

ÇELİK RÜZGAR TÜRBİNİ KULELERİNİN KAPI VE HAVALANDIRMA AÇIKLIKLARININ BURKULMA AÇISINDAN OPTİMİZASYONU

Charis J. Gantes^{1*}, Stelios Vernardos¹, Konstantina G. Koulatsou¹, Aysel E. Doğanlı², Onur Güneş²

¹School of Civil Engineering, Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens

²Ateş Wind Power, İzmir, Türkiye

*chgantes@central.ntua.gr

ÖZET

Rüzgar türbini kulelerinin yüksekliği ve kanatların uzunlukları arttıkça; kule üzerindeki etkiler de artar, güvenli ve uygun maliyetli tasarımları rüzgar enerjisi sektörünün geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Boru şeklindeki çelik kulelerin potansiyel bir kırılma mekanizması, kabuk lokal burkulmasıdır. Kapı ve havalandırma açıklıklarının yakınındaki alanlar lokal olarak zayıflar ve bu nedenle öncelikle lokal burkulmaya eğilimlidir. Bu makalede, boru şeklindeki bir çelik rüzgar türbini kulesinin burkulma davranışı, bu tür açıklıkların yakınındaki burkulma tepkisine odaklanarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri ve kusurları (GMNIA) hesaba katan doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılır. GMNIA, ilgili burkulma modlarından kaynaklanan şekillerle ilk geometrik kusurları dikkate alarak gerçekleştirilir. Farklı rüzgar yönleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, kapı çevresinin güçlendirilmesinin kule burkulma mukavemetine etkisini araştırmak için, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş açıklıkların farklı alternatifleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi, uygun maliyetli yenilenebilir enerjinin olgunlaşmış bir türü olarak büyük ilgi gördüğünden, rüzgar türbinleri ile ilgili araştırmalar sürekli olarak daha ilgi çekici hale gelmektedir. Mevcut rüzgar potansiyelinden daha fazla yararlanmak için rüzgar türbini kule yükseklikleri ve kanat uzunlukları artmaktadır. Bunun sonucu olarak, kule üzerindeki etkiler de artmakta, rüzgar enerjisi sektörünün daha da gelişmesi için güvenli ve uygun maliyetli kule tasarımları önem arz etmektedir.

Son yıllarda rüzgar türbin kulelerinin en yaygın türü, silindirik ve/veya konik halkalardan oluşan çelik kulelerdir. Türbin kule yapısı, (i) çelik levhaların istenilen silindirik ve/veya konik şekle uygun olarak soğuk-bükümü, (ii) genellikle 2.5 m ila 3.0 m uzunlukta kapalı halka oluşturacak şekilde çelik levhaların iki kenarının birbirine kaynaklanması, (iii) üretilen bu halkaların, taşınabilirlik kısıtlamaları sebebiyle 20 m ile 30 m uzunlukta kule parçaları oluşturacak şekilde kaynakla birleştirilmesi, (iv) bu parçaların türbin sahasına taşınması, vinçler vasıtasıyla kaldırılarak flanşlardan öngerilmeli cıvatalarla birbirine bağlanması ile elde edilir.

Kulenin alt kısmında, elektrik ve mekanik parçaların bakımını sağlamak üzere kulenin iç kısmına ve merdiven ve asansör ile kule üst kısmına erişim için bir kapı açıklığı mevcuttur (Şekil 1). Bir çok durumda da, farklı yüksekliklerde havalandırma açıklıkları da bulunmaktadır. (Şekil 2). Bu tür açıklıklar, kule kabuğunu zayıflatarak, rijitliğin azalmasına, gerilme konsantrasyonlarına ve lokal burkulma tehlikesinin artmasına neden olur. Kapı boşluğunun olumsuz etkilerini engellemek için kalınlığın artırılması ve çevresel çerçeve ve/veya güçlendiricilerin yerleştirilmesi gibi farklı yöntemler kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 1. Kapı açıklığı görseli (a) üretim sırasında (b) üretim sonrası



(a)



(b)

Şekil 2. Havalandırma açıklığı görseli (a) üretim sırasında (b) üretim sonrası

Güçlendirilmemiş veya güçlendirilmiş açıklıkların, modern rüzgar türbin kulelerine karşılık gelen geometri ve narinliğe sahip silindirik çelik kabukların bükülmeye neden olan statik yüklere dayanımı üzerindeki etkisi, hem deneysel hem de sayısal olarak [1-3] ve dinamik yükler altında [4-8] incelenmiştir.

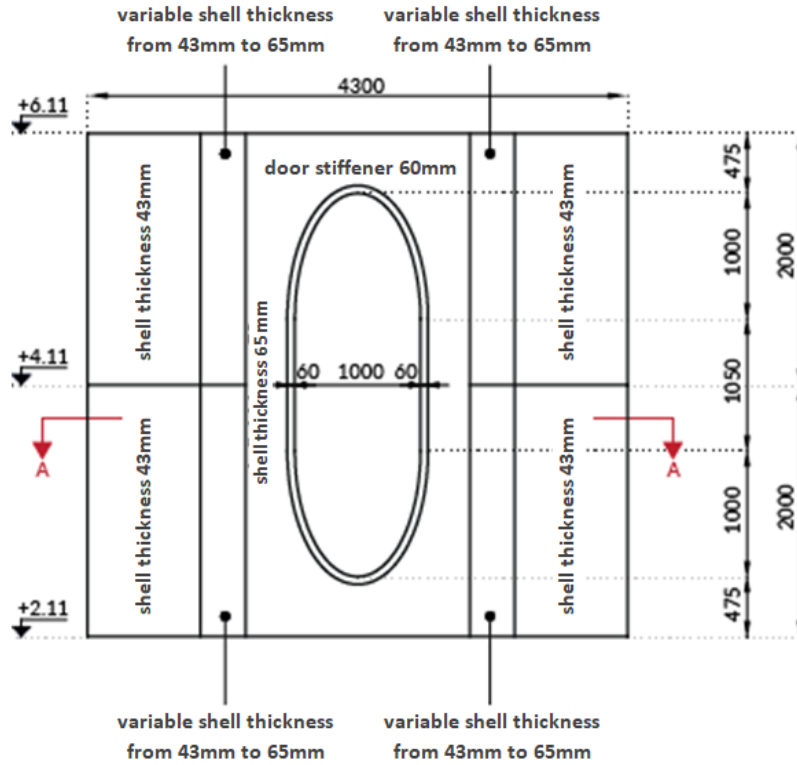
Genel olarak, rüzgar yükleri en yaygın iki tür yapısal göçme mekanizmasının nedenidir, ya kule yapısının burkulma kırılması veya birleşimlerdeki yorulma kırılmasıdır. Kule tasarım sorunları [8-20] 'de ele alınmıştır. Ayrıca, rezonans sorunları ciddi yüksekliklere ve kütlelere sahip rüzgar türbin kuleleri için kritik olabilmektedir [21,22].

Bu araştırmanın amacı, silindirik şekilli bir rüzgar türbin kulesinin gerçekçi rüzgar yükleri altında burkulma davranışını ve daha spesifik olarak, türbin kapı ve havalandırma açıklıklarının yakınındaki burkulma tepkisini araştırmaktır. Bu amaçla, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri ve kusurları (GMNIA) hesaba katan doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Böylelikle EN1993-1-6 standardına göre analitik yöntemle ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile sayısal doğrulama yoluyla önceki burkulma araştırmalarını tamamlayıcı niteliktedir [23-25].

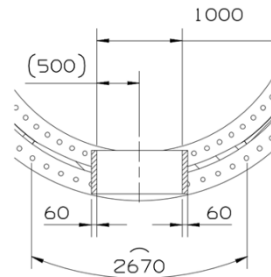
2. KAPI AÇIKLIĞI

2.1 Geometrik Özellikler

Mevcut çalışmada yaklaşık 120 m yüksekliğe sahip bir rüzgar türbin kulesi kullanılmıştır. Altı silindirik ve bir konik parça olarak fabrikadan sahaya taşınan kule, sahada ön germe uygulanan cıvatalar aracılığıyla birleştirilmektedir. Alt altı parça, $D_{ext}=4300$ mm'ye eşit sabit bir dış çapa sahipken, et kalınlıkları kulenin yüksekliği boyunca tabanda $t=60$ mm'den üstte $t=17$ mm'ye kadar değişmektedir. Kapı boşluğu kulenin tabanında yer alır ve Şekil 3'te gösterilen geometriye sahiptir.



(a) Türbin kapısının ön görünümü (birimler mm)



(b) Türbin kapısının yatay kesiti (kesit A-A, birimler mm)

Şekil 3. İncelenen rüzgâr türbin kulesinin geometrisi

2.2 Sayısal Model

Kulenin tüm parçalarını 3 boyutlu katı sonlu elemanlarla modellemek ideal olsa da, aşağıda açıklandığı gibi kabuk sonlu elemanlar kullanılarak daha sade ve kullanımı kolay bir sayısal model uyarlanmıştır. Sonlu elemanların farklı türleri ve ağ örgüleri ile ilgili bir araştırmada ele alınmıştır [23].

Yukarıda açıklandığı gibi, burkulma araştırması rüzgar türbin kulesinin kapı alanı ile sınırlandırılmıştır ve bu alandaki burkulma potansiyelini değerlendirmek için sayısal model, rüzgar türbininin tabanından kapı üzerindeki ilk flanş bağlantısına kadar olan kısmı modellenmiştir.


Kule kabuğu, kabuk elemanları ile modellenirken, flanşlar, her iki flanşın kesitini temsil eden giriş elemanları ile birlikte hareket ettiği varsayılarak, rijit elemanlar vasıtasıyla flanş eksenine ile kabuk orta yüzeyi arasındaki geometrik eksantriklik dikkate alınarak modellenmiştir. Şekil 3'te gösterilen değişken kabuk kalınlığına sahip parçaların konservatif bir şekilde parçaya ait en ince et kalınlığı ile modellendiğine dikkat edilmelidir.

Alt kabuk kısmı zemine sabitlenirken, ikinci halka flanş bağlantısının bulunduğu üst kısım serbesttir. Modelin üst kısmındaki tüm düğüm noktaları, yüklerin uygulandığı kulenin geometrik merkezindeki bir referans noktasına rijit şekilde bağlıdır.

2.3 Yük Değerleri

Kulenin burkulma davranışını araştırmak için normal ve ekstrem koşullar altındaki gerçekçi hareket etkileri dikkate alınmıştır. Bölüm 2.2'de açıklanan sayısal modelin üst flanşında rijit olarak tanımlanmış referans noktasına etkiyen tasarım kuvvetleri ve momentleri, Tablo 1'de sunulmuştur. Analizlerde kolaylık açısından burulma momentleri hariç tutulmuştur.

Tablo 1. Dizayn yükleri

	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)
	-1225	-7840	135950

2.4 Analiz Metodu

İlk olarak, sonlu elemanlar programı ADINA v.9.6 kullanılarak lineer burkulma analizleri (LBA) gerçekleştirilmiştir. LBA'dan elde edilen kritik burkulma yüklerinin, malzemenin akması ve kusurlarının etkisi dikkate alınmadığı için dayanıklılığı temsil etmediği belirtilmiştir. Bu tür analizleri gerçekleştirmenin amacı, daha sonra doğrusal olmayan analizler için başlangıç malzeme kusurları kullanılarak burkulma modlarını elde etmektir [25].

Daha sonra, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri içeren ve kusurları (GMNIA) hesaba katan doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. GMNIA'dan elde edilen nihai yükler dayanıklılığı temsil eder ve dikkate alınan alternatif koşulların karşılaştırılması için uygun bir ölçüdür [25].

Sonlu elemanlar modeli, 40 ila 90 mm arasında değişen, farklı uzunluklarda yaklaşık 19000 kabuk elemandan oluşmaktadır. Sayısal ağ yapısı (meshing), hem nihai yük hem de genel davranış açısından önemli bir farklılık yaratmayacak şekilde bir hassasiyet analizi ile son haline getirilmiştir. Yükler yarı statik (quasi-static) şekilde uygulanmış ve modelin çökme öncesi ve sonrası doğrusal olmayan denge eğrilerini elde etmek için yay uzunluğu yöntemi (arc-length method) kullanılmıştır. Analizler, 64 GB RAM'e sahip bir Intel Xeon 2.20 GHz CPU üzerinde çalıştırılmış ve her bir doğrusal olmayan analiz için gereken süre 5 ila 10 dakika arasında gerçekleşmiştir.

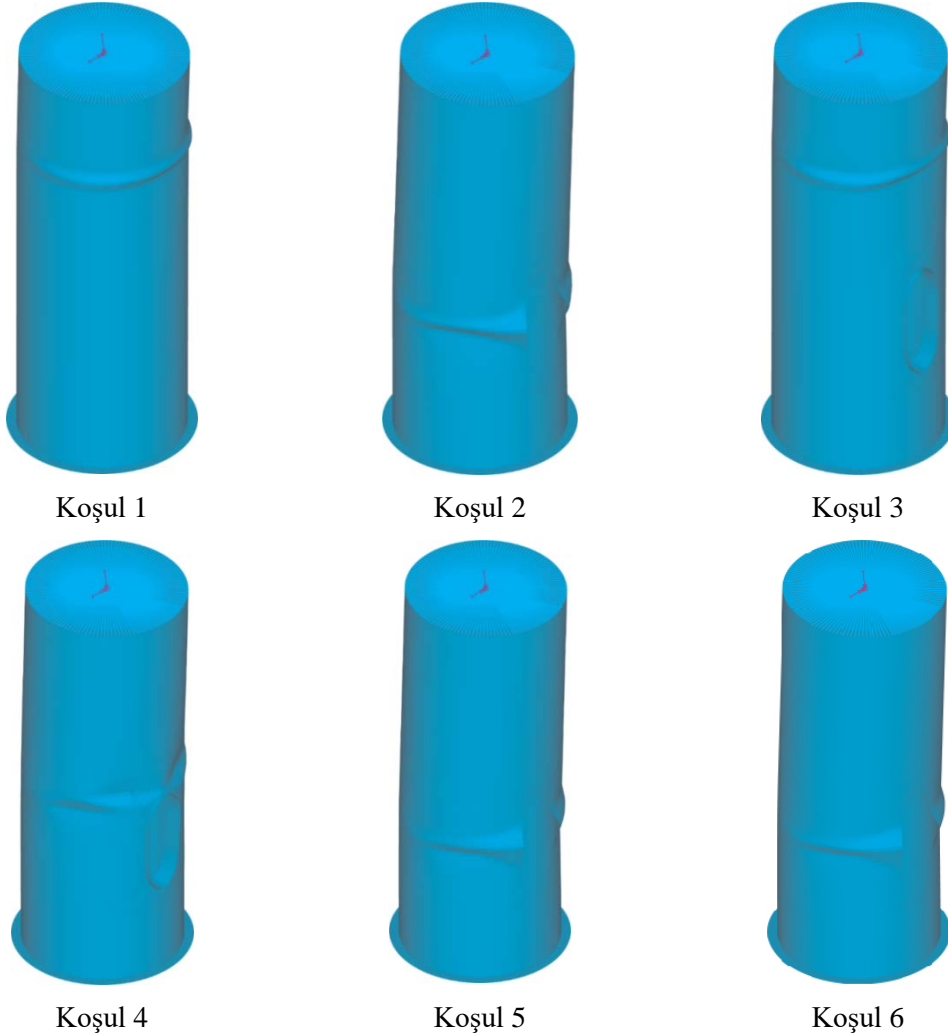
2.5 Analiz Koşulları

Karşılaştırma amacıyla, altı (6) alternatif konfigürasyon analiz edilmiştir:

- Koşul 1: Açıklığın olmaması (Kapı açıklığına ihtiyaç duyulmadıysa, teorik durum)
- Koşul 2: Açıklık var- kalınlaştırma yok - güçlendirme yok (Şekil 3'teki temel tasarımla aynı, ancak güçlendirilmiş çerçeve yok ve kalınlaştırma yok)
- Koşul 3: Açıklık var- kalınlaştırma var- güçlendirme var (Şekil 3'teki temel tasarımın aynısı)
- Koşul 4: Açıklık var- kalınlaştırma yok - güçlendirme var (Şekil 3'teki temel tasarımla aynı, ancak kalınlaştırmaz, sadece güçlendirme çerçevesi)
- Koşul 5: Açıklık var- kalınlaştırma var- güçlendirme yok (Şekil 3'teki temel tasarımla aynı, ancak güçlendirme çerçevesiz, sadece kalınlaştırma var)
- Koşul 6: Açıklık var- 75 mm kalınlaştırma var- güçlendirme yok (Şekil 3'teki temel tasarımla aynı, ancak güçlendirme çerçevesi yok, yalnızca 65 mm yerine 75 mm kalınlığa sahip)

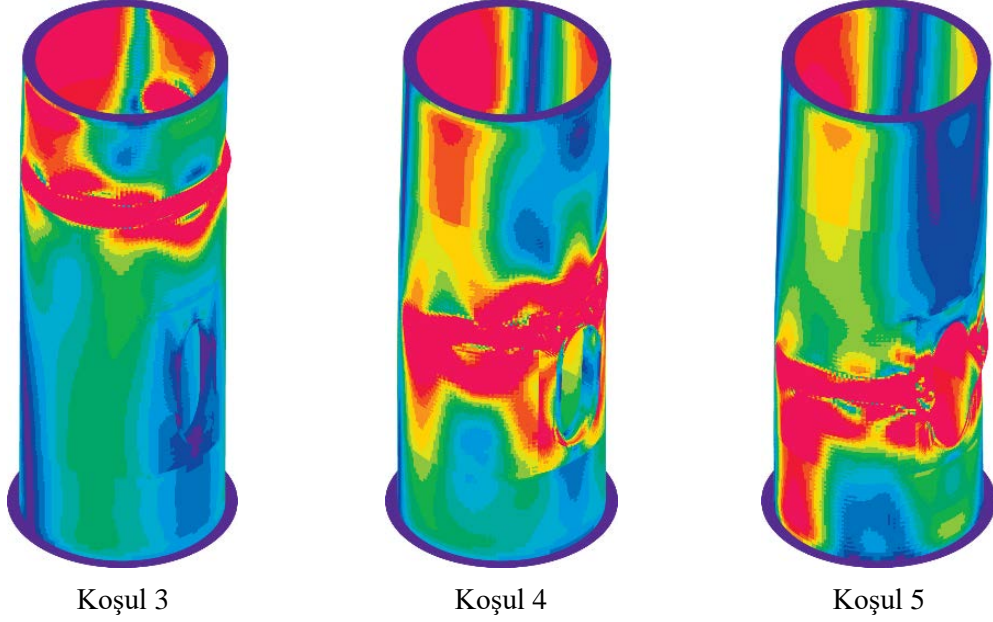
2.5 Analiz Sonuçları

Dikkate alınan koşullar altında GMNIA'dan elde edilen deforme olmuş türbin konfigürasyonları Şekil 4'te gösterilmiştir. Kapı açıklığının varlığı ve güçlendirme tipinin yerel burkulmanın yerini ve türünü nasıl etkilediği dikkat çekmektedir.



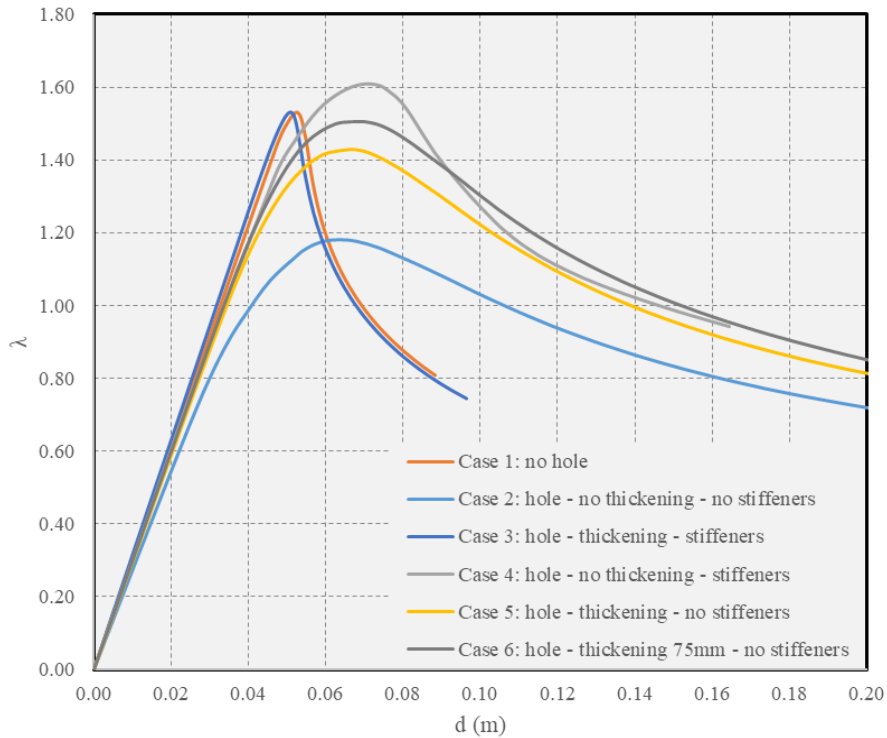
Şekil 4. Farklı koşullar için GMNIA'dan alınan göçme anındaki deformasyon şekilleri

Ayrıca, GMNIA 'dan elde edilen 3, 4 ve 5 numaralı koşullar için göçme anındaki Von Mises gerilme dağılımları Şekil 5'te gösterilmiştir. Kırmızı renkle gösterilen gerilme konsantrasyonları, Şekil 4'teki deforme olmuş modellerdeki buruşmaların meydana geldiği bölgelere karşılık gelmektedir.



Şekil 5. Farklı koşullar için GMNIA'dan alınan göçme anındaki stres dağılımları

Son olarak, dikkate alınan tüm durumlar için GMNIA'dan elde edilen denge eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur. Dikey ekseninde, Tablo 1'de listelenen tasarım yüklerinin yük çarpanı, yatay eksen ise kulenin modellenen kısmına ait tepe noktasındaki yanal yer değiştirmesi gösterilmiştir.



Şekil 6. Alternatif koşulların GMNIA'dan elde edilen denge eğrileri

2.6 Değerlendirme

Şekil 6'nın denge eğrileri incelendiğinde, dikkate alınan tasarım yüklerinden ($\lambda=1$) daha yüksek değerlere ulaştığı çıkarımı yapılmıştır. Bu nedenle, burkulma açısından tüm tasarımların kabul edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Temel tasarımın (Koşul 3), açıklığın bulunmadığı Koşul 1 ile denge eğrileri neredeyse aynı olduğundan, kapı açıklığı nedeniyle oluşan rijitlik ve dayanıklılık kaybı tamamen tolere edilebilmektedir. Şekil 4 incelendiğinde, 1 ve 3 numaralı koşullarda burkulmanın aynı yerde meydana geldiği, diğer dört koşul altında ise burkulmanın aşağı tarafta oluştuğu görülmektedir.

Güçlendirme olmayan ve kalınlaştırma uygulanmayan Koşul 2'nin denge eğrisi, diğer koşulların eğrileri ile karşılaştırıldığında daha altta kalmaktadır, tavsiye edilmemektedir ve sadece karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir. Ayrıca bu koşulda rijitlik kaybı çok daha düşük yük seviyelerinde başlamıştır, bu da rezonans açısından istenmeyen bir durumdur. Diğer tüm eğriler, $\lambda=1$ 'e kadar hemen hemen aynı rijitliği korumaktadır, bu da titreşim frekanslarının hepsi için neredeyse aynı olacağı anlamına gelmektedir, dolayısıyla bu çözümler rezonans kontrolü açısından eşdeğerdir.

Güçlendirme çerçeveli ancak kalınlaştırma uygulanmayan Koşul 4, temel tasarımla aynı başlangıç rijitliğine sahiptir ve daha düşük yüklerde rijitliğini kaybetmeye başlamakta olup, biraz daha yüksek dayanıma sahiptir ve limit noktasından sonra daha yavaş azalma eğilimindedir ve daha yüksek süneklik anlamına geldiği için faydalıdır. Genel olarak, temel tasarımdan daha iyi yapısal davranış sergilmektedir.

Kalınlaştırma uygulanmış ancak güçlendirme çerçevesinin bulunmadığı Koşul 5, diğer koşullarla benzer başlangıç rijitliğine sahiptir, daha düşük yük değerlerinde rijitliğini kaybetmeye başlamaktadır. Daha düşük dayanıma sahip olsa da limit noktasından sonra daha yavaş azalma eğilimindedir, dolayısıyla daha yüksek süneklik gösterir. Genel olarak, yeterli davranışı göstermemektedir.

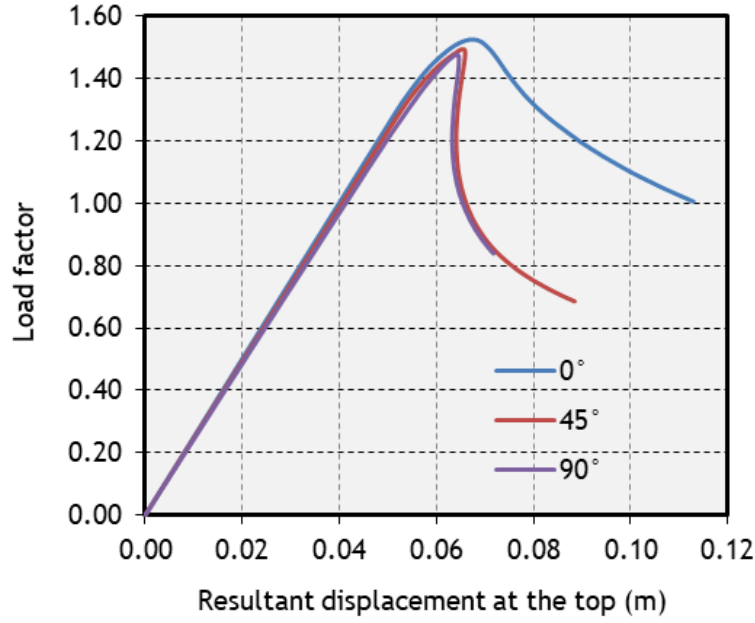
Bununla birlikte, kapı plakası kalınlığı 65 mm'den 75 mm'ye arttırılırsa (Koşul 6), eğri yukarı doğru kayar ve temel tasarımla aynı dayanıma ulaşmaktadır. Güçlendirme çerçevelerin ayrı olarak tedarik edilmesi ihtiyacı ve gerekli kaynak eforu göz önüne alındığında, güçlendirme çerçevesinin ortadan kaldırılması, imalat açısından tercih edilmektedir.

Son olarak, bu incelemede yorulma analizlerinin dikkate alınmadığı belirtilmiştir. Çözümü yapılan farklı analiz koşulları sadece burkulma açısından ve dolaylı olarak da rezonans açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kaynaklı güçlendirme çerçevesinin ortadan kaldırılmasının faydalı olacağını yorulma analizleriyle doğrulaması yapılabildiği beklenmektedir.

3. HAVALANDIRMA AÇIKLIĞI

3.1 Geometri

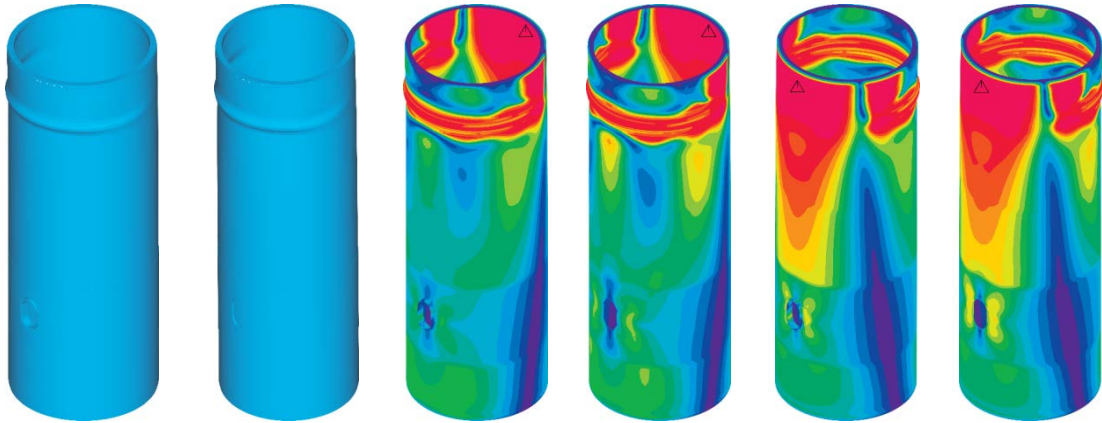
Şekil 7'de gösterilen geometri dikkate alınarak havalandırma açıklıkları için kapı açıklıklarına benzer bir araştırma yapılmıştır. Bu örnekte, kule tabanının yakınında bir kesitin iki ucunda iki havalandırma açıklığı modellenmiştir. Sayısal modelleme ve analiz, Bölüm 2'de kapı açıklıkları için oluşturulan analiz modeli ile aynı şekilde yapılmıştır.



Şekil 9. Dikkate alınan rüzgâr yönleri için denge eğrilerinin karşılaştırılması

3.4 Güçlendirme plakalarının etkisi

İlk olarak kule bölümünün tepkisi, havalandırma açıklığı etrafında çerçeve olma ve olmama durumları için, deformasyon şekil ve büyüklükleri, Von Mises gerilme dağılımları ve yük-yer değiştirmelerine bağlı olarak karşılaştırmalı sunulmuştur (Şekil 10 ve 11). Kule bölümünün en üst kısmındaki yerel burkulma nedeniyle göçme meydana gelmiştir. Basınç ve çekmeye çalışan her iki bölgede de akma tespit edilmiştir. Çerçevelerin varlığına bağlı kayda değer bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir.

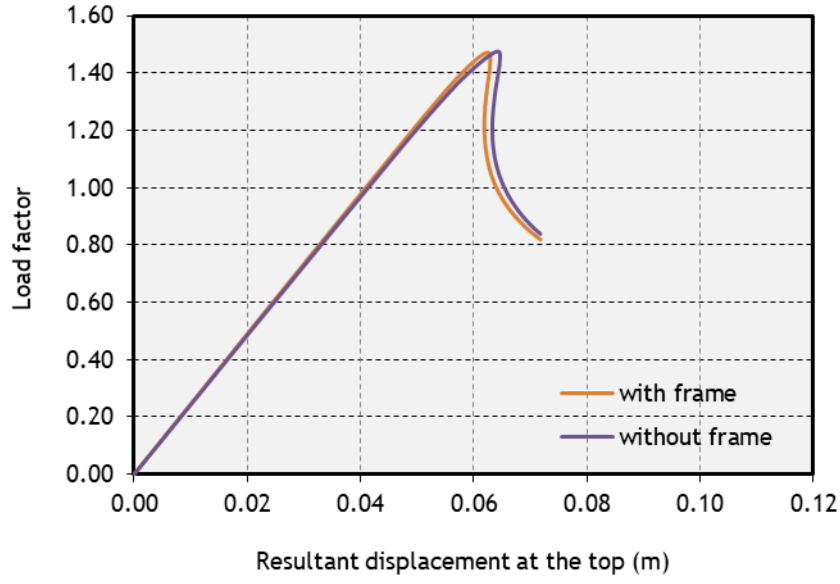


Çerçevesiz (sağ) ve çerçevesiz (sol) deformasyon şekli

Basınç bölgesindeki Von-Mises stres dağılımı, çerçevesiz (sağ) ve çerçevesiz (sol)

Çekme bölgesindeki Von-Mises stres dağılımı, çerçevesiz (sağ) ve çerçevesiz (sol)

Şekil 10. Göçme anında güçlendirme çerçevesi olma ve olmama durumları için gerilme dağılım ve deformasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 11. Güçlendirme çerçevesiz ve çerçevesiz sistemlerin denge eğrilerinin karşılaştırılması

3.5 Plaka Kalınlığının Etkisi

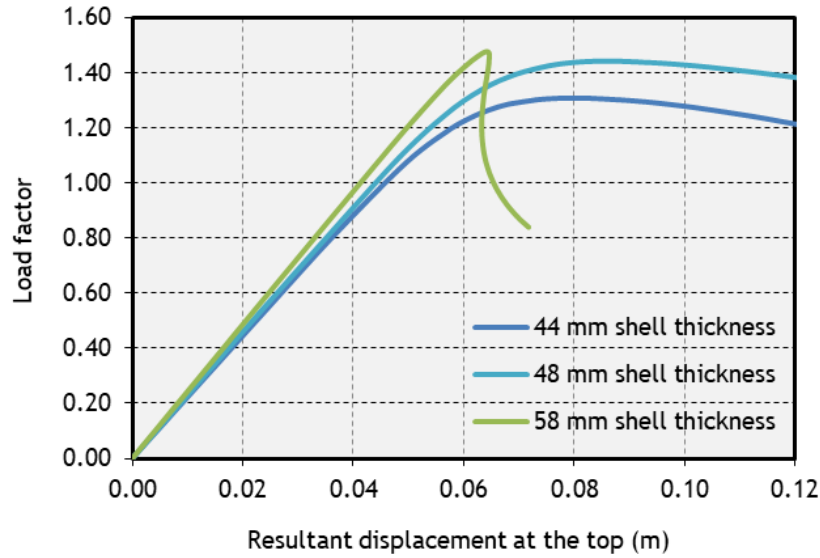
Her iki havalandırma açıklığındaki çerçeveler çıkarılarak, havalandırma açıklıklarını taşıyan plakaların kalınlığı incelenmiştir. 44 mm (alt parçanın kabuk kalınlığı ile aynı), 48 mm ve 58 mm'lik plaka kalınlıkları için yapılan üç analizin sonuçları, Şekil 12 ve 13'te gösterilmektedir. Plaka kalınlığının düşürülmesinin, daha sünek bir davranış ve azalan bir nihai yük ve rijitlik ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 48 mm kalınlıkta, daha az malzeme ve artan sünekliğin faydalarına karşın, nihai yükte ve rijitlikteki küçük bir azalma görülmektedir.



(Soldan sağa) çerçevesiz, 44 mm, 48 mm ve 58 mm plaka kalınlığındaki modellerin deformasyon şekilleri

(Soldan sağa) çerçevesiz 44 mm, 48 mm ve 58 mm plaka kalınlığındaki modellerin basınç bölgesindeki Von-Mises gerilme dağılımları

Şekil 12. Güçlendirme çerçevesiz, değişken kapı plakası kalınlıkları için göçme anındaki deformasyon ve gerilme dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 13. Güçlendirme çerçevesiz, değişken kapı plakası kalınlıkları için denge eğrilerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Üzerinde açıklıkların mevcut olduğu durumda silindirik çelik rüzgar türbin kulelerinin burkulma davranışı, doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Türbin kapısı olarak kullanılan büyük açıklıkların yanı sıra havalandırma için kullanılan daha küçük açıklıklara da değinilmiştir. Açıklıkların varlığı, gerilme konsantrasyonun ve yerel burkulma tehlikesinin artmasına neden olur. Kapı çevresinde kullanılan güçlendirme çerçevesi, daha kalın bir kapı plakası veya ikisinin kombinasyonu kullanılarak alternatif güçlendirme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, açıklık nedeniyle azalan rijitliği ve dayanımı geri kazanmak için oldukça kalın bir kapı plakasının yeterli olduğunu ve imalat açısından daha pahalı ve külfetli olan güçlendirme çerçevesinin ortadan kaldırılabileceğini göstermektedir. Deneysel çalışmalarla ve yorulma açısından doğrulanmasıyla, rüzgar türbin kulesi imalat zamanını ve maliyetini azaltmaya yönelik çalışmalara yönelik yenilikçi bir yaklaşım sağlayabilir.

REFERANSLAR

- [1] **Dimopoulos, C.A., Gantes, C.J.,** (2012) *Experimental Investigation of Buckling of Wind Turbine Tower Cylindrical Shells with Opening and Stiffening under Bending*. Thin-Walled Structures, 54, p. 140-155.
- [2] **Dimopoulos, C.A., Gantes, C.J.,** (2013) *Comparison of Stiffening Types of the Cutout in Tubular Wind Turbine Towers*. Journal of Constructional Steel Research, 83, p. 62–74.
- [3] **Dimopoulos, C.A., Gantes, C.J.,** (2015) *Numerical Methods for the Design of Cylindrical Steel Shells with Unreinforced or Reinforced Cutouts*. Thin-Walled Structures, 96, p. 11-28.
- [4] **Dimopoulos, C.A., Koulatsou, K.G., Petrini, F., Gantes, C.J.,** (2015) *Assessment of Stiffening Type of the Cutout in Tubular Wind Turbine Towers under Artificial Dynamic Wind Actions*. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics (ASME), 10(4), 041004-1 - 041004-9.

- [5] **Brogan, F., Almorh, B.O.**, (1970) *Buckling cylinders with cutout*. AIAA, 8 (2), p. 236-240.
- [6] **Almorh, B.O., Holmes, A.M.C.**, (1972) *Buckling of shells with cutouts, experiment and analysis*. International Journal of Solids and Structures, 8, p. 1057-1071.
- [7] **Bennet, R., Dove, R.C., Butler, T.A.**, (1981) *An investigation of buckling of steel cylinders with circular cutouts reinforced in accordance with ASME RULES*. Rep. Los Alamos Scientific Laboratory, NUREG/CR-2165 LA-8853-MS.
- [8] **Salmi, P., Ala-Outinen, T.**, (1997) *Cylindrical shell structures from austenitic stainless under meridional compression*. Rep. VTT 1897 – Technical Research Centre of Finland.
- [9] **Calladine, C.R.**, (1980) *Theory of Shell Structures*. Cambridge University Press.
- [10] **Teng, J.G., Rotter, J.M.**, (2004) *Buckling of Thin Metal Shells*. Spon Press, London.
- [11] **Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G.D., Hondros, I.D., Karamaneas, H., Karabalis, D. L., Beskos, D. E.**, (2002) *Static, Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower*. Engineering Structures, 24, p. 1015-1025.
- [12] **Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis, I.N., Baniotopoulos, C. C.**, (2013) *Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1-MW wind turbine tower*. Engineering Structures, 25, p. 1097-1106.
- [13] **Zhao, Z., Dai, K., Camara, A., Bitsuamlak, G., Sheng, C.**, (2019) *Wind Turbine Tower Failure Modes under Seismic and Wind Loads*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 33 (2).
- [14] **Petersen, C.**, (1993) *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. Vieweg.
- [15] **Petersen, Ch.**, (1998) *Nachweis der Betriebsfestigkeit exzentrisch beanspruchter Rinf-flanschverbindungen*, Stahlbau, 67, Heft 3.
- [16] **Wang, Y.Q., Zong, L., Shi, Y.J.**, (2013) *Bending Behavior and Design Model of Bolted Flange-Plate Connection*, Journal of Construction Steel Research, 84, p. 1-16.
- [17] **Hoang, V.L., Jaspert, J.P., Démonceau, J.F.**, (2013) *Behavior of Bolted Flange Joints in Tubular Structures under Monotonic, Repeated and fatigue Loadings I: Experimental Tests*, Journal of Construction Steel Research, 85, p. 1-11.
- [18] **Nussbaumer, A., Borges, L., Davaine, L.**, (2018) *Fatigue Design of Steel and Composite Structures*, 2nd edition, ECCS-European Convention for Structural Steelwork.
- [19] **Mikitarenko, M.A., Perelmuter, A.V.**, (1998) *Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibrations*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p. 74-76, 1091-1100.
- [20] **Nuta, E., Christopoulos, C., Packer, J.A.**, (2011) *Methodology for seismic risk assessment for tubular steel wind turbine towers: application to Canadian seismic environment*. Canadian Journal of Civil Engineering, 38, p. 293–304.
- [21] **Takewaki, I.**, (1996) *Optimal Frequency Design of Tower Structures via an Approximation Concept*. Computers and Structures, 58 (3), p. 445-452.
- [22] **Takewaki, I.**, (1997) *Efficient Optimal Frequency Design of Elastically Supported Distributed-Parameter Cantilevers*. Computers and Structures, 62 (1), p. 107-117.
- [23] **Koulatsou, K.G., Chondrogiannis, K.-A., Gantes, C.J.**, (2019) *Structural Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers with Respect to Buckling*. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019, *Form and Force*. Spain, p. 823-830.
- [24] **European Committee for Standardization.**, (2007), *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.6: Strength and Stability of Shell Structures*.
- [25] **Gantes, C.J., Fragkopoulos, K.A.**, (2010) *Strategy for Numerical Verification of Steel Structures at the Ultimate Limit State*, Structure & Infrastructure Engineering, 6, p. 225–255.