

# Anten-Platform Etkileşimi Hesaplamalarında Eşdeğer Modellerin Kullanımı

Alper K. Öztürk

ASELSAN AŞ. Radar Elektronik Harp & İstihbarat Sistemleri,  
Anten Teknolojileri Müdürlüğü, Ankara  
akozturk@aselsan.com.tr

**Özet:** Geniş platform üzerinde yayın yapan bir antenin uzak ya da yakın alan örüntüsü kullanılarak eşdeğer akımlarla modellenmesi ele alınmıştır. Eşdeğer akımlar, Rao-Wilton-Glisson (RWG) taban fonksiyonları kullanılarak modellenmiştir. Anten-platform etkileşiminin eşdeğer akım modeline etkisi incelenmiştir. Elde edilen eşdeğer akım dağılımlarının, büyük problemlerin çözümünde kaynak olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

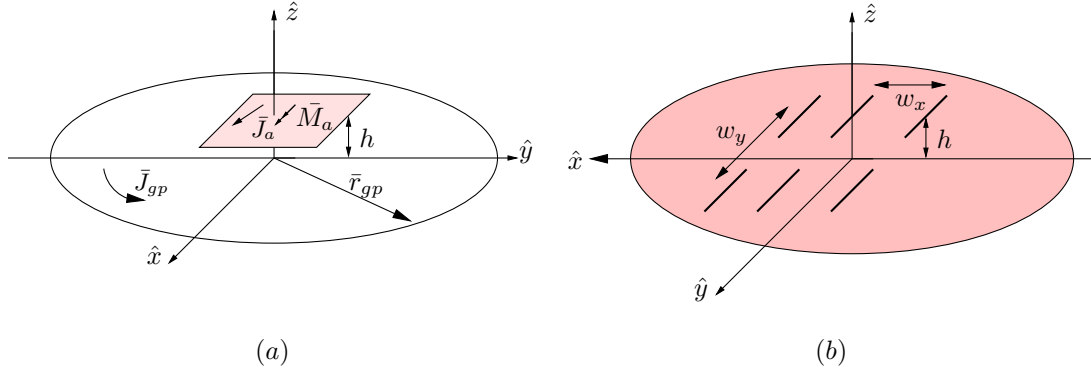
## 1. Giriş

Işıma örüntüsü bilinen bir antenin, belirli bir yüzey üzerinde tanımlanmış elektrik/manyetik akımlar aracılığı ile eşdeğer modelinin oluşturulması çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Eşdeğer model, antenin uzak ya da yakın alan ışıma örüntüsü kullanılarak elde edilebilir. Bu yöntem, ilgili uzay içinde anten ile aynı elektromanyetik alan değerlerini veren ve söz konusu antenin boyutlarına göre belirlenen hayali bir yüzey üzerine konumlandırılmış elektrik/manyetik akım dağılımlarının hesaplanması esasına dayanır. Eşdeğer model yöntemi, yakın-uzak alan donusumu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, boş uzayda yayın yapan bir antenin, küresel yakın alan örüntüsü kullanılarak, dikdörtgensel bir yüzeyde tanımlanmış manyetik akımlarla modellenmesi söz konusu antenin uzak alan örüntüsünün hesaplanmasında kullanılmıştır [1]-[3]. Bu yöntem, çalışma ortamından kaynaklanan yansıma, kenar ve kama kırınımları gibi saçınım etkilerinin antenin ışıma örüntüsünde meydana getirdiği bozulmaların saptanmasına da olanak sağlamaktadır. Bu doğrultuda, gerçek anten modelinin platform ile beraber oluşturduğu elektromanyetik problem, hassas çözüm yöntemleri kullanılarak çözülebilir. Ancak, hassas çözüm yöntemlerinin bu tür bir probleme uygulanması oldukça karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Örneğin, büyük bir hava platformu üzerinde çalışan bir anten probleminin Momentler Yöntemi (MY) ile çözümünü ele alalım. Bu problemde, hava platformu dalga boyunun onda biri büyüklüğünde üçgenlerle modellenenebilir. Öte yandan antende bulunan küçük detayların geometrik olarak modellenenebilmesi için oldukça küçük üçgenler kullanılması gerekir. Dolayısıyla MY çözümünde taban fonksiyonlarının tanım bölgeleri birbirinden çok farklı büyüklükte olur. Bu durum MY matrisinin yakınsaklık özelliklerini etkileyerek çözümü zorlaştırır. Bu sorunu engellemek için Eşdeğerlik İlkesi [4] ve uzam ayrışımı (Domain Decomposition) [5] yöntemlerine dayanan teknikler kullanılmaktadır. Eşdeğer modellerin kullanımı, bu tür sayısal hesaplama sorunlarının çözülmesi yanında, tasarımı tamamlanmış bir antenin ölçüm değerleri kullanılarak analiz yapılmasına da olanak sağlar. Pratik uygulamalarda, çeşitli sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak tasarlanıp üretilen bir antenin performansı benzetim sonuçlarına göre farklılıklar gösterebilir. Dolayısıyla yapılan analizlerde benzetim sonuçları yerine, üretilmiş antene ait ölçüm sonuçlarının kullanılması önem kazanmaktadır.

Bu bildiride, geniş platform üzerinde yayın yapan bir antenin uzak ya da yakın alan örüntüsü kullanılarak eşdeğer akımlarla modellenmesi ele alınmıştır. Eşdeğer akım dağılımları, Eşdeğerlik Teoremi ya da integral denklemleri kullanılarak elde edilebilir. Bu çalışmada integral denklemleri kullanılarak elde edilen eşdeğer modeller incelenmiştir. Eşdeğer akımlar, Rao-Wilton-Glisson (RWG) taban fonksiyonları [6] kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama, MY uygulamalarına benzer şekilde, taban fonksiyonlarının gözlem noktalarında oluşturduğu toplam alan değerlerinin bilinen ışıma değerlerine eşitlenmesi ile yapılır. Elde edilen dikdörtgensel matris sistemi tekil değer ayrışımı yöntemi ile çözülmüştür. Antenin boş uzay örüntüsü kullanılarak elde edilen eşdeğer model, platform-anten etkileşimini hesaba katmadığından, hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Bu çalışmada söz konusu etkileşim Fiziksel Optik (FO) yöntemi kullanılarak hesaba katılmıştır. Bu yöntemle hesaplanan eşdeğer akım dağılımları anten-platform probleminin MY ile çözümünde kaynak olarak kullanılmış ve elde edilen uzak alan örüntüsü gerçek anten-platform probleminin örüntüsü ile kıyaslanmıştır.

## 2. Eşdeğer Model

Platform üzerinde ışıma yapan bir antenin eşdeğer kaynaklarla modellenmesini izah etmek için mükemmel iletken dairesel bir platform üzerinde ışıma yapan bir anten yapısını ele alacağız. Söz konusu anten-platform yapısını



Şekil 1: (a) Dikdortgensel  $S_a$  yüzeyinde tanımlanmış  $\bar{J}_a$  ve  $\bar{M}_a$  eşdeğer akımları. (b)  $r_{gp}$  yarıçaplı dairesel platform üzerine yerleştirilmiş 3X2 dipol anten dizisi.

merkez kabul eden  $r_m$  yarıçaplı  $S_m$  küresel yüzeyi üzerinde anten-platform yapısının yaydığı elektrik alan değerlerinin ( $\bar{E}(r_m)$ ) bilindiğini varsayalım. Şekil 1 (a)'da görüldüğü gibi,  $r_{gp}$  yarıçaplı platforma göre  $h$  yüksekliğinde yer alan anten,  $\ell_x \times \ell_y$  boyutlarındaki  $S_a$  dikdortgensel yüzeyi üzerinde tanımlanmış  $\bar{J}_a$  ve  $\bar{M}_a$  elektrik ve manyetik akımları ile modellenecektir. Bu akımların platform yüzeyinde oluşturdukları akım  $J_{gp}$  ile gösterilmiştir. Bilinen elektrik alan değerlerinin  $S_a$  yüzeyi üzerinde tanımlanan  $\bar{J}_a$ ,  $\bar{M}_a$  eşdeğer akımları ve platform üzerinde indüklenen  $\bar{J}_{gp}$  tarafından oluşturulduğu farz edelim.  $S_a$  ve platform üzerindeki eşdeğer akımlarla  $\bar{E}$  arasındaki ilişki

$$\bar{E}_1(r_m) = \mathcal{L}_J^E(r_m, r')\{\bar{J}_a\} + \mathcal{L}_M^E(r_m, r')\{\bar{M}_a\}, \quad (1)$$

$$\bar{E}_2(r_m) = \mathcal{L}_J^E(r_m, r'_{gp})\{2\hat{n} \times [\mathcal{L}_J^H(r_{gp}, r')\{\bar{J}_a\} + \mathcal{L}_M^H(r_{gp}, r')\{\bar{M}_a\}]\}, \quad (2)$$

$$\bar{E}(r_m) = \bar{E}_1(r_m) + \bar{E}_2(r_m) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu gösterimde, verilen bir elektrik/manyetik akım dağılımının oluşturduğu elektrik ve manyetik alanları ifade etmek için  $\mathcal{L}_{J,M}^{E,H}$  operatörleri kullanılmıştır. Bu operatörler

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_J^E(r_m, r')\{\bar{J}(r')\} &= \frac{-1}{4\pi j\omega\epsilon} \nabla \times \int_{S'_n} \hat{r} \times \bar{J}(r') \frac{1+jkr}{r^2} e^{-jkr} dS' \\ \mathcal{L}_M^E(r_m, r')\{\bar{M}(r')\} &= -\frac{1}{4\pi} \nabla \times \int_{S'_n} \bar{M}(r') \frac{e^{-jkr}}{r} dS' \\ \mathcal{L}_J^H(r_{gp}, r')\{\bar{J}(r')\} &= -\frac{1}{4\pi} \int_{S'_n} \hat{r} \times \bar{J}(r') \frac{1+jkr}{r^2} e^{-jkr} dS' \\ \mathcal{L}_M^H(r_{gp}, r')\{\bar{M}(r')\} &= \frac{1}{4\pi j\omega\mu} \nabla \times \nabla \times \int_{S'_n} \bar{M}(r') \frac{e^{-jkr}}{r} dS'. \end{aligned} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $r_m$ ,  $S_m$  yüzeyi üzerindeki bir gözlem noktası,  $r'$  kaynak noktası,  $\bar{r}$  ise kaynak noktası ile gözlem noktası arasındaki vektördür.  $S'_n$  ilgili taban fonksiyonunun tanım bölgesini,  $\bar{r}_{gp}$  platform üzerindeki noktaları,  $\hat{n}$  ise platform üzerinde tanımlanan yüzey normalini temsil etmektedir. (1) ifadesi  $\bar{J}_a$  ve  $\bar{M}_a$  eşdeğer akımlarının  $S_m$  üzerinde oluşturduğu direkt alan değerlerini verir. (2) ifadesi ise  $\bar{J}_{gp}$  akımının oluşturduğu, platformdan yansıyan elektrik alan değerlerini verir. Fiziksel Optik yaklaşımı kullanılırsa,  $\bar{J}_{gp}$  değeri platformu aydınlatan manyetik alan cinsinden,  $\bar{J}_{gp} = 2\hat{n} \times \bar{H}^i$  olarak ifade edilebilir.  $\bar{H}^i$  de  $\bar{J}_a$  ve  $\bar{M}_a$  cinsinden ifade edilirse yalnızca bulmak istediğimiz eşdeğer akım değerlerini içeren (2) elde edilir.  $\bar{J}_a$  ve  $\bar{M}_a$  akımlarının RWG taban fonksiyonları açılımlarını  $\bar{J}_a(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N I_n^{(a)} \bar{f}_n(\bar{r})$  ve  $\bar{M}_a(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N I_n^{(f)} \bar{f}_n(\bar{r})$  şeklinde tanımlayalım. Bu ifadeler (1)'de kullanılırsa

$$\begin{pmatrix} \bar{E}_{1\theta} \\ \bar{E}_{1\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_J^E(r, r') \cdot \hat{\theta}_s & \mathcal{L}_M^E(r, r') \cdot \hat{\theta}_s \\ \mathcal{L}_J^E(r, r') \cdot \hat{\phi}_s & \mathcal{L}_M^E(r, r') \cdot \hat{\phi}_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_a^{(a)} \\ \bar{I}_a^{(f)} \end{pmatrix}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{\mathbf{Z}}_a \bar{\mathbf{I}}_a. \quad (5)$$

denklemleri elde edilir. Burada  $\bar{\mathbf{I}}_a^{(a),(f)}$ ,  $\mathbf{I}_n^{(a),(f)}$  değerlerini içeren vektörleri ifade etmektedir ( $n = 1 \dots N$ ). Benzer şekilde, taban fonksiyonları açılımları (2)'de kullanılırsa platformdan yansıyan alan

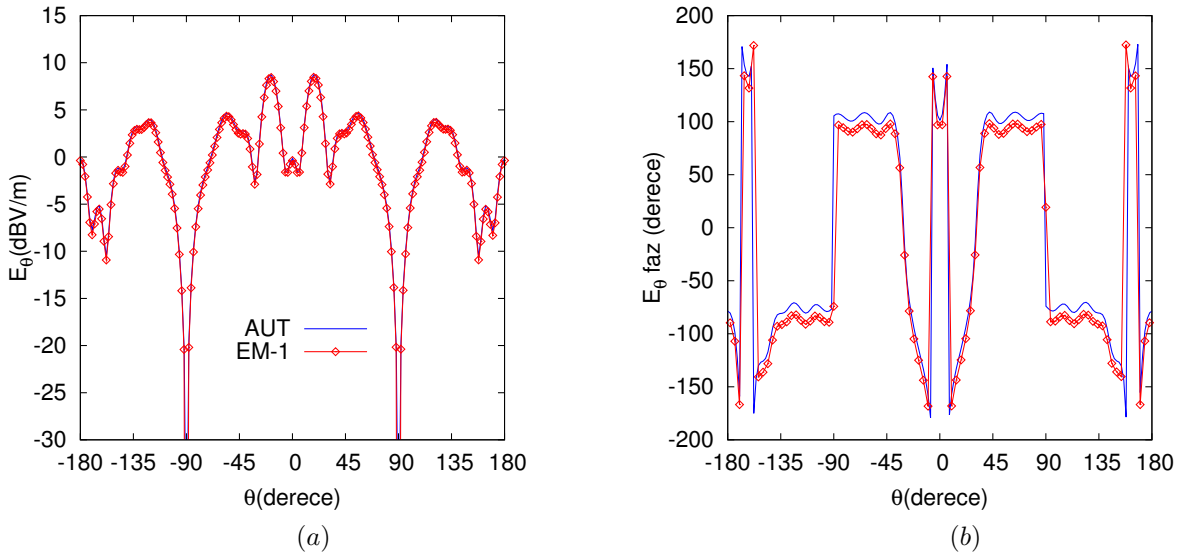
$$\begin{pmatrix} \bar{E}_{2\theta} \\ \bar{E}_{2\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_J^E(r, r'_{gp}) \cdot \hat{\theta}_s \\ \mathcal{L}_J^E(r, r'_{gp}) \cdot \hat{\phi}_s \end{pmatrix} 2\hat{n} \times (\mathcal{L}_J^H(r_{gp}, r') \quad \mathcal{L}_M^H(r_{gp}, r')) \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{I}}_a^{(a)} \\ \bar{\mathbf{I}}_a^{(f)} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{V}}_2 = \bar{\mathbf{Z}}_{gp} \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{I}}_a. \quad (6)$$

olur. Burada  $\bar{\mathbf{Z}}_{gp}$  platform akımlarını elektrik alan değerleri ile ilişkilendiren ( $2N_{obs} \times N_{gp}$ ) boyutlu,  $\bar{\mathbf{C}}$  ise platform akımları ile  $\bar{\mathbf{J}}_a$  ve  $\bar{\mathbf{M}}_a$  akımları arasındaki FO yöntemine dayalı ilişkiyi ifade eden ( $N_{gp} \times 2N$ ) boyutlu bir matristir.  $N_{obs}$  ve  $N$  sırası ile  $S_m$  üzerinde alınan gözlem noktası sayısı ve  $S_a$  üzerinde tanımlanan bilinmeyen sayısıdır.  $N_{gp}$  ise platform üzerinde alınan integrasyon noktalarının sayısıdır. Son olarak, (3), (5) ve (6) kullanılarak  $\bar{\mathbf{J}}_a$ ,  $\bar{\mathbf{M}}_a$  ve  $\bar{\mathbf{E}}$  arasındaki ilişkiyi ifade eden matris denklemi elde edilir:

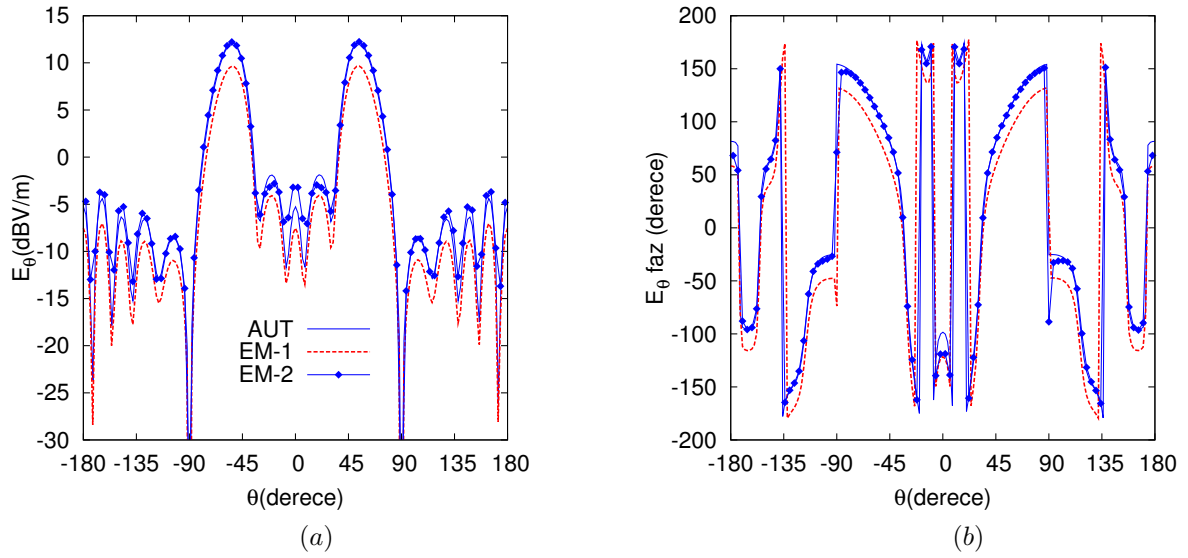
$$\bar{\mathbf{V}} = \bar{\mathbf{V}}_1 + \bar{\mathbf{V}}_2 = (\bar{\mathbf{Z}}_a + \bar{\mathbf{Z}}_{gp} \bar{\mathbf{C}}) \bar{\mathbf{I}}_a. \quad (7)$$

Bu sistem ( $2N_{obs} \times 2N$ ) boyutlarındadır. Genel olarak  $N_{obs} \neq N$  olduğundan, elde edilen dikdörtgensel matris sistemi en küçük kareler yöntemi ile çözümlenmelidir. Bu işlem, tekil değer ayrışımı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2:  $r_{gp} = 2\lambda$  yarıçaplı dairesel bir platform üzerine yerleştirilmiş  $3 \times 2$  dipol anten dizisi için  $\phi = 90^\circ$  kesitinde uzak-alan örüntüsü.  $f = 5$  GHz,  $h = 3\lambda$ .  $w_x = 0.3\lambda$ ,  $w_y = 0.5\lambda$ . Eşdeğer model için  $\ell_x = \lambda$ ,  $\ell_y = 2\lambda$ ,  $r_m = 3\lambda$ . (AUT: Gerçek anten-platform çözümü, EM-1: Eşdeğer model)

Uygulanan yöntemin doğruluğunu test etmek için Şekil 1-(b)'de gösterilen  $3 \times 2$  anten dizisini kullanacağız.  $f = 5$  GHz frekansında yarım dalgaboyu dipollerden oluşan bu dizide elemanlar arası mesafe  $w_x = 0.3\lambda$  ve  $w_y = \lambda$  olarak seçilmiştir. Anten  $r_{gp} = 2\lambda$  yarıçaplı dairesel bir platform üzerinde,  $h$  yüksekliğinde bulunmaktadır. Eşdeğer akımlar, yukarıda anlatıldığı gibi, antenin bulunduğu düzlemde yer alan dikdörtgensel bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Bu problemde, söz konusu yüzeyin boyutları  $(\ell_x, \ell_y) = (\lambda \times 2\lambda)$  alınmıştır. Hesaplanan eşdeğer akımlar platformdan saçınım probleminin MY ile çözümünde kaynak olarak kullanılmıştır. Öncelikle,  $h = 3\lambda$  durumunu ele alalım. Eşdeğer akımlar kullanılarak elde edilen uzak-alan örüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada 'EM-1' etiketi ile gösterilen sonuçlarda,  $\bar{\mathbf{J}}_a$  ve  $\bar{\mathbf{M}}_a$  hesaplanırken platformun varlığı hesaba katılmamıştır. Bir başka deyişle, eşdeğer akımlar antenin boş uzay örüntüsü ve yalnızca (5) ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Eşdeğer akımlar hesaplanırken platform-anten etkileşimi hesaba katılmasa da elde edilen sonuçlar orijinal anten kullanılarak elde edilen uzak-alan örüntüsü ile oldukça iyi uyumaktadır. Dolayısıyla bu konfigürasyon için anten



Şekil 3:  $r_{gp} = 2\lambda$  yarıçaplı dairesel bir platform üzerine yerleştirilmiş 3X2 dipol anten dizisi için  $\phi = 90^\circ$  kesitinde uzak-alan örüntüsü.  $f = 5$  GHz,  $h = 0.5\lambda$ .  $w_x = 0.3\lambda$ ,  $w_y = 0.5\lambda$ . Eşdeğer model için  $\ell_x = \lambda$ ,  $\ell_y = 2\lambda$ ,  $r_m = 3\lambda$ . (AUT: Gerçek anten-platform çözümü, EM-1, EM-2: Eşdeğer model)

üzerinde oluşan akımların platformun varlığından etkilenmediği söylenebilir. Eşdeğer akımların hesaplanmasında çalışma ortamından kaynaklanan etkileri gösterebilmek için, anteni platforma daha yakın bir noktaya yerleştirilim ( $h = 0.5\lambda$ ). Bu durumda elde edilen uzak-alan örüntüleri Şekil 3'te göstermiştir. Burada, 'EM-2' etiketi ile gösterilen sonuçlarda platform etkileri yukarıda tarif edildiği şekilde, (7) kullanılarak elde edilmiştir. İki yaklaşım karşılaştırıldığında, 'EM-2' sonuçlarının orijinal anten kullanılarak elde edilen sonuçlarla çok daha iyi uyduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu bildiride platform üzerinde ışıma yapan bir antenin eşdeğer akımlarla modellenmesi ele alınmıştır. Antenin küresel yakın alan örüntüsü kullanılarak, uzak alan bölgesinde söz konusu anten ile aynı alan değerlerini veren elektrik ve manyetik akım dağılımları integral denklemleri yöntemi ile hesaplanmıştır. Platform üzerinde ışıma yapan antenin uzak alan örüntüsü, orijinal anten yerine bu akım dağılımları kullanılarak bulunmuştur. Antenin boş uzay örüntüsü kullanılarak elde edilen eşdeğer modelin, platform-anten arası etkileşimlerin düşük olduğu durumlarda iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ancak bu etkileşimler anten üzerinde oluşan akımları etkileyecek kadar kuvvetli olursa, boş uzay örüntüsü kullanılarak elde edilen eşdeğer problem doğru sonuçlar vermemektedir. Bu durumda, eşdeğer akımlar hesaplanırken platform-anten etkileşiminin hesaba katılması gerektiği gösterilmiştir. Bu etkileşimin integral denklemlerine katkısı fiziksel optik yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

#### Kaynaklar

- [1]. F. Las-Heras ve T. K. Sarkar, "Radial field retrieval in spherical scanning for current reconstruction and NF-FF transformation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt AP-50, no. 6, s. 866874, 2002.
- [2]. F. Las-Heras, "Sequential reconstruction of equivalent currents from cylindrical near field," *Electronics letters*, cilt 35, no. 3, s. 211212, 1999.
- [3]. A. Taaghoul ve T. K. Sarkar, "Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry, utilizing an equivalent magnetic current," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, cilt 38, no. 3, s. 536542, 1996.
- [4]. M. Li ve W. C. Chew, "Wave-field interaction with complex structures using equivalence principle algorithm," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt. AP-55, no. 1, s. 130138, 2007.
- [5]. A. Barka ve P. Caudrillier, "Domain decomposition method based on generalized scattering matrix for installed performance of antennas on aircraft," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt AP-55, no. 6, s. 1833 1842, 2007.
- [6]. S. M. Rao, D. Wilton ve A. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt AP-30, no. 3, s. 409418, 1982.