

RÜZGAR TRİBÜNLERİNİN RADARLARA ETKİSİNİN ANALİZİ

Deniz BÖLÜKBAŞ^(a), Uğur SAYNAK^(a), Alper ÇOLAK^(a), İ. Hakkı TAYYAR^{(a),(b)},
Caner ÖZDEMİR^{(a),(c)}

^(a) TÜBİTAK MAM, Bilişim Teknolojileri Enstitüsü, 41470, Gebze, Kocaeli,
deniz.bolukbas@bte.mam.gov.tr, ugur.saynak@bte.mam.gov.tr, alper.colak@bte.mam.gov.tr

^(b) Yard. Doç. Dr. GYTE, Elektronik Müh Böl., Gebze, Kocaeli, tayyar@gyte.edu.tr

^(c) Prof. Dr. Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh Böl., Mersin,
cozdemir@mersin.edu.tr

ABSTRACT

In our country the development of wind turbines and wind farms are supported as part of our renewable energy strategies. This tendency has resulted an increase in the number of wind turbine projects. However, recent studies have shown that these wind turbine farms can adversely influence the performance of military and civilian radar systems operating within the line of sight of the turbines. In this paper, the Radar Cross Section values of different kind of turbines are analysed and the Inverse Synthetic Aperture Radar images are simulated. The results are analysed with respect to the material properties of the wind turbine, geographical positioning of the wind turbine farm and the properties of geographical area. With these analyses the influence of the wind turbines on radar systems can be understood and eliminated if necessary.

Anahtar sözcükler: Rüzgâr Türbini, Radar Kesit Alanı, Doppler Etkisi, Ters Yapay Açıklıklı Radar İmgesi

1. GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de fosil yakıtların dezavantajları dikkate alındığında yenilenebilir enerji kullanmanın önemi görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi de ülkemizde son yıllarda artan ilgi görmektedir. Ancak rüzgar enerjisini kullanırken avantajlarının yanı sıra dezavantajlarının da iyi değerlendirilmesi gerekir. Rüzgar türbinlerin elektromanyetik yayılım yapan cihazlarda olumsuz bazı etkilerinin olduğu bilinmektedir. Rüzgar enerjisini yoğun olarak kullanan ülkelerde radarlarda tespit edilen bazı olumsuz etkiler raporlanmış ve araştırma projelerine konu olmuştur [1,2].

Radarların kaplama alanı içinde rüzgâr türbinlerinin bulunması tespit performansını olumsuz etkilemektedir [3]. Rüzgâr türbinleri, döner kanatlarından kaynaklanan Doppler etkisi nedeniyle operatör ekranında hareketli hedef izlenimi veren yoğun kargaşaya yol açmaktadır [4]. Doppler etkisi sonucunda radara göre hareket halindeki hedeflerden dönen sinyallerin frekansında değişme algılanır. Bu değişim f_d ile gösterildiğinde;

$$f_d = -\frac{2v_r}{\lambda} \quad (1)$$

ile tanımlanmıştır. Burada v_r hedefin radara göre radyal hızı, λ ise dalgaboyudur. Rüzgâr türbininin kanatları dönerken radara göre bir hareket söz konusu olduğundan türbin kanatları hareketli hedefler gibi algılanabilirler. Döner kanatların Doppler etkisi türbinin dönme hızına ve kanatların yönelimine göre değişmektedir.

Rüzgar enerjisine ilginin artmasıyla birlikte gelişen teknoloji sayesinde türbinlerin rotor çapları ve kule yükseklikleri de oldukça büyümüştür. Almanya'da üretilen en büyük rüzgar türbini 7 MW kapasitesinde, kule yüksekliği 138 metre, rotor çapı ise 126 metredir. Coğrafi olarak yüksek bölgelerde rüzgar enerjisinin daha etkili olduğu düşünüldüğünde dev rüzgar türbinlerinin askeri ya da sivil radarların fiziksel olarak yakınında olmasalar bile radarların kaplama sahalarına girme olasılığı da artmaktadır.

2. RADAR KESİT ALANI DEĞERİ ve TYAR ANALİZİ

Rüzgar türbinlerinin ve çiftliklerinin radar tarafından hedef olarak algılanması, radarlarda tespit kararının verilmesinde kullanılan eşik seviyesi değerlerinin

yoğun kargaşa (*clutter*) nedeniyle artması ve tespit performansının azalması sonucunu getirmektedir. Bu nedenle radar kaplama sahasına giren rüzgar türbinlerinin Radar Kesit Alanı değerinin azaltılması önlem olarak düşünülebilir.

Radar menzil denkleminde hedefe ait tek parametre olan Radar Kesit Alanı (RKA) değerinin büyüklüğü hedefin uzak mesafelerden tespit edilmesini sağlamaktadır. RKA, σ , yüzeye etkiyen elektromanyetik alan şiddeti (*incident electric field*) E_i ve yüzeyden saçılan elektromanyetik alan şiddeti (*scattered electric field*) E_s olmak üzere aşağıdaki ünlü formülle hesaplanır.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (2)$$

Büyük ve karmaşık nesnelerin RKA değerini yüksek frekanslarda hesaplamak için tam dalga çözümleri yerine yüksek frekans yöntemlerinin kullanılması iyi bir yaklaşıklık sağlamaktadır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve algoritma paralelleştirme yordamlarının yaygınlaştırılması RKA değerlerinin büyük ve karmaşık cisimler için hesaplanabilmesini sağlamıştır. Dalga boyuna göre büyük olan cisimlerin RKA değeri hesaplanmasında bir yüksek frekans tekniği olan Seken Işın Yöntemi (SIY) yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. SIY metodunda, kaynaktan gönderilen elektromanyetik dalgayı temsil eden ışınların, hedefin üzerinde geometrik optik kurallarına göre takip edilmesi ve her bir ışının saçılan alana katkısının eklenmesiyle RKA değeri hesaplanmaktadır. Işınların genlik, faz, polarizasyon bilgileri ve izlediği yol, her sekmede ortam parametrelerine göre güncellenmektedir. Bu algoritma, ışınlar belirli bir genlik seviyesinin altına düşünce ya da belirli sayıda sekmeden sonra sonlandırılır. Nesneden seken ve alıcının bulunduğu ortama gelen tüm ışınların, alıcı noktasında oluşturduğu saçılan alan değerini hesaplamak için, her ışının uzak alana katkısı eşdeğerlik prensibi ve ışın tüpü entegrasyonu ile hesaplanmaktadır. Entegralin sayısal olarak hesaplanabilmesi için geometri genellikle düz üçgen plakalar ile modellenir. Bu metot kullanılarak geliştirilen Seken Işın Yöntemi algoritmasının başarımı örneklerle gösterilmiştir [6].

Hedefin uzaktan tespit ve teşhisinde kullanılan Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) imgesi ise hedefin farklı frekans ve bakış açılarında RKA değeri kullanılarak elde edilebilir. TYAR imgesi hedefin üzerinde bulunan ve RKA değerine en fazla katkıyı yapan saçılma merkezlerinin konumunu ve büyüklüğünü de göstermektedir. Bir hedefin iki boyutlu (2B) TYAR imgesi, saçılan alanın Fourier integrali ile gösterilir.

$$TYAR(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_s(k, \phi) \cdot e^{j2k \cdot x} \cdot e^{j2k_c \phi \cdot y} \cdot d(k) \cdot d(k_c \phi) \quad (3)$$

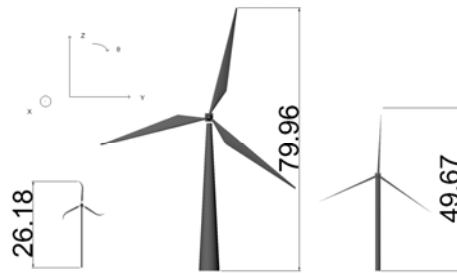
Burada k_c merkez frekansı f_c olmak üzere dalga sayısıdır.

Radar Kesit Alanı çalışmalarında, elektriksel olarak büyük bir nesneden elektromanyetik saçılma, nesnenin üzerinde saçılma merkezi olarak adlandırılan ayrık noktalardan kaynaklandığı kabulüyle yaklaşık olarak modellenebilir. Saçılma merkezi modeli pek çok radar uygulamasında gerçek karmaşık bir hedefin azaltılmış saçıcı görüntüsüdür.

Radar uygulamalarında hedefin keşfi ve tanımlanması önemli bir yere sahip olup bunun için genellikle hedefin 2B TYAR imgelerinden yararlanılmaktadır. TYAR imgesi hedef cismin yansıtıcılığının bir fonksiyonudur ve cisim üzerindeki ana saçılma merkezlerinin yerini önemli ölçüde gösterir. Böylelikle saçılan enerjinin büyük bölümünün kaynağı olan saçılma merkezlerinin konumu tespit edilebilmektedir. RKA değerini düşürmeye yönelik RSM kaplama çalışmalarında saçılma merkezlerinin yerinin bilinmesi büyük ve karmaşık hedefler söz konusu olduğunda büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen TYAR analizi algoritmasının başarımı örneklerle gösterilmiştir [7].

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN RKA DEĞERİ

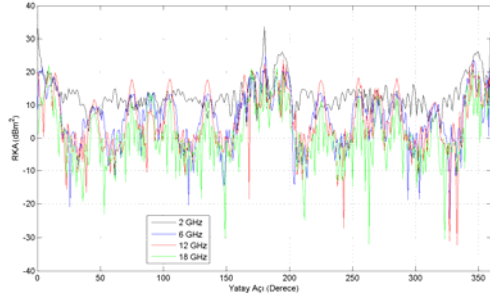
Rüzgar türbinlerinin RKA değerini incelemek amacıyla RT-1, RT-2 ve RT-3 olarak adlandırılan ve Şekil-1'de resimleri ve boyutları görülen rüzgar türbinlerinin Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) modelleri kullanılmıştır. BDT modellerinde RT-1 1986, RT-2 53519 üçgenle ve RT-3 ise 313 üçgenle modellenmiştir.



Şekil 1: Rüzgar türbini modeli RT-1, RT-2 ve RT-3 resimleri ve boyutları (Boyutlar metre olarak verilmiştir.)

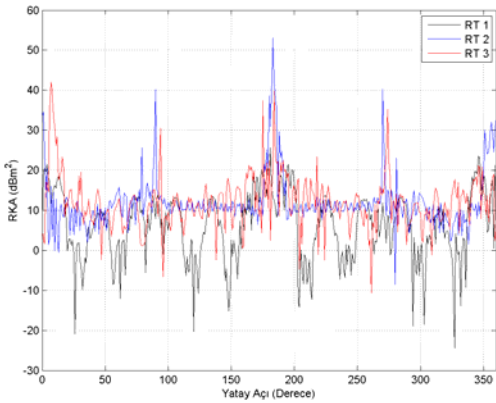
Öncelikle rüzgar türbinlerinin RKA değerlerinin frekansa bağlı değişimi analiz edilmiştir. RT-1 dikey açı $\theta=89^\circ$ 'den aydınlatılırken yatay açıya bağlı RKA değerleri farklı frekanslarda analiz edilmiştir. Şekil-

2'de RT-1'in frekansa ve yatay açığa bağlı RKA değeri değişimi görülmektedir. RT-1 mükemmel elektrik iletken olarak modellenmiştir.



Şekil 2: Rüzgar türbini modeli-1'in tam iletken olması durumunda RKA analizi $f=2$ GHz, $f=6$ GHz, $f=12$ GHz, $f=18$ GHz yatay açısız tarama.

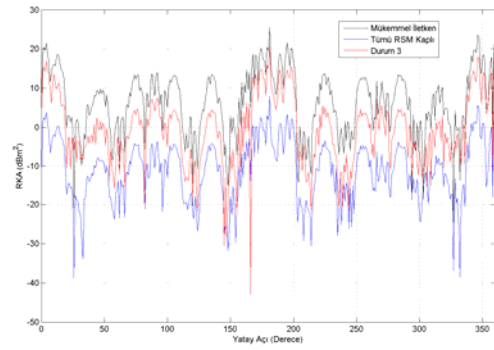
Rüzgar türbinleri farklı büyüklüklerde ve değişik geometrilere sahip olabilir. RKA değerlerinin geometriye bağlı değişimini analiz etmek için değişik geometrilere sahip olan ve Şekil-1'de görülen RT-1, RT-2 ve RT-3 modelleri mükemmel elektrik iletken olarak modellenmiş ve analizde kullanılmıştır. Şekil-3'de bu analizin sonuçları görülmektedir. Analiz $f=6$ GHz frekansında yapılmış ve bu frekanslarda geometrik olarak en büyük rüzgar türbini olan RT-2 modelinin RKA değerlerinin 50 dBsm değerlerine ulaşabildiği görülmüştür. Bu değer büyük bir yolcu gemisinin ortalama RKA değeri mertebesindedir. Ayrıca RT modelin yapısı gereği küçük açı değişimlerinde bile RKA değerinin dramatik şekilde değiştiği gözlenmektedir.



Şekil 3: Üç değişik rüzgar türbini modelinin RKA değeri analizi $f=6$ GHz, yatay açısız tarama

RKA değerini azaltabilmek amacıyla RT-1'in Radar Soğurucu Malzeme (RSM) kaplanması durumunda RKA değeri incelenmiştir. Bu analiz için kullanılan RSM'nin elektriksel özellikleri bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.0 - j1.0$ ve bağıl manyetik permeabilitesi $\mu_r = 2.0 - j1.0$ olarak alınmıştır. RSM kullanılması durumunda Şekil-4'de görüldüğü gibi RT-1'in RKA değerinde 20 dBsm'e varan azalma olmaktadır. İkinci durum olarak RT-1'in kanatlarının fiber glass gövdenin ise beton olduğu durum incelenmiştir. Kanatların elektriksel

özellikleri bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 3.9$ ve bağıl manyetik permeabilitesi $\mu_r = 1.0$ olarak alınmıştır. Beton gövdenin ise elektriksel özellikleri bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.5 - j0.05$ ve bağıl manyetik permeabilitesi $\mu_r = 1.0$ olarak alınmıştır. Bu durumda $f=6$ GHz frekansında RT-1'in RKA değerinin malzemenin elektriksel özelliklerine göre değişimi türbin dikey açı $\theta=89^\circ$ den aydınlatılırken yatay açığa bağlı olarak analiz edilmiştir. Bu analizin sonuçları Şekil-4'te görülmektedir. RSM kaplı RT-1'in RKA değerinin kanatları fiber glass ve gövdenin beton olma durumuna göre daha düşük RKA değerine sahip olduğu belirlenmiştir.



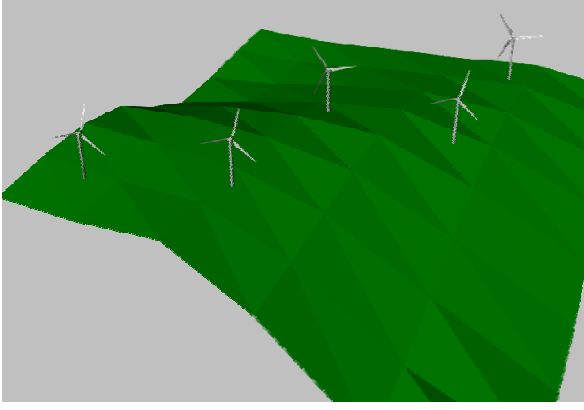
Şekil 4: Rüzgar türbini modeli-1'in RKA analizi $f=6$ GHz, yatay açısız tarama (a) tam iletken olma durumu, (b) iletken üzerine RSM kaplı olması (c) kanatların fiber glass, gövdenin beton olması durumu

Yapılan bu analizlerde rüzgar türbinlerinin geometrik özellikleri ile yapımında kullanılan malzemelerin elektriksel özelliklerinin RKA değerini frekansa ve bakış açısına göre nasıl etkilediği gösterilmiştir.

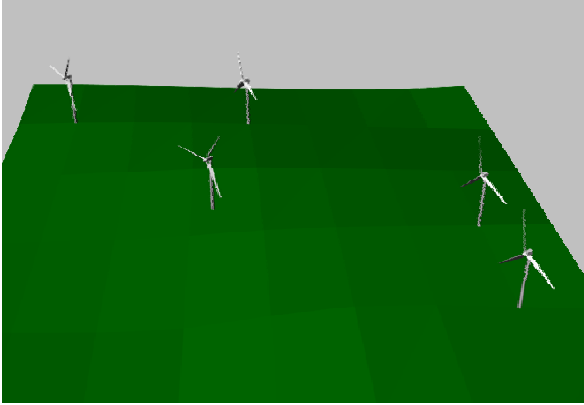
4. TYAR İMGESİ ANALİZİ

Rüzgar türbinlerinin genellikle birden fazlasının bir arada kullanıldığı rüzgar çiftliklerinin 2-B Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) imgesi oluşturularak radarlarda tespit edilen yüksek genlikli saçıcıların analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 5 adet RT-3 modeli değişik coğrafyalarda yerleştirilmiştir. Coğrafya ile birlikte yerin farklı elektriksel özelliklere sahip olması durumu da analizlerde dikkate alınmıştır. Farklı coğrafi konumlara türbinlerin yerleştirilmesi Coğrafi Konum (CK)-1, CK-2 ve CK-3'de yerleşimi sırasıyla Şekil 5 (a), (b) ve (c)'de görülmektedir. CK-1 ve CK-2 toprak, CK-3 off shore olarak adlandırılan çiftliklerin analizlerinin benzetimini yapabilmek amacıyla ise deniz olarak modellenmiştir.

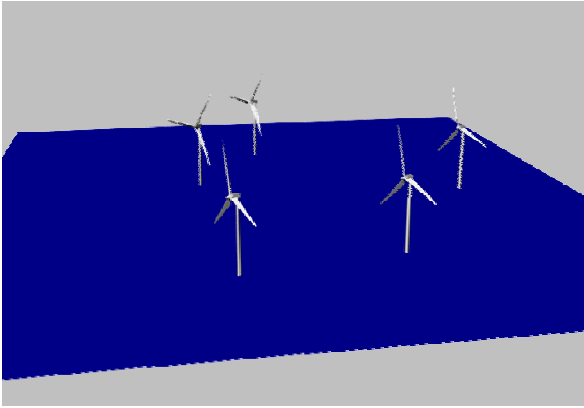
Toprağın elektriksel özellikleri bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 3.0259 - j 0.005$ ve bağıl manyetik permeabilitesi $\mu_r = 1.0$ alınmıştır. Bu toprak özellikleri hacimsel su içeriği 0.001, kum oranı 0.50, kil oranı 0.02, toprak yoğunluğu 1.6 ve toprak parçacıklarının yoğunluğu ise 2.66 olduğu durum için geçerli değerlerdir.



Şekil 5 (a): Beş adet RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-1'de yerleşimi

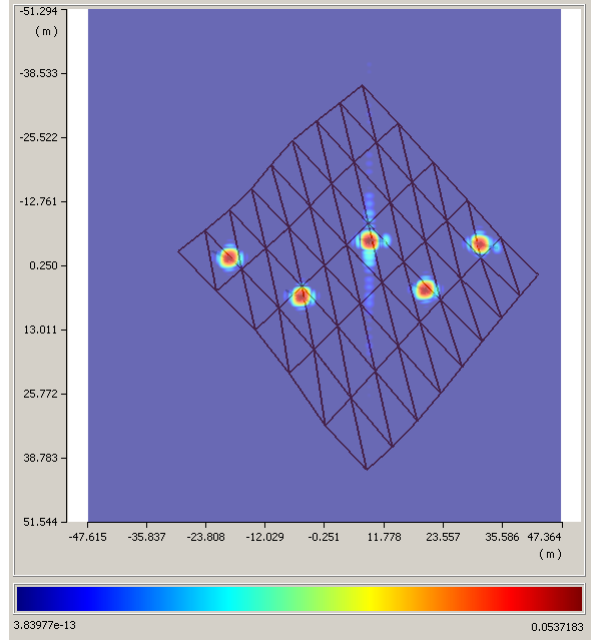


Şekil 5 (b): Beş adet RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-2'de yerleşimi



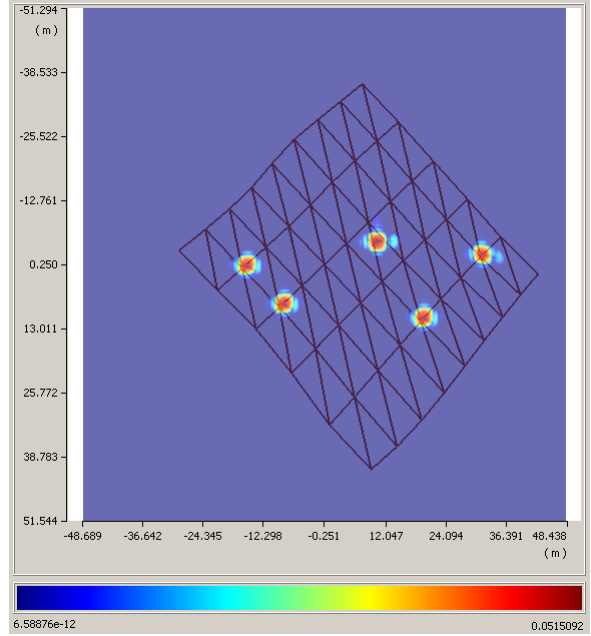
Şekil 5 (c): Beş adet RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-3'de yerleşimi

TYAR-1 analizinde Şekil 5 (a)'da görülen CK-1 kullanılmış ve yer toprak kabul edilmiştir. Analiz $f=10$ GHz frekansında yapılmış, merkezi bakış açısı olarak $\theta=85^\circ$, $\varphi=45^\circ$ alınmıştır. Şekil-6'da görüldüğü gibi rüzgar türbinleri ile birlikte coğrafi özellikler de radarda gözlenen imgenin değişmesine yol açmaktadır. Bu analizde en yüksek yansıtıcı noktanın genliği 0.053 V/m olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6: TYAR-1 analizi, beş adet mükemmel iletken RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-1'de TYAR analizi, $f=10$ GHz, yer toprak

TYAR-2 analizinde, benzer analiz Coğrafi Konum-2 için de tekrarlanmış ve rüzgar türbinleri mükemmel iletken yer ise bir önceki analizde olduğu gibi toprak kabul edilmiştir.

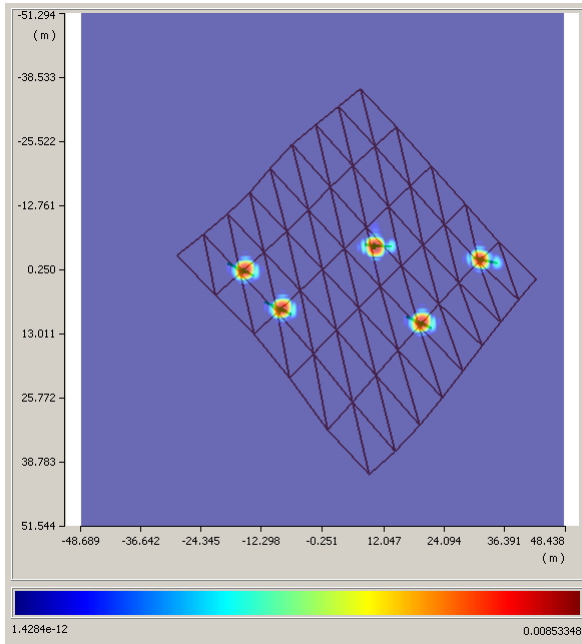


Şekil 7: TYAR-2 analizi, beş adet mükemmel iletken RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-2'de TYAR analizi, $f=10$ GHz, yer toprak

Bu analizde coğrafi konumun imgeye etkisi araştırılmıştır. TYAR-1 analiziyle benzer etkiler bu analizde de görülmüş ve en yüksek yansıtıcı noktanın genliği 0.051 V/m olarak tespit edilmiştir. TYAR-2 analizinin sonuçları Şekil-7'de görülmektedir. Ancak

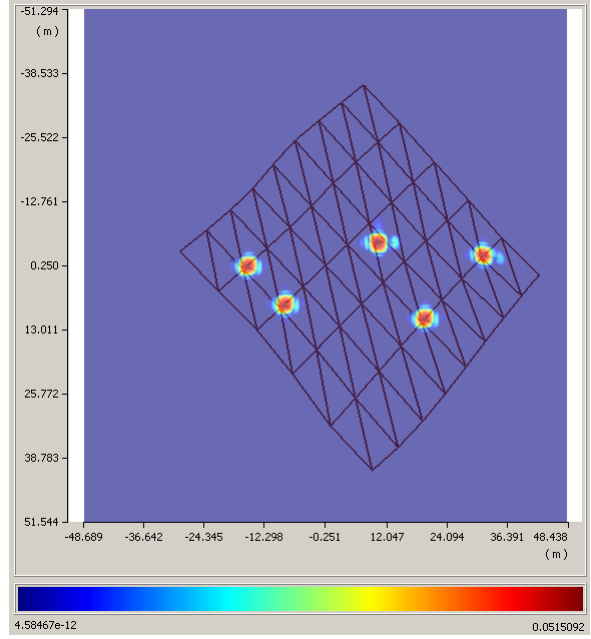
coğrafyanın değişmesi nedeniyle imgede farklılıklar oluştuğu gözlenmiştir.

TYAR-3 analizinde CK-2 kullanılmış ve yer toprak olarak seçilmiştir. RT-3 modelleri özellikleri paragraf 3'te verilmiş olan RSM ile kaplıdır. Analiz $f=10$ GHz frekansında yapılmış, merkezi bakış açısı olarak $\theta=85^\circ$, $\phi=45^\circ$ alınmıştır. Beklendiği gibi bu analiz sonuçları imge olarak şekil-7 ile benzerlik göstermektedir. Ancak türbinler RSM kaplı olduğundan şekil-8'de görüldüğü gibi en yüksek yansıtıcı noktanın genliği 0.0085 V/m olarak tespit edilmiştir. Genlikteki azalma türbinlerde RSM kullanılması sonucu olagelmiştir.



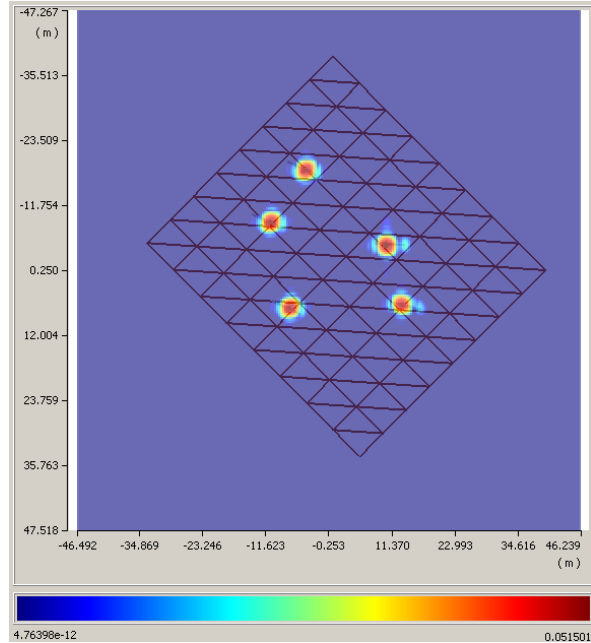
şekil 8: TYAR-3 analizi, beş adet RT-3'ten oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-2'de TYAR analizi, RT'ler RSM kaplı, $f=10$ GHz, yer toprak

TYAR-4 analizinde CK-2 kullanılmış ve TYAR-2 analizinden farklı olarak yer beton olarak seçilmiştir. RT-3 modelleri mükemmel iletkenidir. Analiz $f=10$ GHz frekansında yapılmış, merkezi bakış açısı olarak $\theta=85^\circ$, $\phi=45^\circ$ alınmıştır. şekil-9'da görüldüğü gibi coğrafi özellikler aynı olmakla birlikte yerin yansıtıcılığı farklı olduğu için imgeler benzemekle beraber en yüksek yansıtıcı noktanın genliği 0.051 V/m olarak tespit edilmiştir. İmgelerin, yerin yansıtıcılığına bağlı olarak büyük değişiklik göstermemesinin nedeni analizlerin sıyırma açısına (*grazing angle*) yakın açılarda yapılmış olmasıdır. Böylece yerden gelen katkı minimize edilmiştir.



şekil 9: TYAR-4 analizi, beş adet RT-3'den oluşan çiftliğin Coğrafi Konum-2'de TYAR analizi, RT'ler tam iletken, $f=10$ GHz, yer beton

Yapılan son analiz olan TYAR-5 analizi şekil 5 (c)'de görülen yerin düz olması ve yüzeyin deniz olması durumu için gerçekleştirilmiştir. Bu durumda imgede farklılıklar olmasına karşın maksimum genlik seviyesi 0.051 V/m olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucu şekil-10'da görülmektedir.



şekil 10: TYAR-5 analizi, beş adet RT-3'den oluşan çiftliğin denizde konumlanmış olması durumu TYAR analizi, RT'ler tam iletken, $f=10$ GHz, yer deniz.

5. SONUÇLAR

Bu bildiriye rüzgar türbinlerinin radar performansını etkilemesinde önemli bir ölçüt olan Radar Kesit Alanı değerleri incelenmiş ve rüzgar çiftliklerinin kurulduğu bölgeye göre radar imgelerinin değiştiği gösterilmiştir. Çiftliklerin coğrafi konumunun ve hem türbinlerin hem de konumlandığı arazinin elektriksel özellikleri türbinlerin saçıcılık özelliğini, dolayısıyla radarların tespit performanslarını etkilemektedir. Bu nedenle rüzgar çiftliklerinin kurulumundan önce etkileri analiz edilmeli ve konumlama lisansları verilirken bu analizler yapılarak sonuçlarının dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sengupta, D.L. , “Electromagnetic interference from wind turbines” *Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, USA, 1999.*
- [2] James C. G. Matthews, Carlos Sarno, Richard Herring, “Interaction between radar systems and wind farms” *Antennas & Propagation Conference, Loughborough, UK, 17-18 March 2008.*
- [3] Theil, A. van Ewijk, L.J. , “Radar Performance Degradation due to the Presence of Wind Turbines” *Radar Conference, IEEE, Boston, MA, 17-20 April 2007.*
- [4] Kent, B.M. Hill, K.C. Buterbaugh, A. Zelinski, G. Hawley, R. Cravens, L. Tri-Van Vogel, C. Coveyou, T. , “Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines Part 1: Predicted and Measured Radar Signatures”, *Antennas and Propagation Magazine, IEEE, Vol. 50, 2008, No. 2, 211-219.*
- [5] H. Ling, R.C. Chou, S.W. Lee, “Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 37(2), Sayfa 194-205, 1989.
- [6] Saynak U., Çolak A., Avcıbaşı Y., Bölükbaş D., Tayyar İ.H., Özdemir C., “Seken Işın Yöntemiyle Büyük ve Karmaşık Platformlardan Saçılma Hesabı ve Nümerik Uygulamaları”, *SAVTEK 2008, Ankara, 26-27 Haziran 2008.*
- [7] U. Saynak, A. Colak, Y. Avcıbaşı, D. Bolukbas, I. H. Tayyar, C. Ozdemir, “İletken ve dielektrik yüklü Karmaşık Hedeflerin Radar Kesit Alanlarının Hesaplanması ve 2-B Ters Yapay Açıklıklı Radar İmgelerinin Çıkartılması”, *URSI 2008 Ulusal Kongresi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 22-25 Ekim 2008.*