

RÜZGAR TÜRBİNİ TEMELLERİNDE SIK KARŞILAŞILAN YAPISAL PROBLEMLER

Mert Genç¹, Merve Gündoğan², Özgür Girgin³

^{1,2,3} Genoser Yapı Mühendisliği

¹ mert@genoser.com , ²gundogan.merve@ogr.deu.edu.tr ³ozgur.girgin@ogr.deu.edu.tr

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda önemli bir gelişme göstermiştir. Fosil yakıtların tükeneneğinin bilinmesi, iklim değişikliği ve çevresel kirlilik gibi nedenlerle, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi günden güne artmaktadır. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi de önemli bir yere sahiptir ve dünya genelinde birçok rüzgar türbini kurulmuştur. Ancak, rüzgar türbinleri gibi yapıların da zamanla aşınması ve hasar görmesi kaçınılmazdır. Özellikle kule-temel bağlantısı hasar mekanizması, rüzgar türbinlerinde yaygın bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Kule-temel bağlantısındaki hasarın onarımı, türbinlerin ömrünün uzatılması açısından önemlidir. Büyük yapısal kusurları bulunan rüzgar türbinlerinde ise, bu tip onarımlar uygun değildir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinde yapı sağlığı izleme (YSİ) önemli bir role sahiptir. YSİ sayesinde, rüzgar türbinlerinin hasar durumu belirlenip güçlendirme yapılabilir. Güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası YSİ yapılarak, yapılan güçlendirmenin verimliliği de kontrol edilebilmektedir. Rüzgar enerjisi, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olma potansiyeline sahiptir. Ancak, rüzgar türbinlerinin ömrünü uzatmak ve verimliliklerini artırmak için, YSİ ve güçlendirme işlemlerinin de doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Bu sayede, rüzgar enerjisi kaynağı daha uzun süre kullanılabilir ve çevreye daha az zarar verilmektedir. Bu çalışmada, sahada karşılaşılan gerçek problemler ile pratikte yapılan hatalı uygulamalar hakkında bilgi verilerek, bu konuda çalışan inşaat firmaları, tasarımcılar ve yatırımcıların bilgilendirilmesi ve çıkabilecek problem hakkında uyarılması amaçlanmaktadır.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların gelecekte tükeneceği ve bu yakıtların çevreye verdiği olumsuz etkiler göz önünde bulundurulduğunda, dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim öne çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Rüzgar enerjisi doğal ve tükenmeyen, gelecekte de aynı oranda temin edilebilecek, asit yağmurlarına ve atmosferde ısınmaya neden olmayan, CO₂ emisyonu olmayan, döviz kazandırıcı, çevre dostu bir enerji türüdür. Rüzgar türbinleri kısa sürede inşa edilebilip işletilebilmekte ve istenildiğinde kısa sürede sökülebilmektedir [1].

Dünyada ve ülkemizde kurulu olan rüzgar türbinlerinde iki farklı kule-temel bağlantısı uygulanmaktadır. Eski imalat modeli *olarak gömülü halka (embedded ring)*, yeni imalat modeli olarak ise *çubuk ankraj kule-temel bağlantı* yöntemleri kullanılmaktadır. Rüzgar endüstrisinin pratikte kullandığı, eski tip olarak adlandırılabilir *gömülü kule parçalı rüzgar* türbinleri, ülkemizde de hasarlar ortaya çıkarmaya başlamıştır. Bu nedenle, hali hazırda var olan bu rüzgar türbinlerinin durumunun belirlenip, güçlendirme yönteminin geliştirilmesi konusu önem verilmesi gereken bir konudur.

2. DÜNYA'DA RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÖÇME MEYDANA GELMİŞ KAZALAR

Rüzgar türbinleri servis ömürleri boyunca, bir çok etkiye maruz kalmaktadır. Türbinin kendi tasarımı ve işletmesinden kaynaklı etkiler ve çevresel etkiler, rüzgar türbin sistemi üzerinde

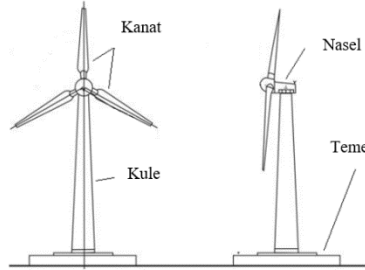
yapısal hasara neden olabilmektedir. Gerçekleşmiş rüzgar türbin kazalarında, en önemli dış etken rüzgardır. Tayfun, kuvvetli rüzgarlar, hortum, fırtına vb. gibi doğa olaylarının, rüzgar türbinlerinde yıkıcı etkiye neden olabildiği çok kez rastlanılan bir durumdur. Örneğin, 2002 yılında kuzey Almanya, Goldensted'de bulunan bir rüzgâr türbininin, şiddetli fırtına altında eksantrik yüklerin zeminin alt tabakasına zarar vermesi sonucu, temelinden sökülerek devrilmesi Şekil 1'de gösterilmiştir [2].



Şekil 1. Goldenstedt Rüzgar Türbininin Göçmesi [2]

3. RÜZGAR TÜRBİNİ VE TEMEL BİLEŞENLERİ

Rüzgar türbinleri dört ana bileşenden oluşmaktadır: Kanat, motor vb. ekipmanları taşıyan nasel, kule, temel ve kule-temel bağlantısı. Bu bileşenleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



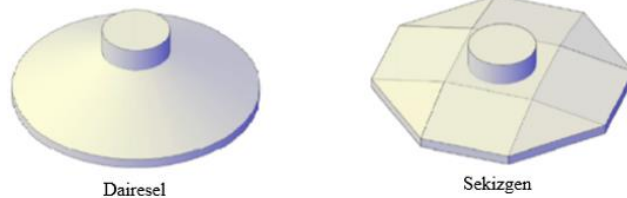
Şekil 2. Bir Rüzgar Türbininin Ana Bileşenleri [2]

Rüzgar türbinleri yaklaşık 20-25 yıl servis ömrüne sahiptir. Zamanla, karasal rüzgar türbinlerinin yeni inşa edilen türbinlerle kıyaslandığında verimi düşmektedir. Bu durum, çevresel etkenler, kanatların, temelin ve kulenin yorulması, zemin oturması, kalitesiz inşaat, kalitesiz bakım, tasarım hataları gibi birçok nedenle olabilir. Bu çalışma, rüzgar türbin temellerinde, **kule-temel bağlantısı** hasarlarını konu almaktadır.

3.1. Karasal Rüzgar Türbini Temel Tipleri

Rüzgar türbin temelleri genel olarak iki tipte inşa edilmektedir. Bunlar, **sığ** (yerçekimine dayalı olanlar gibi) ve **derin** (kazıklı gibi) temellerdir. Zemin koşulları ve türbin boyutlarına bakılarak, türbin için kullanılacak olan temel tipi belirlenmektedir [4]. Yer çekimine dayalı sığ temellerin en çok kullanılan tipi Şekil 3'da gösterilen dairesel ve sekizgen temeldir [5].

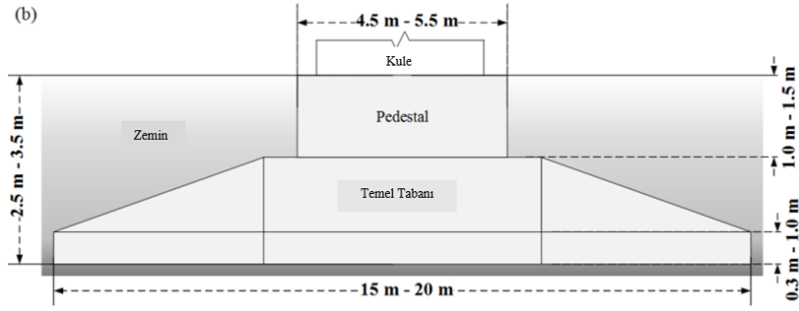
(a)



Dairesel

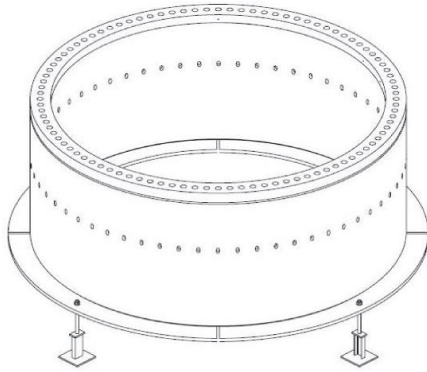
Sekizgen

Şekil 3. (a) En Çok Kullanılan İki Temel Tipi [5]

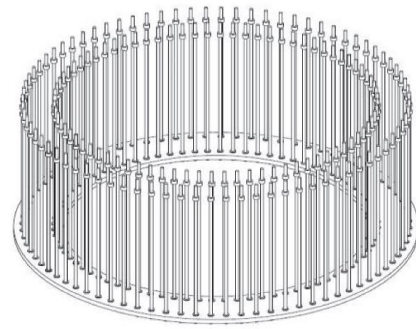


(b) Temel Tipik Boyutları [5]

Karasal rüzgâr türbinlerinde üç tip temel bağlantısı bulunmaktadır (Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6): **Gömülü halka** ve **Ankraj Kafesi** ve **Adaptör (Hibrit)** bağlantısı [6].



a) Gömülü Halka



b) Ankraj Kafesi

Şekil 4. (a) Gömülü Halka ve (b) Ankraj Kafesi Tipi Bağlantı [7]



(a)



(b)

Şekil 5. (a) Gömülü Halka ve (b) Ankraj Kafesi Tipi Bağlantı [8]

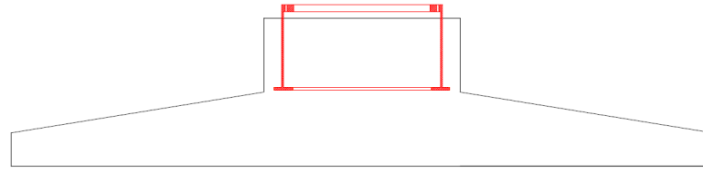


Şekil 6. Adaptör (Hibrit) Bağlantı [6]

3.2. Gömülü-Halka Rüzgar Türbin Temel Bağlantısı ve Özellikleri

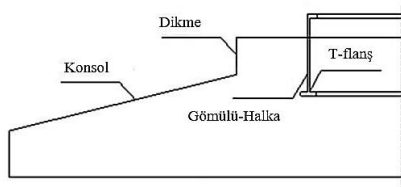
Kule ve temel arasındaki yük aktarımının, kesintisiz olarak sağlanması amacıyla kule ve temel arasında bir bağlantı oluşturulmaktadır. Kule temel bağlantıları, üst yapıdan gelen yükleri, temele aktaran bağlantı elemanları olduğundan, burada oluşabilecek bir hasar, tüm kulenin göçmesine neden olabilmektedir.

Gömülü halka bağlantılı rüzgar türbin temelleri, kurulum ve uygulama kolaylığı nedeniyle, bu türbinlerin kullanılmaya başladığı erken dönemlerde çok sık uygulanmıştır [9]. Türkiye’de ve dünyada hali hazırda kurulu olan, karasal rüzgar türbin temellerinin bir çoğu eski tip olarak nitelendirilebilecek, bu bağlantı şekline sahiptir. Şekil 7’de yer alan rüzgar türbin temel kesitinde gömülü halka bağlantısı, kırmızı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7. Gömülü-Halka Rüzgar Türbin Temeli [2]

Tipik bir gömülü-halkaya sahip rüzgar türbin temel kesit detayı Şekil 8’de gösterilmektedir. Gömülü halkanın alt kısmında, temel betonuyla ankrajlanma etkisinin artırılması için T flanşlar bulunmaktadır. Halkanın üst kısmında yer alan L-flanşlar ise, çelik kuleyi cıvatalar ile halkaya bağlamaktadır.



Şekil 8. Gömülü-halka temelinin yerel yapısı [9]



Şekil 9. Gömülü halka bağlantılı rüzgar türbini [2]

Türkiye’de gömülü-halkaya sahip toplam 2.535 MW kurulu güçte, 842 adet rüzgar türbini bulunmaktadır.

4. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürde rüzgar türbini kule-temel birleşimi, yapı sağlığı izlenmesi, değerlendirmesi ve güçlendirme konularını içeren çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda, daha çok kanat hasarlarına önem verilse de, rüzgar türbin sistemlerinin göçmesinde *yapısal hasarların* da büyük etkisi bulunmaktadır.

2012 yılında sunulan bir raporda, karasal *rüzgar türbin temellerindeki* çatlakların nedenleri ve sonuçları hakkında detaylı bilgiler verilmektedir [8]. Yapılan çalışmada, *gömülü-halka* tipi temele sahip büyük karasal rüzgar türbinlerinde, *yapı sağlığı izleme* sistemi geliştirilmiştir. Sisteme deplasman ölçerler yerleştirilerek, sistemin mevcut durumu hakkında uyarı mekanizması ortaya konmuştur. Yer değiştirme verilerinin incelenmesiyle, sistemde oluşan arızaların daha iyi anlaşılması sağlanacak ve bunların çözümü için uygun yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır [2].

Gömülü halka rüzgar türbin temelleri, kurulum ve uygulama kolaylığı nedeniyle, rüzgar türbinlerinin kullanılmaya başladığı erken dönemlerde çok sık uygulanmıştır. Ancak, son yıllarda bazı gömülü-halka temellerinde farklı hasarlar meydana gelmiştir. Çalışmada, *gömülü-halka rüzgar türbin temellerinin* yaygın hasarlarına dayanarak, bu temellerin yapısal hasarları ve hasar mekanizmaları aşamalı olarak analiz edilmiştir.

5. GERÇEKLEŞEN HASARLARIN OLASI SEBEPLERİ VE HASAR MEKANİZMASI

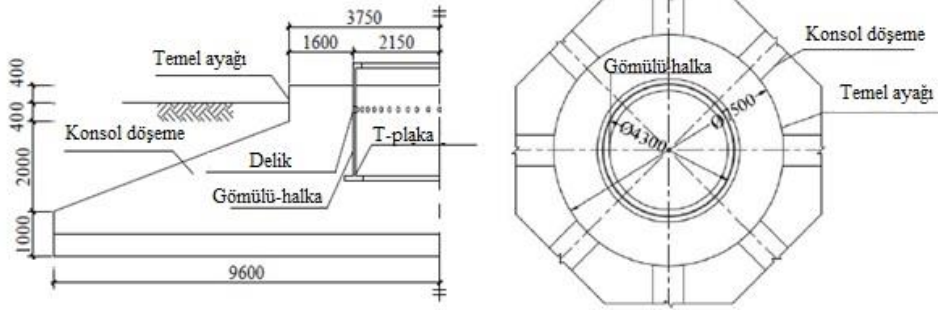
5.1. Karasal Rüzgar Türbin Temellerinde Oluşan Çatlak Tipleri

Bir yapıda çok sayıda nedenle çatlak oluşabilmektedir. Ancak düzgün tasarım, uygun malzeme seçimi, iyi işçilik ve inşaat yapımı ile çatlak oluşumunu en aza indirmek mümkündür. Betonda oluşabilecek çatlak tipleri, sertleşme öncesi ve sertleşme sonrası şeklinde ikiye ayrılabilir. Sertleşme öncesi oluşabilecek çatlaklar; erken donma hasarı, plastik büzülme, plastik oturma, kalıp hareketleri ve taban hareketleri şeklinde olabilmektedir. Sertleşme sonrası oluşabilecek çatlaklar ise, büzüşebilen agregalar, kuruma büzülmesi, yüzey çatlağı gibi fiziksel nedenler, donatı korozyonu, alkali-agrega reaksiyonu, çimento karbonatlanması gibi kimyasal nedenler, donma/erime döngüleri, harici mevsimsel sıcaklık varyasyonları, erken termal etkenler (dış kısıtlar ve iç sıcaklık gradyanları) gibi termal nedenler, kazara fazla yükleme, sünme, tasarım yükü gibi yapısal nedenlerden oluşabilmektedir. Bir temelde yapısal olmayan çatlaklar, yetersiz beton pas payı, düzgün yerleştirilmemiş donatı, yetersiz beton kürü, düşük sıcaklıklarda beton dökümü, beton karışımının doğru olmaması, suyun inşaat sahasında karıştırılması, birleşim bölgelerinde beton dökümü nedeniyle gerçekleşebilir [8].

5.2. Gömülü Halka Bağlantı Tipi Temelerde Yük Transfer ve Çatlak Mekanizması

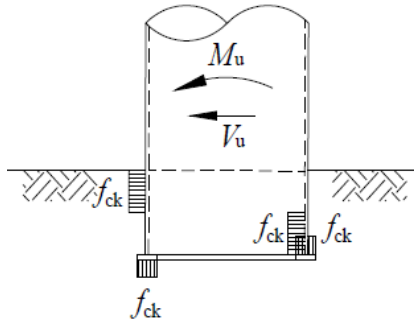
Gömülü halka temelleri, kolay inşa edilmesi ve yüksek eğilme rijitliği nedeniyle tercih edilen bir sistemdir [10]. Rüzgar türbin temelleri, türbinin işletim koşulları altında *eksenel, kayma, eğilme* ve *burkulma* yüklerinin birleşimine maruz kalmaktadır. Bu temellerin, tüm limit yük durumlarının gereksinimlerini karşılaması beklenir. Ancak yorulma yüklerine karşı nasıl dayanım göstereceği yeterince belirtilmemektedir. Bu konuda çalışmalar devam etmektedir.

Gömülü halka ve beton arasındaki farklı büzülme oranları, temelde oluşan çatlakların nedenlerindedir. Çatlak yüzeyleri beton kürü esnasında ayrılmaya başlayabilir. Rüzgar türbininin normal işletim koşulları altında, kaldırma kuvveti artarken çatlak açıklığı daha geniş olmakta, tersine kuvvet geldiğinde ya da azaldığında çatlak açıklığı daralmaktadır. Gömülü halka, üst yapıdan gelen yükler nedeniyle düşey yönde küçük deplasmanlara maruz kalmaktadır [11].

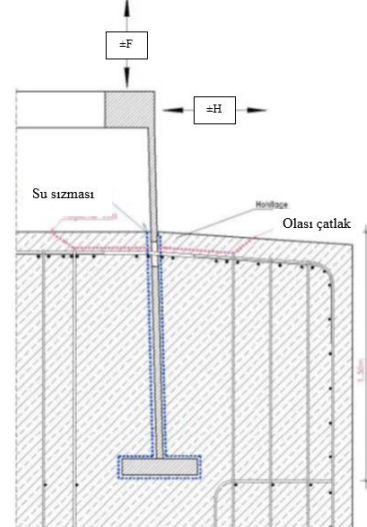


Şekil 10. Örnek Gömülü Halka Temelinin Yapısı [10]

Tipik gömülü halka temel tipinin yapısı Şekil 10'da gösterilmektedir. Halkanın gömülme derinliği, çelik kulenin etkin bir kısıtlama rijitliği göstermesi için genellikle çok sığdır. Rüzgâr türbininin normal işletim koşullarından kaynaklanan yüksek-çevrimli yorulma yüklemesi altında, çelik kule, betonarme temel ve diğer yapısal bileşenler üzerinde daha yüksek yorulma gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır. Kule tabanına gelen, M_u (tasarım moment), V_u (tasarım kesme kuvveti)'ni içeren yük aktarım mekanizması Şekil 11'de gösterilmektedir [10].



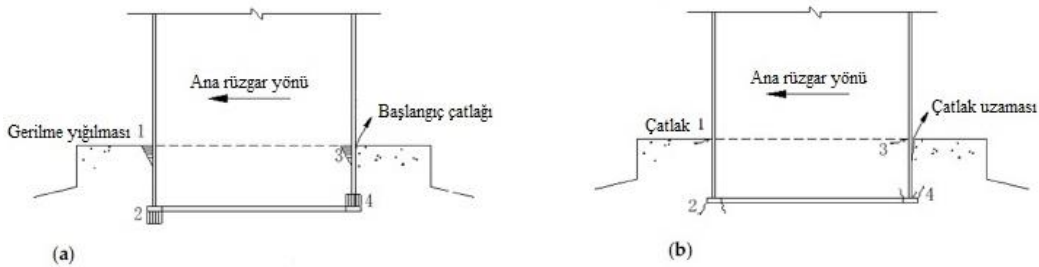
Şekil 11. Tasarım Eğilme Kapasitesinin Transfer Mekanizması

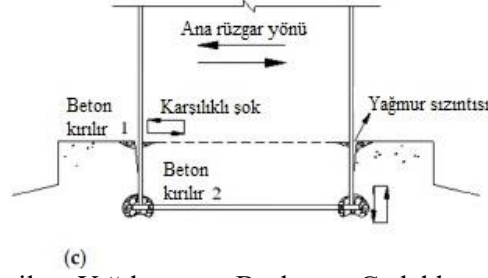


Şekil 12. Gömülü Halkanın Tek Flanşla Ankrajlanması [8]

Yatay ve dikey yüklerin etkisi altında hareket eden, tek flanşlı gömülü halkada olası çatlağın oluşması ve suyun hareketi Şekil 12'de gösterilmektedir. İlerleyen dönemlerde, boşluklardan suyun sızmasıyla birlikte, halka etrafında boşlukların ve ayrışmanın artmasıyla çatlaklar giderek büyümektedir [8].

Gelen rüzgâr yükü etkisi altında çatlağın başlaması, uzaması ve sonuçta olarak betonda kırılmanın meydana gelmesi Şekil 13'de sırasıyla gösterilmektedir.





Şekil 13. (a) Lokal Gerilme Yığılması ve Başlangıç Çatlakları (b) Lokal ve Başlangıç Çatlaklarının Gelişimi (c) Boşlukların Oluşup, Salınımın Hızlanması [9]

Rüzgârın kuleye etkidiği yüzeyde başlangıç çatlakları, bu kuvvet etkisiyle kulenin arka yüzeyinde gerilme yığılması meydana gelmektedir. Sonrasında, rüzgârın etkidiği yöndeki çatlak uzamakta, kulenin arka yüzeyindeki gerilme yığılmasının olduğu bölgede çatlak meydana gelmektedir. Rüzgâr kuleye ters yönde etkidiğinde ise, beton kırılarak boşluklar oluşmakta, oluşan boşluklara yağmur suyu sızmakta ve kulenin salınımı hızlanmaktadır [9]. Bu durum kulenin, tasarımda hesaplanan dinamik karakteristiklerini değiştirmektedir.

Son zamanlarda, gömülü halkaya sahip mevcut karasal rüzgâr türbin temellerinde farklı hasar tipleri meydana gelmektedir Şekil 14’de bu hasar örnekleri gösterilmiştir [10].



Şekil 14. (a) Yüzeysel Çatlaklar (b) Beton Geri Tepmesi (kusması) (c) Gömülü Halka Ve Beton Arasındaki Boşluklar [10]

Üretim sürecinde ya da temelin erken dönemlerinde, *termal ve kuruma büzülmesi* çatlama dışında, gömülü halka rüzgâr türbin temellerindeki hasarların temelinde, *yorgunluk yükü, düşük dayanımlı beton, uygun olmayan yapısal tasarım, zayıf işçilik, yapısal kusurlar* vb. şekilde bir çok neden bulunabilmektedir. Gömülü halka rüzgâr türbin temellerinde hasar gelişimi ve hasarın belirtileri genelde aylarca ya da yıllarca devam eden çok yavaş bir süreçtir. Şekil 15’de görüldüğü üzere, boşluklardan yağmur suyunun sızması, küçük beton parçacıklarının geri tepmesine (kusmasına) neden olmaktadır [10].

Çelik kule tabanına etkiyen devrilme momenti genelde, beton temelin çelik kulenin yanal yüzeyi ile temasından sağlanan yanal basınç tarafından karşılanmaktadır. Çelik kulenin tabanına etkiyen eksenel kuvvet, temel betonuna altta bulunan taban plakası (flanşı) ile aktarılmaktadır. Donatı çubukları, çelik halka ve beton temel arasındaki bağlantıyı güçlendirmek için, çelik halkanın duvarı üzerindeki deliklerden geçmektedir. [10].

Bu temellerde kullanılan gömülü halkalar, üzerinde bulunan çelik kule ile temel betonu ara yüzeyinde oluşan kaldırma ve basınç kuvvetlerine direnç gösteren önemli bir elemandır. Zamanla bu tip temellerde oluşan çeşitli hasarlar nedeniyle, temelin yük taşıma kapasitesi ciddi oranda azalmakta, kulenin göçmesi ile sonuçlanabilecek durumlar ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 15. Gömülü halka bağlantılı temellerdeki hasarlar [9]

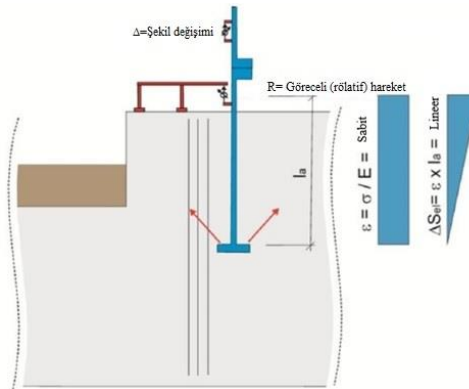
6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YAPISAL AMAÇLI UZAKTAN İZLEME

Rüzgar türbinlerinde hasarların birçok nedeni olabilmektedir. Rüzgar türbin temelinde oluşan mikro hasarlar, büyüyerek kulenin göçmesine neden olabilecek sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, temelde çatlak oluşumu ve yayılımı, rüzgar türbininin dinamik tepkisini değiştiren kritik faktörlerdendir [11]. Mevcutta bulunan rüzgar temellerinin birçoğu eski tip bağlantı elemanlarına sahip temellerdir. Bu temel sistemlerinin mevcut durumunun belirlenmesi ve gerekirse yapısal açıdan uygun olan bir yöntemle iyileştirilebilmesi ancak *Yapı Sağlığı İzlenmesi (YSİ)* ile gerçekleştirilebilir. Rüzgar türbin kulesine eklenen, deplasman ölçerler kullanılarak oluşturulan bir kule uyarı sistemiyle, kulenin yapısal durumu hakkında bilgi alınabilmektedir. Üç seviyeye sahip bu uyarı sisteminde, kule 1-2mm arasında düşey deplasman yapıyorsa rüzgar türbin kulesinde endişe edilecek bir durum olmadığı, 3-5 mm arasında düşey deplasman yapıyorsa kule de detaylı inceleme yapılması gerekliliği, 5mm'den fazla düşey deplasman yapıyorsa, hem detaylı inceleme hem de iyileştirme (güçlendirme) yapılması gerektiği belirlenebilmektedir [2].

Tablo 1. Kule Deplasman Uyarı Sistemi [2]

Deplasman	Uyarı Işığı	Hareket
1-2 mm	Yeşil	En az endişe verici durum
3-5 mm	Sarı	Artırılmış İnceleme
>5 mm	Kırmızı	İnceleme/İyileştirme

Ankraj flanşı ile beton (hasar) arasındaki göreceli hareket ve çelik şekil değişiminin birleşik ölçümü ile hesaplanmış hareketi [12]:



Şekil 16. Ankraj Flanşı Ve Beton Arasındaki Bağlı Hareket [12]

ε : Ölçülen çelik birim şekil değişimi

σ : Gerilme

E : Elastisite modülü

l_a : Taban flanşı ile ölçüm noktası arasındaki mesafe

ΔL : Ölçülen göreceli hareket
 ΔL_{el} : Ölçülen elastik çelik şekil değişimi
 ΔL_{Hasar} : Ankraj flanşı ile beton arasındaki hareket (hasar)
 İfade etmektedir.

Örnek Hesaplama:

Ölçülen çelik şekil değişimi: $\epsilon = 0.4/1000$
 Taban flanşı ile ölçüm noktası arasındaki mesafe: $l_a = 1.2 \text{ m}$
 Toplam göreceli hareket: $\Delta L = \Delta L_{el} + \Delta L_{Hasar}$
 Çelik Elastik Uzaması: $\Delta L_{el} = \epsilon \times l_a = 0.4 / 1000 \times 1200 = 0.48 \text{ mm}$

$$\Delta L_{Hasar} = \Delta L - \Delta L_{el} \quad (1)$$

ile hesaplanmaktadır.

7. RÜZGAR TÜRBİN KULE TEMEL BAĞLANTISI ONARIMI ÖNERİSİ

Bu bölümde, RES tesislerinde bulunan rüzgar türbini kule-temel bağlantısı nedeniyle oluşan deformasyon, kule-temel birleşimindeki ayrışma, kule gömülü halkası etrafındaki yapısal çatlakların tespiti ve onarımından bahsedilecektir.

Öncelikle rüzgar türbin tesisine gidilerek yerinde incelemeyle çatlak ölçümü yapılmalıdır. Şekil 17, 18, 19'da kule-temel bağlantısı arasında oluşan boşluk ve temelde yayılan çatlaklar görülmektedir.



Şekil 17. Kule- Temel Bağlantı Noktasında Ayrışma

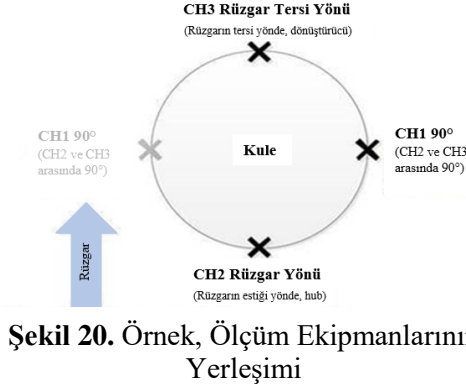


Şekil 18. (a) 1 mm Genişlikli Çatlak (b) Çatlak Uzunluğu Yaklaşık 70 cm

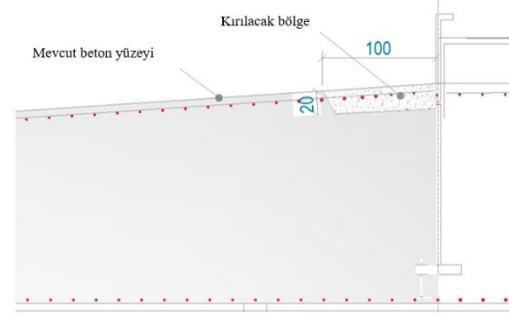


Şekil 19. (a) 2 mm Genişlikli Çatlak (b) 3 mm Genişlikli Çatlak

Detaylı inceleme yapılması için öncelikle kulenin yapısal durumu, YSİ ile belirlenmelidir. Kule üzerine ölçüm elemanları yerleştirilerek, kulenin yaptığı deplasmanlar belirlenip, uyarı sistemindeki eşik değerleri ile karşılaştırılmalıdır. Örnek sensör yerleşimi Şekil 20’de gösterilmektedir.



Şekil 20. Örnek, Ölçüm Ekipmanlarının Yerleşimi



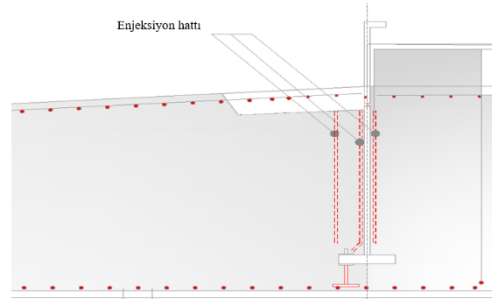
Şekil 21. Kule-Temel Bağlantısı Onarımında Kırılacak Bölge

Türbinler üzerindeki geri dolgu, türbin kulesinden dışarı doğru olmak kaydıyla, çatlak oluşumlarının yerini ve son noktasını tespit edebilmek için kaldırılmalıdır. Geri dolgunun kaldırılması uygun ve olabildiğince az tonajlı mekanik araçlarla yapılmalı ve ağır ekskavatör kullanılmamalıdır. Kazı esnasında kepçe ve kova ünitelerinin temel yüzeyini sıyırmamaları ve mevcut çatlakların görünümünü bozmamasına özen gösterilmelidir. Bu işlem esnasında, ağır araçlar temel üzerine çıkarılmamalıdır.

Temel üst dolgusunun kaldırılmasından sonra tüm üst beton yüzeyi süpürülüp, yıkanmalı ve basınçlı hava ile kurutulmalıdır. Sonrasında çatlaklar, genişliklerine göre renkli sprej ile markalanmalıdır. Kule çeperinden 100 cm dışarıdaki alanda bu işlemin yapılmasına gerek yoktur (Şekil 21).

Kule temel çeperinden yaklaşık 1 m uzaklıkta bölge, çepere çevre 20 cm derinliğinde kırılmalı, mevcut çatlaklı beton kabuk temelden uzaklaştırılmalıdır. Burada kritik husus, kırımın o bölgede yer alan mevcut demirlerin altına en az 5 cm ilerletilmesidir. Böylece yeni beton katmanı, mevcut betonarme demirleri tamamen sararak, aderans sağlamalıdır. Kırım esnasında mevcut donatılara kesinlikle zarar verilmemelidir. Kırım sonrası açığa çıkan beton yüzeyi basınçlı su ile yıkanıp, toz ve gevşek parçalardan tümüyle temizlenmelidir. Açığa çıkan beton yüzeyinde çatlak ilerleme ve çatlak tipi kontrolü yapılmalıdır. Açığa çıkan donatılarda projesine göre eksik varsa giderilmelidir.

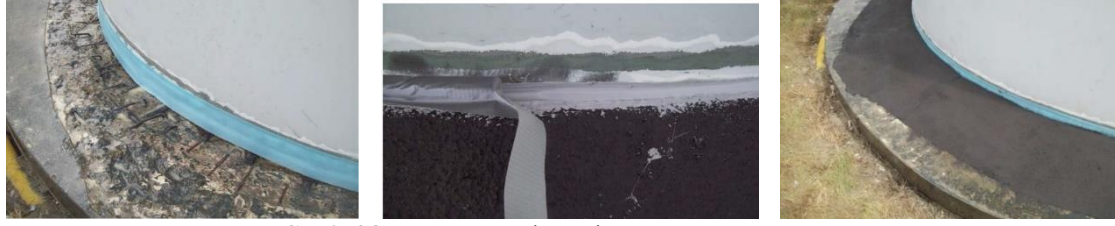
Belirtilen alan dışında kalan temel plağı üzerindeki çatlak oluşumları kontrol edilmeli, çatlak genişliğine göre enjeksiyon dolgu veya epoksi reçinesi emdirme yöntemi ile tamir edilmelidir.



Şekil 22. Kule-Temel Bağlantısı Onarımında Enjeksiyon İşlemi [12]

Kırım sonrası, kule-temel bağlantı parçası ile beton arasındaki boşlukları doldurma amacıyla uygun bir enjeksiyon pompası kullanılarak basınçla enjekte edilmelidir (Şekil 22 ve Şekil 23).

Çatlak oluşumuna göre, yukarıda verilene ek olarak da enjeksiyon yapılması gereken bölgeler doğabilir.



Şekil 23. Kule-Temel Bağlantısı Onarımı [12]

Kaide beton dökümü öncesinde çelik kule birleşim yerine en az 15x30 mm ebatında kauçuk esaslı kalın bant veya lama konulmalıdır (Şekil 23). Beton dökümü sonrasında bu boşluğa bitüm kauçuk esaslı bir derz dolgu mastiği doldurulmalıdır. Mastiğin üst kısmına derz dolgu fitili dönülüp, üzerine kenar uzunluğu en az 20 mm olacak şekilde derz dolgu macunu uygulanmalıdır.

Eski ve yeni beton donatı aderansı içi aderans artırıcı kimyasal mevcut beton yüzeyine uygulanmalıdır. Üstte belirtilen çalışmaların ardından, proje basınç dayanımına sahip mikro sentetik fiber donatılı beton ile açılan boşluk doldurulmalıdır. Dane çapı donatı yoğunluğuna göre ayarlanmalı, gerekirse küçük dane çaplı reçete tercih edilmelidir. İşveren tarafından yapılması öngörülen çelik halka plaka uygulamasının yapılabilmesi için, beton üst yüzeyinin düz bırakılmasına özen gösterilmelidir. Bu bölgede vibratör yerine titreşimli master kullanılması ve betona sıvı kür uygulanması önerilir.

Beton dökümü tamamlandıktan sonra, su girişini engellemek için çift kat kauçuklu bitüm emülsiyonu ile yeni dökülen beton kaplanmalıdır. İzolasyon çalışmasına başlamadan, yeni dökülen betonda en az 5 gün çatlak izlemesi yapılması önerilir.

İşveren yetkilileri tarafından yapılması öngörülen çelik halka bu aşama sonrasında bitiş çalışması olarak uygulanabilir. Bu uygulamada, açılan deliklerin kompresör ile temizlenmesine, deliklerin mevcut donatıya zarar vermemesine ve grout uygulaması sonrasında bulonlara tork uygulanması hususlarına önem verilmelidir [6].

Önerilen bu onarım yöntemi, tasarım ve uygulama açısından iyi durumdaki türbin kule-temel bağlantılarında uygulanmalıdır. Önemli yapısal problemlere sahip türbinlerde onarım yönteminin geçici bir çözüm olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Yapısal sorunların kule-temel bağlantısında varlığı devam ettiği sürece, bir süre sonra aynı çatlak ve hasarların yeniden oluşması beklenmektedir. Bu durumda yük transfer mekanizmasını rehabilite edecek, yapısal güçlendirme yöntemlerinin uygulamaya konulması ivedilikle ele alınmalıdır. Onarım sonrası *YSİ* yapılarak, ilgili deplasman değerleri kontrol edilmeli, yapılan güçlendirme çalışmasının işe yarayıp yaramadığı kontrol edilmelidir.

8. MEVCUT BİR RÜZGAR TÜRBİN-KULE TEMEL BAĞLANTISI YAPI SAĞLIĞI İZLEME VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMASI

8.1. Mevcut Kule ve Temel Özellikleri

İncelenen rüzgâr türbinine ait kule-temel bağlantısı gömülü halka (embedded ring – embedded can) uygulama yöntemiyle teşkil edilmiştir. Mevcut temel sekizgen formunda oluşturulmuş ve iç teğet çember çapı (eşdeğer dairesel temel çapı) 20 metredir. Temel derinliği 3 metre ve gömülü halkanın temel içerisindeki gömülme derinliği 1.58 metredir. Gömülme derinliğinin temel derinliğine oranı 0,53' tür. Temel hacmi yaklaşık 650 m³ ve temelde bulunan toplam donatı (demir) ağırlığı 48,473 ton'dur. Temel toplam 1480 ton ağırlığındadır. Temelde kullanılan malzeme sınıfı ve kalitesi, beton için C25/30 sınıfında, donatı için ise S420 kalitesindedir. Mevcut kule 3 MW gücünde elektrik üretimi yapmakta ve kule hub yüksekliği 80 metredir. Kule

tasarımında üretici firma tarafından sağlanan yük değerleri Tablo 2' de verilmiştir. Temelin statik hesaplamaları bu yük değerleri referans alınarak yapılmıştır.

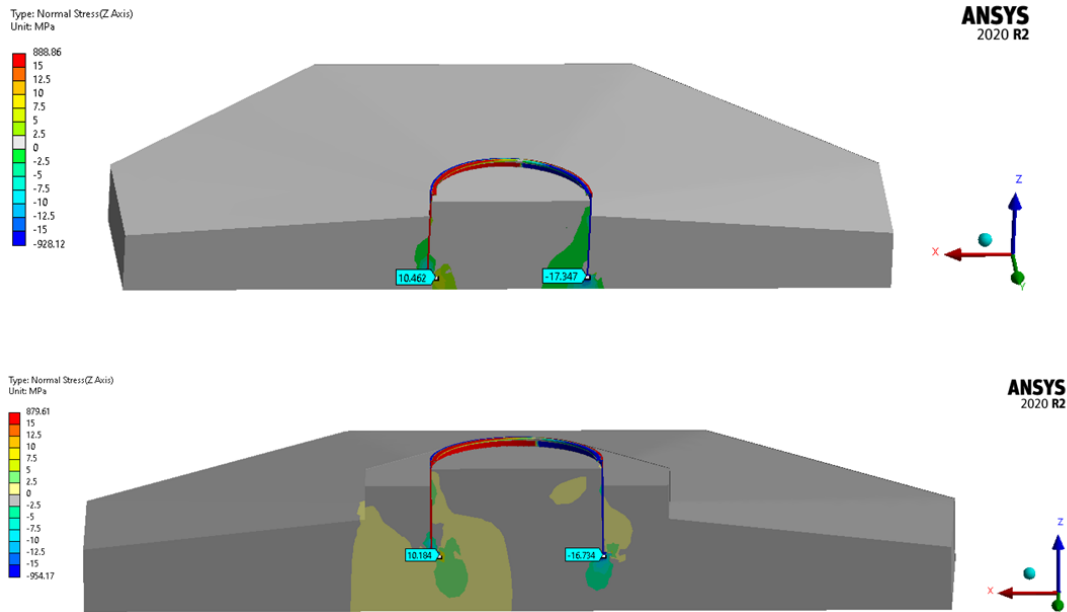
Tablo 2. Temel Tasarım Yükleri

TEMEL TASARIM YÜKLERİ*						
F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	γ_f
kN	kN	kN	kNm	kNm	kNm	
-754	302	-2564	-15117	55475	-571	1,35

8.2. Kule -Temel Bağlantısı Hasar Oluşma Mekanizması Ve Hasar Tespiti

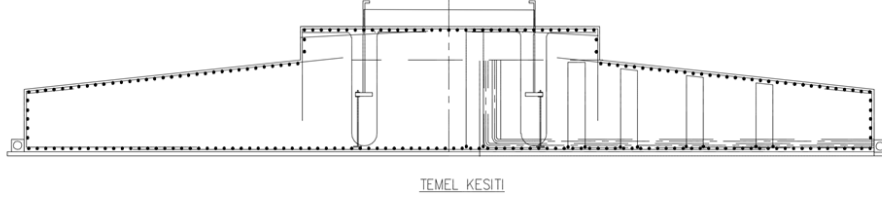
Son yıllarda, birçok rüzgâr türbini tesisinde gömülü çelik halka temel bağlantı sistemlerinde hasarlar ve arızalar ile ilgili endişeleri dile getiren uluslararası raporlar ve yayınlar mevcuttur. Ülkemizde de ciddi şekilde hasar almış rüzgâr türbinleri halihazırda bulunmaktadır. Çatlak oluşumu ve yayılımı, rüzgâr türbininin yük taşıma kapasitesini azaltıp, stabilitesini ve dinamik tepkisini değiştiren kritik faktörlerdendir.

Çelik gömülü halka, temel imalatı yapılırken donatılar ile birlikte temel içerisine yerleştirilmekte ve sonrasında beton dökülerek temel imalatı tamamlanmaktadır. Kule ve elektrik üretimini sağlayan ekipmanlar gömülü halka üzerine kule taban flanş noktalarından mesnetlenerek rüzgâr türbini kule kurulum süreci tamamlanmaktadır. Temel betonunun kürü esnasında da (kule kurulumu tamamlanmadan) temelde kılcal düzeyde çatlaklar oluşabilmektedir. Temel içine yerleştirilen çelik gömülü halka, kulenin operasyon durumunda rüzgâr yükünden kaynaklanan çevrimsel yük etkileri altında düşey doğrultuda yer değiştirme hareketi (deplasman) yapmaktadır. Çevrimsel yükler altında gömülü çelik halkanın temel içerisindeki dönmesi nedeniyle, bağlantı bölgesindeki gerilme yığılmalarının düşey ve radyal yönde düzgün yayılmadığı (non-uniform) yapılan analizlerde görülmüştür. Gerilme yığılmalarının gömülü halka taban flanşı etrafında ve gömülü halka ile beton temas yüzeyinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir (Şekil 24).



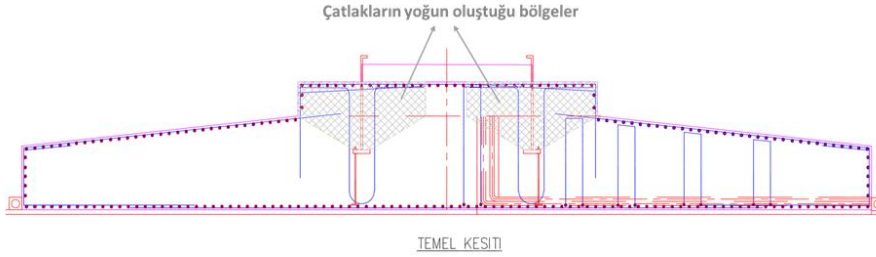
Şekil 24. Birleşim Bölgesinde Oluşan Gerilmeler

Bu ara yüzey bölgesinde çekme durumunda çekme gerilmelerini karşılayabilecek donatı bulunmadığı için (Şekil 25) temas çok kolay bir şekilde kaybedilmektedir.



Şekil 25. Mevcut Temel Kesiti ve Donatı Yerleşimi

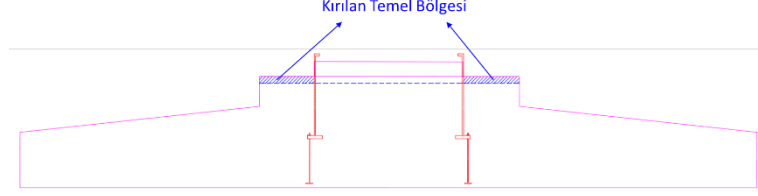
Gömülü halkanın pürüzsüz dış yüzeyi de temas kaybını kolaylaştıran bir diğer etkindir. Betonun kürü esnasında oluşan kılcal düzeydeki çatlaklar çekme gerilmeleri altında genişleyerek ileri düzey hasar oluşumuna sebep olmaktadır. Birleşim bölgesinin temel hasar modları, çekme tarafında yatay ve diyagonal çatlaklar ve basınç tarafında zımbalama hasarı (punching shear) şeklinde oluşmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında basınç bölgesinde oluşan gerilmeler beton basınç dayanımının altında kalmakta ve mevcut birleşim bölgesinin temel hasar modu, çekme tarafında yatay ve diyagonal doğrultuda oluşan çatlaklar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çatlaklar çelik gömülü halka çevresindeki düşey donatı çubuklarının ilk halkasına kadar gelişmekte ve işletim süresince, oluşan çatlaklar ikinci halkaya kadar yayılmaktadır (Şekil 26).



Şekil 26. Mevcut Temel Kesiti ve Çatlakların Oluştugu Bölgeler

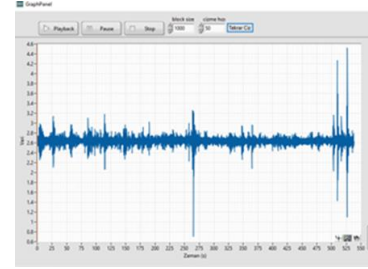
Çatlakların ilerlemesiyle ve büyümesiyle çelik gömülü halka temel betonundan ayrılmakta ve temel içerisinde boşluklar oluşmaktadır. Temel içerisindeki donatılarda, oluşan bu boşluklara zamanla yağmur suyu dolmasından kaynaklanan korozyon gelişmektedir. Çelik gömülü halka ile temel arasındaki temas kaybı ile gömülü halkanın temel içerisindeki gömülme derinliği azalmakta ve bu da moment taşıma kapasitesini düşürmektedir. Çelik gömülü halkanın moment taşıma kapasitesi üzerinde etkili olan parametrelerin incelendiği analitik çalışmalarda, en fazla duyarlı (hasas) olan parametrenin – kapasite değişimi üzerindeki en etkili parametre – gömülme derinliği olduğu tespit edilmiştir. Moment taşıma kapasitesindeki düşüş ile rüzgâr türbini kulesinde stabilite problemleri başlamaktadır. Ayrıca oluşan bu çatlaklar ve moment taşıma kapasitesindeki düşüş, betonun yorulma ömrü üzerinde de olumsuz bir etki yaratmaktadır.

Yerinde yapılan incelemelerde kule-temel bağlantısında yetersiz çekme donatısı bulunmasından dolayı ve gömülü halkanın temel içerisindeki çevrimsel yükler altındaki yapısal davranışından dolayı betonun çatladığı ve çatlakların zamanla ilerleyerek betonun kırıldığı tarafımızca tespit edilmiştir (Şekil 27). Çelik gömülü halka ile temel arasındaki temas kaybı ile rüzgâr türbini kulesinde stabilite problemleri tespit edilmiştir.



Şekil 27. Yerde Yapılan Hasar Tespit Çalışmaları ve Mevcut Hasar Durumu

Mevcut hasar durumunun belirlenmesinin ardından, rüzgârın hakim olduğu doğrultuda ve bu doğrultuya dik olacak şekilde kule mevcut eğim değerinin belirlenebilmesi için kule üzerine 2 adet eğim ölçer sensör yerleştirilmiştir ve anlık olarak eğim değerleri takip edilmiştir (Şekil 28).



Şekil 28. Hasarlı Rüzgâr Türbini Saha Ölçüm Çalışmaları

Tablo 3. Ölçüm Sonuçları

KULE MEVCUT EĞİM DEĞERLERİ	
Ölçülen en büyük eğim	4.50°
Ölçüm boyunca oluşan ortalama eğim	2.63°

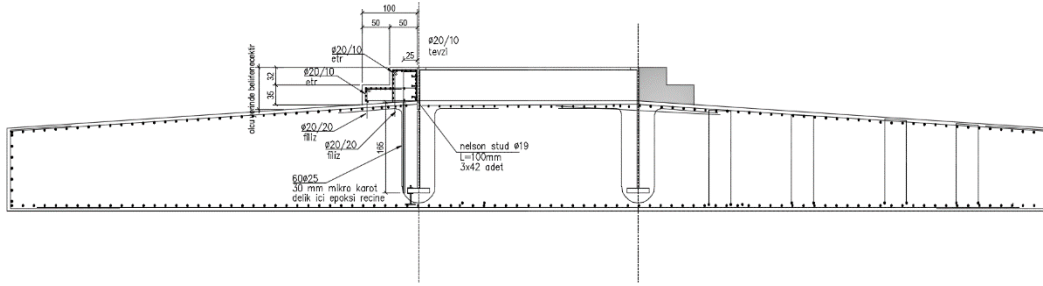
Kule içerisine yerleştirilen eğim sensörleri kule dışına kurulan veri toplama sistemine (DAQ) bağlanarak izleme işlemi iş sağlığı ve güvenliği tedbirleri gereği kule dışından gerçekleştirilmiştir (Şekil 28). Ölçülen eğim değerlerinin (Tablo 3) izin verilen değerlerin (8 mm/m – 0.40°) oldukça üzerinde olduğu tespit edilmiş ve işletme sahibine raporlanarak bilgi verilmiştir. Kule eğim değerinin izin verilen eğim değerinin oldukça üzerinde ölçülmesinden dolayı kule stabilitesinin riskli bölgede olduğu sonucuna varılmıştır.

8.3. Kule -Temel Bağlantısı Güçlendirme

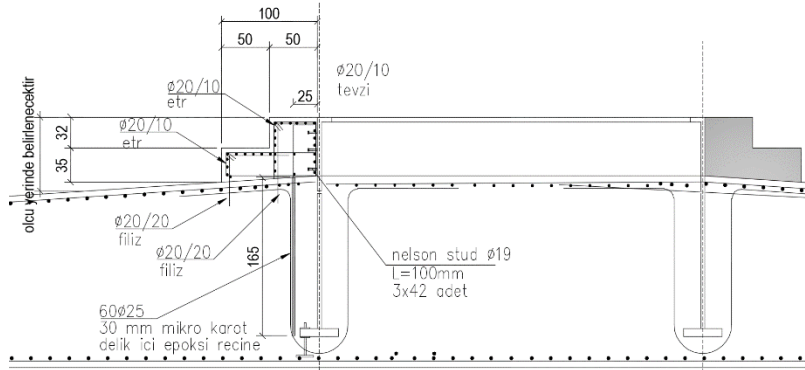
Temel içerisine gömülü çelik halkalar, rüzgâr türbinleri temellerinde, çelik kule ile beton temel ara yüzeyinde oluşan kaldırma ve basınç kuvvetlerine direnç gösteren önemli elemanlar olarak görülmektedir. Gömülü bu halkalar, betonun kırılması, kulenin titreşimine bağlı olarak betonun çatlaması gibi hasarlardan dolayı tasarımlarda öngörülen kapasitelerinde kayıplar yaşamaktadırlar. Bu nedenle, kaybolan kapasiteyi eski haline getirmek için etkili bir güçlendirme sisteminin geliştirilmesi önemlidir.

Oluşturulan güçlendirme tasarımındaki temel amaç; gömülü çelik halka ve betonarme temel arasındaki basınç gerilmesi dağılımını iyileştirerek yapıyı istenilen performans düzeyine çıkarmak ve ayrıca gömülü halka ile beton arasındaki kuvvet aktarımı mekanizmasını da değiştirerek oluşan çatlakları kapatarak betonda yeni çatlak oluşumunu önlemektir.

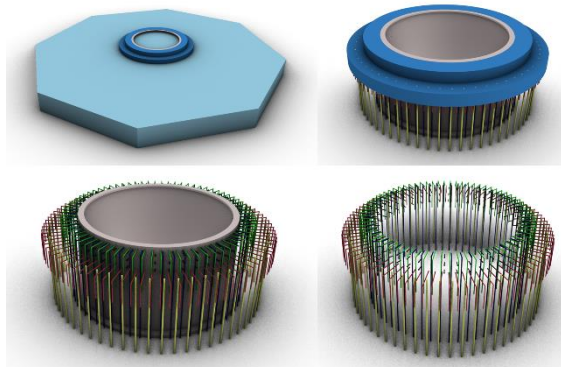
Geliştirilen güçlendirme tasarımı, kule-temel bağlantısını oluşturan gömülü halka-temel birleşim bölgesi etrafına uygulanan ve planda halka şeklinde olan betonarme bir kiriş elemanından (güçlendirme kirişi) oluşmaktadır. Temel yüzeyine donatı filizleri ekilerek güçlendirme kirişinin temel ile birlikte çalışması ve aderansı sağlanmıştır. Ayrıca gömülü halka dış yüzeyine cıvatalar (stud bolt) kaynatılarak gömülü halka ile güçlendirme kirişi arasındaki aderans ve bağlantı (kontakt) sağlanmıştır. Yukarıda sözü edilen güçlendirme kirişine, ard-germe kuvvetinin uygulandığı ankraj çubuklarının eklenmesi ile güçlendirme tasarımı tamamlanmıştır. (Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31). Ard-germe kuvveti Şekil 31’de sarı renk ile gösterilen çubuklara uygulanacaktır. Geliştirilen bu güçlendirme tasarımında ilave kiriş eklenmesi ile çelik gömülü halkanın temel içerisindeki gömülme derinliğinin artırılması ile halkanın moment taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 29. Güçlendirme Tasarımı Kesiti

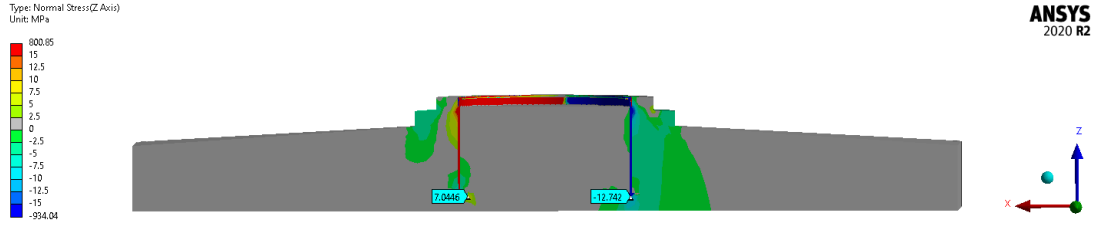


Şekil 30. Güçlendirme Tasarımı Detayı



Şekil 31. Güçlendirme Tasarımı Üç Boyutlu Görselfi

Uygulanacak olan ard-germe kuvveti ile de gömülü halka ile beton arasındaki kuvvet aktarım mekanizmasının değiştirilerek oluşan çatlakların kapatılması ve betonda yeni çatlak oluşumunun önlenmesi sağlanmıştır. Kule, rüzgâr yüklerinden kaynaklanan devrilme momenti etkisi altında dönme eğilimindedir ve gömülü halkanın taban flanşının altında ard-germe kuvvetlerinden dolayı yatak basıncının gelişimi temel sisteminde devrilmeye karşı koruyucu bir moment oluşturmaktadır.



Şekil 32. Flanş Ayağı Altındaki Betonda Oluşan Maksimum Düşey Gerilmeler

Uygulanan ard-germe kuvvetleri etkisiyle gömülü halka taban flanşı altında ilave basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan bu basınç gerilmelerinin beton basınç dayanımının altında kaldığı ve gömülü halkanın temel içerisindeki dönmesini önlemeye olumlu katkı sağladığı yapılan sonlu elemanlar analizlerinde tespit edilmiştir (Şekil 32).

9. SONUÇLAR VE GELECEKTE YAPILMASI PLANLANAN ÇALIŞMALAR

Kuleye etkiyen kuvvetler nedeniyle, gömülü halka ile beton arasında gerilme yığılmalarının oluşması sonucu çatlaklar meydana gelmektedir.

Bu çatlakların ilerlemesiyle, temel betonunda zamanla boşluklar meydana gelmektedir. Yağmur sularının da bu boşluklardan sızmasıyla, temeldeki bozulma devam etmekte, halkanın çevresinde bulunan bölgede erozyon meydana gelerek boşluklar artmaktadır. Boşlukların artmasıyla, gömülü halkada yukarı-aşağı yönlü hareketin artması, kulenin rijitliğini değiştirerek dinamik tepki değerlerini bozmaktadır. Dolayısıyla, gömülü halka tipi bağlantıya sahip rüzgâr türbin temellerinde, çatlakların oluşumunun temelin yük taşıma kapasitesini azalttığı belirtilmektedir.

Mevcut rüzgâr türbinlerinin bir çoğunda, halka ile temel arasında, bağlantı elemanı kaynaklı hasarlar sonucu meydana gelen çatlakların, kulenin göçmesine neden olabilecek durumları ortaya çıkarabileceği öngörülmektedir. Bu durumun, kulenin erken işletim dönemlerinde öngörülememesi, kulenin yapısal veriminin düşmesine, elektrik üretimin zamanla azalmasına ve en son türbinin işletilmesinin durmasına neden olabilmektedir.

Mevcut olan bu durumun çözülebilmesi için, öncelikle mevcut rüzgâr türbinlerinde, yapısal durumun izlenmesi (*YSİ*) ve çıkan sonuca göre türbinde ilgili bileşende güçlendirme çalışması yapılması gerekmektedir. Eğer *YSİ* sonucunda güçlendirme gerekliliği ortaya çıkmışsa, kule ve temel arasındaki yük aktarımını düzenli olarak sağlanması amacıyla, kule ve temel arasında yeni bir bağlantı oluşturulmalıdır.

Sonrasında ise kulenin yapısal sağlığının geliştirilecek olan deplasman-birim şekil değiştirme ve titreşim tabanlı *YSİ* yöntemi ile yeniden izlenerek, uygulanan güçlendirmenin verimliliğinin araştırılması gerekir. Bu tarz gömülü halka tipi bağlantıya sahip rüzgâr türbin temellerinde yapılacak bu güçlendirme çalışmalarıyla, kulenin servis ömrünün uzatılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ö. Güler, "Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi," in *TMMOB V.Enerji Sempozyumu Küreselleşmenin Enerji Sektöründe Yapısal Değişim Programı ve Enerji Politikaları*, Ankara, 2005.
- [2] M. Currie , D. M. Saafi and D. F. Quall, "DEVELOPMENT OF A ROBUST STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM FOR WIND TURBINE FOUNDATIONS," in *ASME Turbo Expo 2012 Turbine Technical Conference & Exposition*, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [3] T. Ishihara, A. Yamaguchi, K. Takahara, M. Takehiro ve S. Matsuura, «An Analysis of Damaged Wind Turbines by Typhoon Maemi in 2003,» %1 içinde *The Sixth Asia- Pacific conference on Wind Engineering (APCWE-VI)*, Seoul, 2005.
- [4] E. Hau, *Wind turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Munich: Springer, 2013.
- [5] B. E. Yaşar, *ANALYSIS OF A WIND TURBINE FOUNDATION ON STIFF CLAY WITH ANALYTICAL AND 3D FINITE ELEMENT METHODS*, Ankara: Middle East Technical University, 2019.
- [6] M. Genç, "RÜZGAR ENERJİ SEKTÖRÜNDE KULE ve TEMEL TEKNOLOJİLERİ," in *4. İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, 2017.
- [7] E. Amponsah, Z. Wang and S. K. Mantey, "Bending-bearing behaviour of embedded steel ring-foundation connection of onshore wind turbines," *Structures*, vol. 34, pp. 180-197, 2021.
- [8] M. Hassanzadeh, "Cracks in onshore wind power foundations Causes and Consequences," *Elforsk*, Stockholm, 2012.
- [9] J. Chen, J. Li, Q. Li and Y. Feng, "Strengthening Mechanism of Studs for Embedded-Ring Foundation of Wind Turbine Tower," *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 710, 2021.
- [10] J. Chen, Y. Xu and J. Li, "Numerical Investigation of the Strengthening Method by Circumferential Prestressing to Improve the Fatigue Life of Embedded-Ring Concrete Foundation for Onshore Wind Turbine Tower," *Energies*, vol. 13, no. 533, pp. 1-18, 2020.
- [11] X. Bai, M. He, R. Ma and D. Huang, "Structural condition monitoring of wind turbine foundations," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, pp. 116-134, 2017.
- [12] "Umgang mit Schäden an Fundamenten von Windenergieanlagen – Onshore: Inspektion-Bewertung - Sanierung," *Bundesverband WindEnergie*, Germany, 2013.
- [13] "BBC News," 15 February 2022. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/uk-wales-60390094#:~:text=An%20investigation%20has%20been%20launched,wind%20farm%20overlooking%20the%20village.>

[14] S. Tewelde, R. Höffer and H. Haardt, "Validated model based development of damage index for Structural Health Monitoring of offshore wind turbine support structures, " *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 3242-3247, 2017.