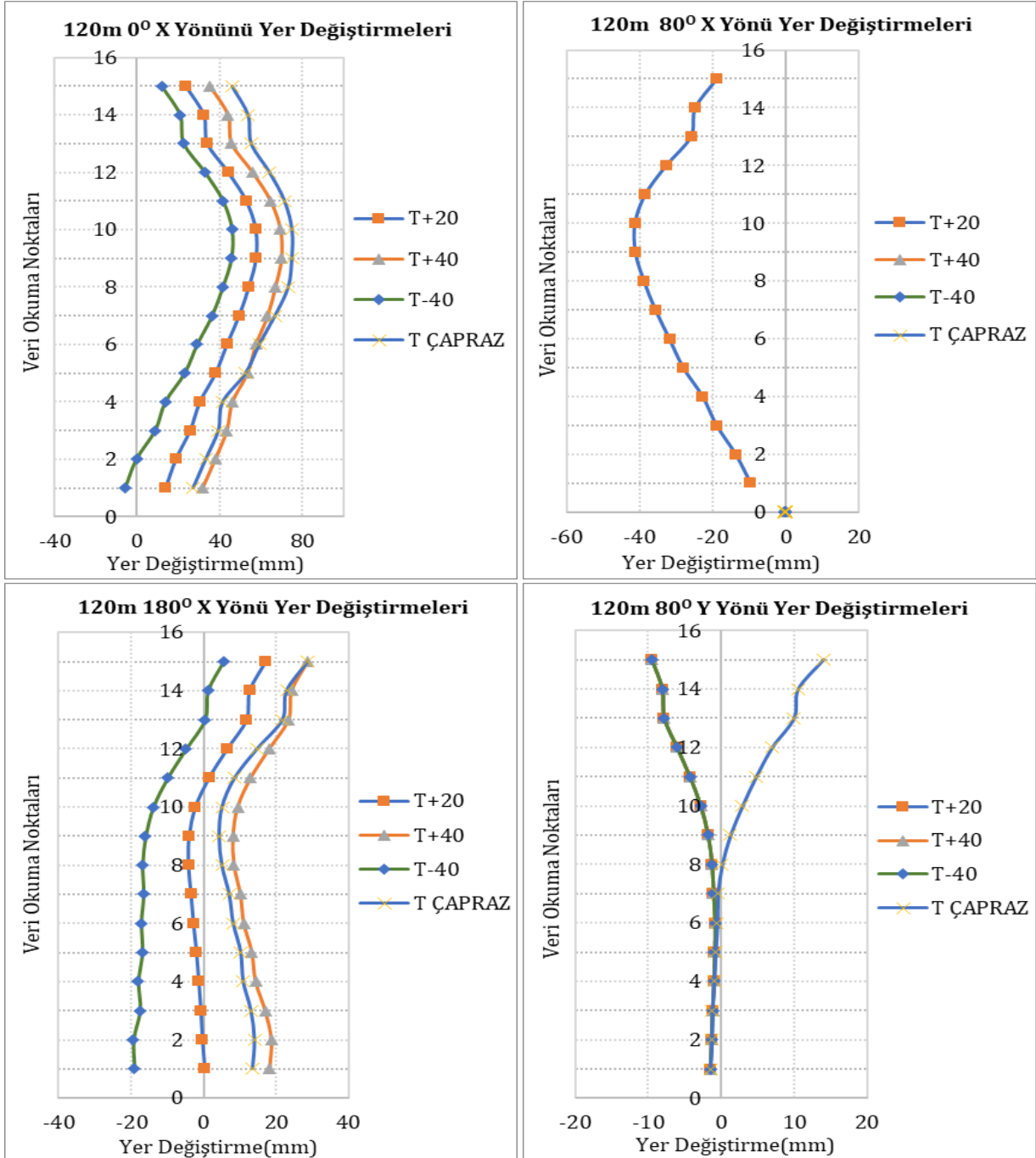
Çalışma kapsamında kulenin bulunduğu durumlara ait ortam sıcaklıklarının da yapısal davranış üzerindeki etkisini göz önünde bulundurabilmek için 120 m’lik kabuk yüksekliğine ve 18 m’lik ayaklara sahip kulelere +20 °C, +40 °C, -40 °C ve Şekil 4’te görselde dağılımı verilen çapraz sıcaklık 37.5 m s⁻¹ rüzgâr yükü etkisi ile kombinasyonundan X ve Y eksenleri için elde edilmiş yer değiştirme değerleri Şekil 8’de verilmiştir.

X yönü yer değiştirmeleri incelendiğinde yer değiştirme olarak en büyük değerlerin 0° açıdaki okuma noktasında çapraz duruma ait olduğu, en az yer değiştirme değerlerinin yani yer değiştirmeye en az rijit kalan durumunda -40 °C durumuna ait olduğu görülmüştür. 80° ve 180°’lik açılarda tam tersi istikamette yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Buralardaki rüzgâr etkisi altında meydana gelen yer değiştirme miktarları -40 °C sıcaklık durumu için belirgin hal almıştır. Y yönü yer değiştirmelerini incelediğimizde çapraz sıcaklık durumuna ait olan yer değiştirmelerin bütüncül olduğu -40, +40, ve +20 °C’den belirgin bir şekilde ayrıştığı görülmektedir. (Jahangiri ve ark., 2019), Rüzgârın sıcaklık dağılımına etkisini inceledikleri çalışması incelendiğinde sıcaklık dağılımı benzer sonuçlar vermiştir. (Cheng ve ark., 2013), Çalışmalarında yaptıkları rüzgâr tüneli testinden elde ettikleri yer değiştirme ve deformasyon değerleri çalışmadaki +20°C ile rüzgâr kombinasyonu ile örtüşen sonuçlar vermiştir.

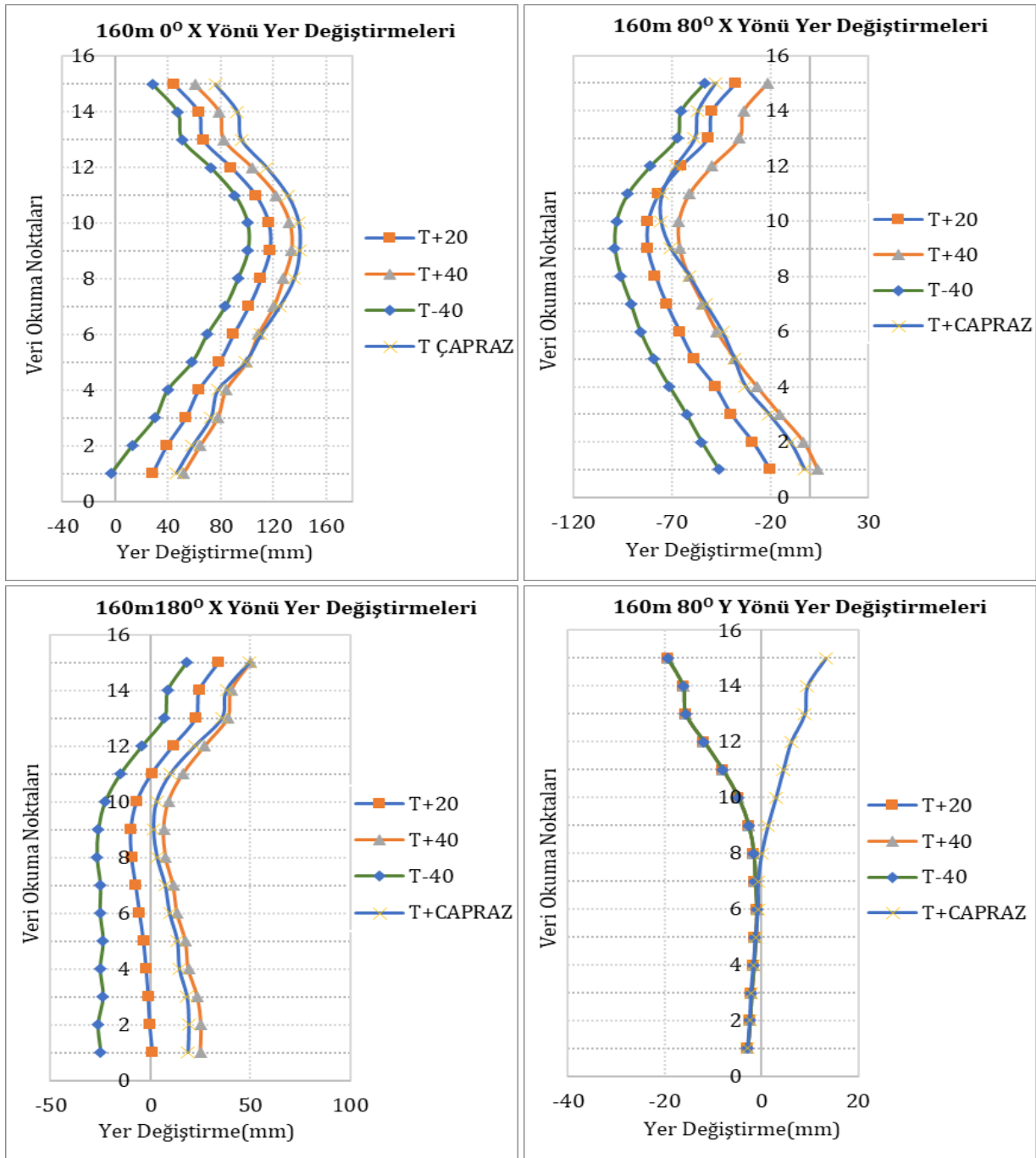
Kabuk yüksekliği 160 m, ayak boyu 18 m olan modelde +20 °C, +40 °C, -40 °C ve Şekil 4’te gösterildiği gibi uygulanan çapraz sıcaklık için elde edilmiş yer değiştirme değerleri 37.5 m s⁻¹ rüzgâr yükü etkisi altında X ve Y eksenleri için Şekil 9’da verilmiştir.

160 m’lik kule için elde edilen grafikler incelendiğinde, 120 m’lik kule ile benzer doğrultuda sonuçlar görülmektedir. Burada da -40 °C’lik deformasyon durumları özellikle 80° açıdaki okuma alanı X yönündeki yer değiştirmelerde tasarımcı açısından dikkat edilmesi gereken sonuçları vardır. Ayrıca Y yönünde 80°’lik açıdaki yer değiştirme incelendiğinde ise çapraz sıcaklık etkisi altında daha belirgin bir ayrışma görülmektedir.

200 m'lik kabuk yüksekliğine sahip olan kulenin +20 °C, +40 °C, -40 °C ve Şekil 4'te gösterildiği gibi uygulanan çapraz sıcaklıkla birlikte 37.5 m s^{-1} rüzgâr yükü etkisi altında elde edilmiş yer değiştirme değerleri X ve Y eksenleri için Şekil 10'da verilmiştir.



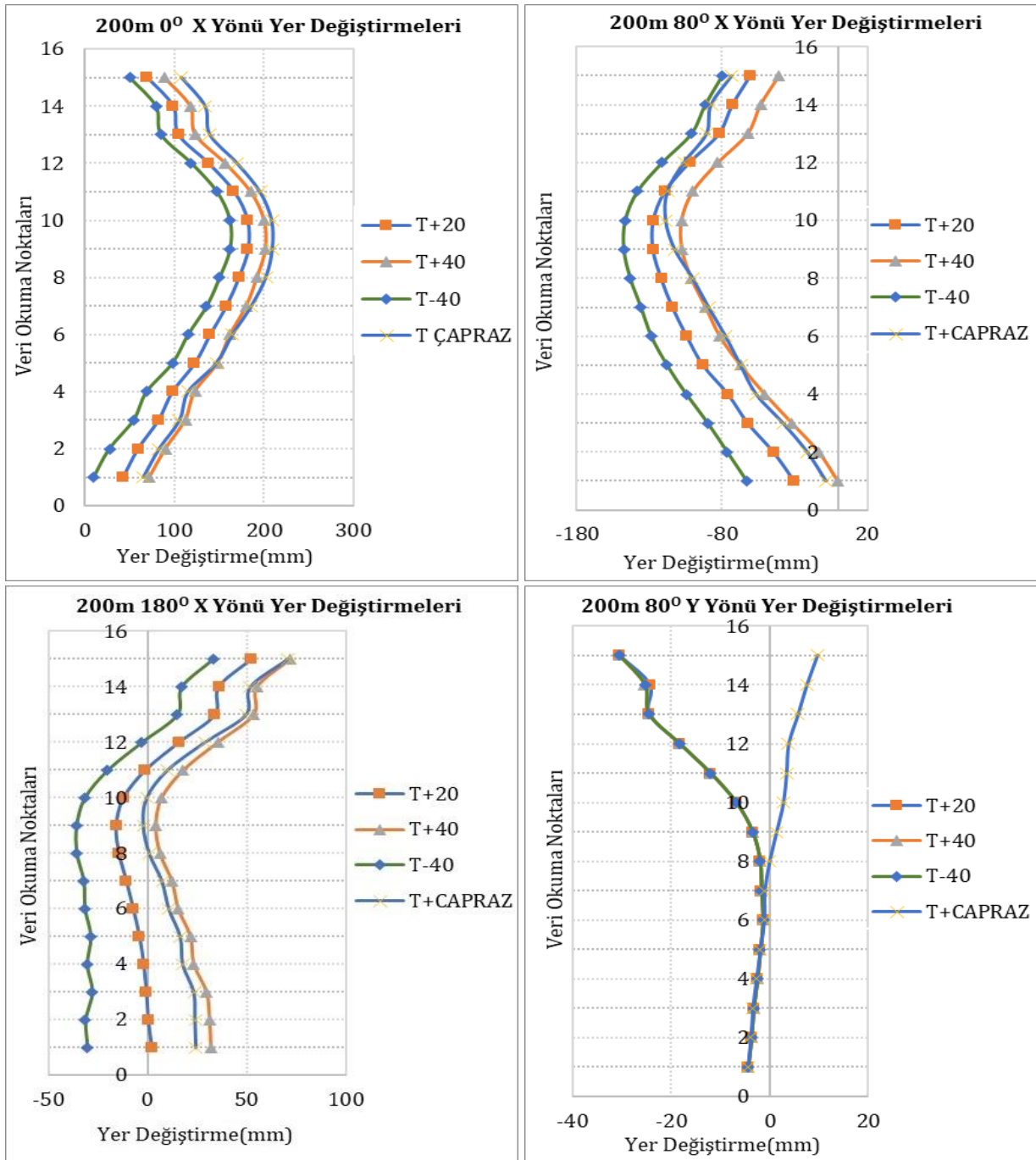
Şekil 8. 120 m kabuk yüksekliğinde 37.5 m s^{-1} rüzgâr ile 20 °C, 40 °C, -40 °C ve çapraz sıcaklık etkisi altındaki soğutma kulelerinin X ve Y yönü yer değiştirmeleri



Şekil 9. 160 m kabuk yüksekliğinde 37.5 m s^{-1} rüzgârla $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ve çapraz sıcaklık etkisi altındaki soğutma kulelerinin X ve Y yönü yer değiştirmeleri

Elde edilen yer değiştirme grafikleri incelendiğinde diğer kule yüksekliğine bağlı olarak deformasyon miktarları artmıştır. Negatif sıcaklıklarda büzüşme durumu meydana gelmiştir. Özellikle 80° 'lik açıdaki okuma alanında yani maksimum rüzgâr yükünün bulunduğu kısımda kule içe doğru yer değiştirmiştir. Kulenin $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık etkisi altında büzüşmeye meyil ettiği durum, rüzgâr etkisi altındaki emme kuvvetiyle birlikte düşünüldüğünde kuvvetler toplamı oluşmakta ve kule kabuğunda içe doğru hareket meydana bu hareket, 0° açıda kule eksen dışına doğru yer değiştirmesini daha da arttırmaktadır. Basınç etkisi altındaki bir kulede içe doğru baskının beton tarafından karşılanması mümkündür ancak kule kabuğunda içe doğru kuvvetin reaksiyonu olan 0° açıdaki dışa doğru yer değiştirme kabukta çekme kuvveti oluşturacaktır. Bu açıdan değerlendirildiğinde tasarımcıların soğuk

iklim koşullarında hizmet verecek bir kulede özellikle rüzgâr yönüne göre 0° açıda konumlanan dış cidarda çekme gerilmelerinde bu etkiyi göz önünde bulundurmaları gerekmektedir.



Şekil 10. 200 m kabuk yüksekliğinde 37.5 m s^{-1} rüzgârla 20°C , 40°C , -40°C ve çapraz sıcaklık etkisi altındaki soğutma kulelerinin X ve Y yönü yer değiştirmeleri

Ayrıca tüm modellerde X yönü yer değiştirmeleri incelendiğinde; 0° açıda 9 nolu okuma noktasına kadar rüzgâr yönüne zıt bir yer değiştirme artan şekilde devam etmekte 10 nolu okuma noktasından itibaren kule tepe noktasına kadar bu yer değiştirme azalmıştır. 80° açıda 9 nolu okuma noktasına kadar kule merkezine doğru bir yer değiştirme artan şekilde devam etmekte olup, 10 nolu okuma noktasından itibaren kule tepe noktasına kadar bu yer değiştirme azalmıştır. 180° açıda ait grafikler incelendiğinde -40°C sıcaklığa ait yer değiştirme grafiğinde 10 nolu okuma noktasına kadar negatif tarafta kalma yani rüzgâr yönünde hareket eğilimindeyken kule tepe noktasında rüzgâr yönünde yer değiştirme

gerçekleştirmiştir. Y yönüne ait yer değiştirme grafikleri incelendiğinde çapraz sıcaklık grafiği kule tepe noktasına doğru pozitif değer olarak yani kule merkezinde dışa doğru yer değiştirme yaparak diğer sıcaklık değerlerinden ayrılmıştır. Diğer sıcaklık gruplarının da kule üst noktasındaki yer değiştirme değerleri negatif değerler almıştır. Yani kule merkezine doğru yer değiştirme gerçekleştirmiştir.

SONUÇ

Enerji sektöründe büyük önemi olan soğutma kulelerinin farklı rüzgâr yükleri altında değişen kabuk sıcaklığı, kabuk yüksekliği ve ayak yüksekliğinin yapısal davranışa olan etkisinin incelendiği bu çalışmada 120 m, 160 m ve 200 m kule yüksekliğine sahip soğutma kuleleri 18 m ayak yüksekliği için modellenmiştir. Modellerde, iklim ve çalışma koşullarını altındaki kabuk sıcaklığının yapısal davranışla olan etkileşimini inceleyebilmek için -40 °C, +40 °C, 20 °C ve 30-45-60 °C’de değişen kabuk sıcaklığı için 4 farklı sıcaklık şartı için analiz edilmiştir. Analizlerde rüzgâr yükü 37.5 m s^{-1} alınmıştır. Rüzgâr yükü altında boyutsal ve sıcaklık durumlarına göre çeşitlendirilen sayısal modellerin yükseklik boyunca elde edilen yatay yer değiştirme değerleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Bu kapsamda elde edilen veriler incelendiğinde kule yapısının sahip olduğu geometrinin rüzgâr aerodinamiği ile birleştiğinde, yapı kabuğu üzerindeki rüzgâr kuvveti basınç dağılımının yapı davranışı üzerinde etkin olduğu görülmüştür. Çalışmada okuma noktası olarak seçilen 0°, 80° ve 180° açıdaki etkileşim alanları yatay yer değiştirmeleri maksimum şekil değiştirmede, kabuk yan yüzeylerindeki maksimum rüzgâr basınç dağılımı belirleyici olmuştur. Grafik yer değiştirme değerleri incelendiğinde rüzgârın yapıyla ilk bulunduğu 0° açı konumunda beklenen aksine rüzgâra ters istikamette deformasyon gerçekleşmiştir. 80° açıda maksimum rüzgâr basıncı olmasından dolayı buradaki emme 0° açıda dışa doğru itme oluşturur bu da rüzgâra zıt yönde bir yer değiştirme meydana getirmiştir. Bu durum bu tipteki yapılarda beklenen “M” tipi davranışı meydana getirmektedir. Bu sebeple tasarımcı tarafından dikkate alınmalıdır.

Yapı kabuk sıcaklığının yapısal davranışa etkisi için yapılan karşılaştırmalar incelendiğinde -40 °C’ye kadar düşen sıcaklığın yapı kabuğunda meydana gelen kısılma etkisinin özellikle 80° açıdaki rüzgâr basıncı ile birleştiğinde 0° açıda dışa doğru deformasyonu daha da ön plana çıkarmıştır. Bu sebeple 80° açıda iç kabuk için ve 0° açıda dış kabuk için çekme gerilmeleri için dikkat edilmesi gereken bir durum oluşturmuştur.

Yapılan bu çalışmada, sıcaklık ve kabuk yüksekliği birer parametre olarak kullanılmıştır. Kabul edilen kombinasyonlar için en belirgin durum düşük sıcaklık koşullarındaki rüzgâr ile olan etkileşimdir. Elde edilen veriler betonarme yapı malzemesinin kullanıldığı bu çalışmada tasarımcıların bu durumda “M” tipi deformasyon için kabuk çekme bölgelerinde dikkat etmeleri gerektiğidir. Yapılan bu çalışmada zemin rijit kabul edilmiştir. Rüzgâr gibi tekrar periyodu yüksek olan bir dinamik yük durumu için zemin koşullarında, üst yapı ile birlikte modellenip değerlendirilmesi, yapı kabuğundaki şekil değiştirmelerin yapı güvenliği için yorumlanması noktasında daha çok katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Isı iletimi daha fazla olduğundan dolayı çelik konstrüksiyon olarak tasarlanacak soğutma kulelerinde termal etkinin bu yapılardaki öneminden dolayı kaplanması gerekebilir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, zemin durumu da bir parametre olarak analizlere dahil edilebilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- Abedi-Nik F, Sabouri-Ghomi S, 2008. The damaging effects of earthquake excitation on concrete cooling towers. AIP Konferansı, Reggio Calabria.
- Cheng X X, Zhao L, Ge Y J, 2013. Multiple loading effects on wind-induced static performance of super-large cooling towers. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 13 (8): 1-21.
- Ge W, Jun L, Chuan X, Li W G, Zhao Y, 2019. Critical impact factors on the cooling performance design of natural draft dry cooling tower and relevant optimization strategies. *Applied Thermal Engineering*, 154: 614-627.
- Jahangiri A, Borzooee A, Armoudli E, 2019. Thermal performance improvement of the three aligned natural draft dry cooling towers by wind breaking walls and flue gas injection under different crosswind conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 137: 288-298.
- Ke S, Yu W, Zhu, P, Ge Y, Hou X, 2018. Full-scale measurements and damping ratio properties of cooling towers with typical heights and configurations. *Thin-Walled Structures*, 124: 437-448.
- Li X, Gurgenci H, Guan Z, Wang X, Xia L, 2015. A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 150: 250-270.
- Lin F, Li Y, Gu X, Zhao X, Tang D, 2013. Prediction of ground vibration due to the collapse of a 235 m high cooling tower under accidental loads. *Nuclear Engineering and Design*, 258: 89-101.
- Lin F, Ji H, Li Y, Zuo Z, Gu X, Li Y, 2014. Prediction of ground motion due to the collapse of a large-scale cooling tower under strong earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65: 43-54.
- Liu, Z, Zhang C, Ishihara T, 2018. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES. *Journal of Fluids and Structures*, 81: 656-672.
- Ma H, Li Z, Fan F, 2019. Static performance analysis of single-layer steel cooling tower. *Structures*, 19: 322-332.
- Noh C, 2006. Nonlinear behavior and ultimate load bearing capacity of reinforced concrete natural draught cooling tower shell. *Engineering Structures*, 28(3): 399-410.
- Sabouri-Ghomi S, Abedi-Nik F, Roufegarinejad A, Bradford M A, 2006. Numerical study of the nonlinear dynamic behaviour of reinforced concrete cooling towers under earthquake excitation. *Advances in Structural Engineering*, 9(3): 433-442.
- TS EN 1991-1-4, 2007. Yapılar Üzerindeki Etkiler Bölüm 1-4: Genel Etkiler-Rüzgâr Etkileri Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN IEC 61400-1, 2019. Rüzgâr Enerjisi jeneratör sistemleri- Bölüm 1: Tasarım kuralları Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Wang H, Ke S T, Ge Y J, 2019. Research on non-stationary wind-induced effects and the working mechanism of full scale super-large cooling tower based on field measurement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184: 61-76.
- Ye F, 2015. Local buckling analysis of thin-wall shell structures. Hollanda: Delft University of Technology, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış)
- Yu Q-Q, Gu X-L, Li Y, Lin F, 2016. Collapse-resistant performance of super-large cooling towers subjected to seismic actions. *Engineering Structures*, 108: 77-89.
- Zhang J.-F, Ge Y.-J, Zhao L, Zhu B, 2017. Wind induced dynamic responses on hyperbolic cooling tower shells and the equivalent static wind load. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169: 280-289.