KÜRENİN MONOSTATİK VE BİSTATİK RADAR HEDEF KESİTİNİN HESAPLANMASI VE DUYARLILIK ANALİZİ

Akül KAVAS ,Refet RAMİZ

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
80750, Beşiktaş / İSTANBUL, Tel:259 70 70, Dahili: 2880, Fax:0212 259 49 67,
e-mail: kavas@yildiz.edu.tr , ramiz@yildiz.edu.tr, http://personel.cc.yildiz.edu.tr

Anahtar Sözcükler : Saçılma, Radar hedef kesiti, Mie çözümü, mükemmel iletken küre, saçılma

ABSTRACT

In this work,we studied the radar cross sections of the perfectly conducting sphere and dielectric filled spheres respectively. The electric and magnetic fields are defined in each region by using the electric and magnetic vector potentials (A, F). These potentials are expressed by using the Bessel and Hankel functions defined in each region. By using these expressions the monostatic and bistatic radar cross-sections were calculated accordingly. As an example, the monostatic and bistatic radar cross-sections of a perfectly conducting sphere is examined and its sensitivity analysis made due to the parameters of N, ϕ , θ and f.

1.GİRİŞ

Radar hedef kesitinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar 1940'lı yıllarda başlamıştır. Günümüzde ise değişik teknikler kullanılarak radar hedef kesitinin daha doğru bir şekilde elde edilmesine çalışılmaktadır. Bu doğrultuda radar hedef kesitinin hesaplanmasında nümerik yaklaşımlar ve nümerik metotların kullanımı yaygınlaşmıştır.[1]-[3].Radar hedef kesitinin hesaplanmasında kullanılan gelen, saçılan ve toplam alan ifadeleri değişik yöntemler kullanılarak elde edilebilmektedir. Genel olarak kullanılan yöntemler; geometrik optik, fiziksel optik, integral denklemleri, modal tekniklerdir. Yine nümerik metotlarla, saçılan alan integrallerinde yer alan yüzey akımları öngörülen farklı yaklaşıklıklarla çözülmeye çalışılmıştır.

Radar hedef kesiti hesaplanmasında kullanılan metodlar başlıca iki ana kısımda toplanabilir; tam çözüm ve deneysel ölçüm sonuçlarından hareketle geliştirilen çözümler. Burada yapılan çalışmada ise öngörülen "ka" değerleri için, dalga denkleminin en genel çözümünden hareketle, herbir bölge için alan ifadeleri elde edilerek radar hedef kesiti hesaplanmaktadır.

2.RADAR HEDEF KESİTİ

Herhangi bir cismin radar hedef kesiti, saçılan alanın güç yoğunluğunun gelen alanın güç yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Buradan hareketle radar hedef kesiti, hedef ile radar arasındaki uzaklıktan bağımsız olarak hesaplanabilmektedir.[4].

Genel olarak radar hedef kesiti,

$$\sigma = \lim_{r\to\infty}\left\{4\pi r^2 |E_s|^2 / |E_g|^2\right\} \tag{1}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,

r : gözlem noktası ile cisim arasındaki uzaklık,

E_g,E_s : sırasıyla gelen ve saçılan elektrik alanları,

ifade etmektedir. Saçılan alan, gelen alanın cisim ile etkileşmesi sonucu elde edildiğinden, toplam alan gelen ve saçılan alanların toplamı olarak tanımlanır. (1) ifadesinde de belirtilen gelen ve saçılan alanlar, en genel anlamda cismin konfigürasyonuna, cismi aydınlatan dalganın polarizasyonuna, cismi aydınlatan dalganın geliş doğrultusu ile saçılan alanın doğrultusu arasındaki açıya bağlı olarak değişmektedir.

Genel olarak radar hedef kesiti verici, hedef ve alıcının konumlarına bağlı olarak aşağıdaki şekillerde tanımlanabilir;

(i) Monostatik radar hedef kesiti (geri saçılma hedef kesiti) : Alıcı ve vericinin aynı doğrultuda olduğu (α=0) durumda tanımlanan hedef kesitidir.(Şekil-1).

(ii) İleri yönde radar hedef kesiti: α=180° olduğu özel durumdaki radar hedef kesitidir.

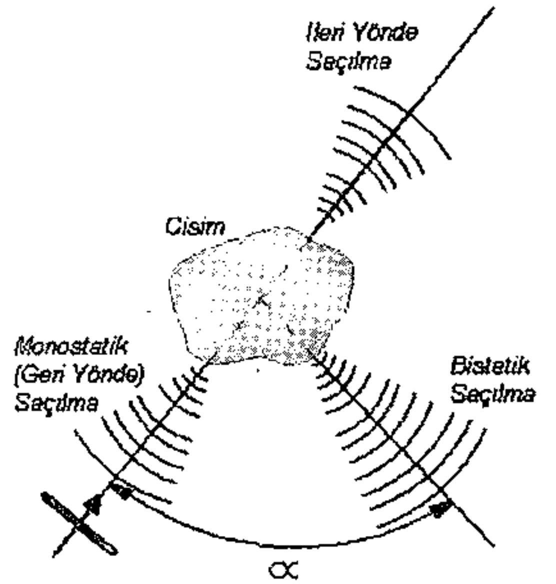
(iii) Bistatik radar hedef kesiti (saçıcı hedef kesiti): Alıcı cisim ve vericinin birbirleriyle Şekil-1'de belirtildiği gibi farklı konumlarda bulunduğu durumda tanımlanan radar hedef kesitidir.

3.ALAN İFADELERİNİN HESAPLANMASI

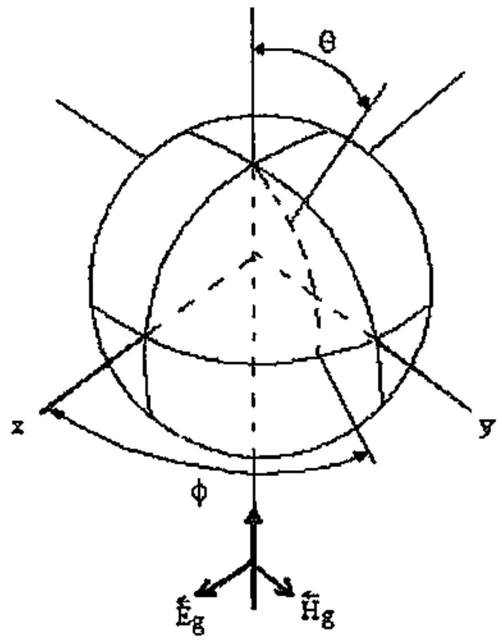
3.1.Elektrik ve Magnetik Vektör Potansiyelleri

Radar hedef kesitinin belirlenmesinde küreden saçılma probleminin incelenmesi, kürenin 3-boyutlu, eksenel simetriye sahip bir cisim olması, bu nedenle diğer cisimlerin radar hedef kesitlerinin saçılma özelliklerininölçülmesinde referans saçıcı olarak alınması açısından önemlidir.

Küresel geometri içeren problemler, elektromagnetik sınır değer problemlerinin önemli bir sınıfını oluşturmaktadırlar. Sözkonusu yapıların bir kısmı metalik duvarlardan geri kalan kısmı dielektrik malzemeden oluşturulabilmektedir. Ele alınan yapı tarafından desteklenen alan konfigürasyonları, sözkonusu yapıyı bir sınır değer problemi olarak analiz etmekle elde edilebilir. Burada yapılan çalışmada bir küreden meydana gelen saçılma, en genel alan ifadeleri hesaplanarak belirlenmeye çalışılmıştır. (Şekil-2).



Şekil-1.Monostatik ve Bistatik Saçılma



Şekil-2.Küresel Saçılma Geometrisi

Ele alınan yapının sınır yüzeyi küre olduğu için saçılma problemini küresel koordinatlarda incelemek daha uygundur. Burada da küresel geometriye sahip sınır değer probleminde elektrik ve magnetik alanlar küresel koordinatlarda sağlanmalıdır.

Problemi basitleştirmek amacı ile, ortamın kaynak içermediğini ve kayıpsız olduğunu kabul edelim. Elektrik alanın genel çözümü şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{E}(r,\theta,\phi) = E_r(r,\theta,\phi)\,\bar{a}_r + E_\theta(r,\theta,\phi)\,\bar{a}_\theta + E_\phi(r,\theta,\phi)\,\bar{a}_\phi \quad (2)$$

Bu elektrik alan ifadesi küresel koordinatlarda tanımlanmış aşağıdaki dalga denklemini sağlamalıdır:

$$(\nabla^2 + \beta^2)\,E(r,\theta,\phi) = 0 \quad (3)$$

(2) ile belirtilen elektrik alan ifadesi dalga denkleminde yerine konduğu durumda;

$$\nabla^2(E_r\,\bar{a}_r) \neq -\beta^2 E_r\,\bar{a}_r \quad (4a)$$

$$\nabla^2(E_\theta\,\bar{a}_\theta) \neq -\beta^2 E_\theta\,\bar{a}_\theta \quad (4b)$$

$$\nabla^2(E_\phi\,\bar{a}_\phi) \neq -\beta^2 E_\phi\,\bar{a}_\phi \quad (4c)$$

olacağı, bir başka deyişle genel dalga denkleminin üç basit skaler dalga eşitliğine indirgenemediği görülür. Bu durumda dalga denklemini sağlayan alan ifadeleri hesaplanama-maktadır. Bu göz önüne alınarak küresel yapılar tarafından desteklenen geçerli alan konfigürasyonlarını hesaplamak için, burada yapılan çalışmada elektrik ve magnetik vektör potansiyelleri (A, F) kullanılmıştır. F ve A, skaler Helmholtz denkleminin seçilen koordinat sisteminde çözümüdür. Böylelikle bir küreye gelen ve saçılan alanlar, TE ve TM modlarının süperpozisyonundan elde edilebilir.

Elektrik vektör potanesiyeli (A), ortamda magnetik akım kaynaklarının bulunmadığı (M=0), buna karşın elektrik akım kaynaklarının var olduğu kabulü altında tanımlanmaktadır. Yine, magnetik vektör potansiyeli (F), ortamda elektriksel akım kaynaklarının bulunmadığı (J=0), buna karşın magnetik akım kaynaklarının var olduğu kabulü altında tanımlanmaktadır.

3.2. Vektör Potansiyellerinden Hareketle Alan İfadelerinin Tanımlanması

Elektrik ve magnetik vektör potansiyelleri kullanılarak elektrik alan bileşenleri küresel koordinatlarda aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

TE^r modu için alan ifadeleri ($A = 0$; $F = F_r \bar{a}_r$);

$$E_r = 0 \quad (5)$$

$$E_\theta = -\frac{1}{\varepsilon \cdot r}\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial F_r}{\partial \phi} \quad (6)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\varepsilon \cdot r}\frac{\partial F_r}{\partial \theta} \quad (7)$$

TM^r modu için alan ifadeleri ($F = 0$; $A = A_r \bar{a}_r$);

$$E_r = \frac{1}{j\omega\varepsilon\mu}\left(\frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} + \beta^2 A_r\right) \quad (8)$$

$$E_\theta = \frac{1}{j\omega\varepsilon\mu}\frac{1}{r}\frac{\partial^2 A_r}{\partial r\,\partial\theta} \quad (9)$$

$$E_\phi = \frac{1}{j\omega\varepsilon\mu}\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial^2 A_r}{\partial r\,\partial\phi} \quad (10)$$

Herhangi bir ortamdaki toplam elektrik alan, o bölgede TE^r ve TM^r modlarının oluşturduğu elektrik alanların süperpozisyonundan hareketle hesaplanabilir;

$$E_T = E_{TE} + E_{TM} \quad (11)$$

Monostatik ve bistatik radar hedef kesitlerinin belirlenebilmesi, ilgilenilen bölgedeki elektrik ve magnetik vektör potansiyellerinin tanımlanması ve (5)-(10) bağıntıları ile verilen alan ifadelerinin hesaplanması ile mümkün olacaktır.

4. BİR KÜRENİN DÜZLEM DALGA İLE UYARILMASI

r = a yarıçaplı bir kürenin Şekil-2'de gösterildiği gibi z doğrultusunda ilerleyen bir düzlem dalga ile aydınlatıldığı kabul edilsin. Düzlem dalga,

$$E^g = E_x^g \, \vec{a}_x = E_0 \, e^{-j\beta z} \, \vec{a}_x \quad (12)$$

yazılabilir. Düzlem dalga küresel koordinatlarda ise

$$E^g = E_0 \, e^{-j\beta r \cos\theta} \, \vec{a}_x \quad (13)$$

dir. Bir düzlem dalganın, sonsuz sayıda küresel dalga fonksiyonlarının toplamı ile ifade edilebileceği kabulu altında,

$$E^g = E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{j^{-n}(2n+1)}{\beta r} \tilde{J}_n(\beta r) P_n(\cos\theta) \quad (14)$$

yazılabilir. Yine gelen alan küresel koordinatlardaki bileşenleri cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E^g = E_r^g \, \vec{a}_r + E_\theta^g \, \vec{a}_\theta + E_\phi^g \, \vec{a}_\phi \quad (15)$$

Yukarıda tanımlanan düzlem dalganın herbir alan bileşeni sırasıyla TE^r, TM^r modundaki alan bileşenlerine eşitlenirse, vektör potansiyelleri aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$F_r^g = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega \eta} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \tilde{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (16)$$

$$A_r^g = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \tilde{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (17)$$

Burada,

$$\tilde{J}_n(\beta r) = (\beta r) \, j_n(\beta r) \quad (18)$$

ve

$$P_n^1(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta}(P_n(\cos\theta)) \quad (19)$$

Cisme gelen bir uniform düzlem dalganın alan bileşenlerinin, A_r^g, F_r^g potansiyelleri kullanılarak ifade edilebileceği gözönünde bulundurularak, küreden saçılan alanlar da yine A_r^s, F_r^s potansiyelleri kullanılarak ifade edilebilir.

4.1. Mükemmel İletken Küreden Saçılma

Mükemmel iletken kürenin içinde alan davranışı bulunmadığı gözönüne alınarak vektör potansiyelleri şu şekilde tanımlanabilir;

$$F_r^s = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega \eta} \sum_{n=1}^{\infty} c_n \tilde{H}_n^{(2)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (20)$$

$$A_r^s = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \tilde{H}_n^{(2)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (21)$$

Toplam alan ise (r > a bölgesinde),

$$E^T = E^g + E^s \quad (22)$$

ifadesinden hareketle bulunabilir. b_n ve c_n katsayılarını bulmak için toplam alanın sınır yüzeyi (burada küre yüzeyi) üzerinde sıfıra eşit olması gerektiğinden hareketle:

$$E_\theta^T = E_\theta^g + E_\theta^s \Big|_{r=a,\,0\le\theta\le\pi,\,0\le\phi\le 2\pi} \quad (23)$$

$$E_\phi^T = E_\phi^g + E_\phi^s \Big|_{r=a,\,0\le\theta\le\pi,\,0\le\phi\le 2\pi} \quad (24)$$

yazılabilir. Burada b_n ve c_n katsayıları,

$$b_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\left[\frac{d}{d(\beta r)}(\tilde{J}_n(\beta r))\right]_{r=a}}{\left[\frac{d}{d(\beta r)}(\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r))\right]_{r=a}} \quad (25)$$

$$c_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \quad (26)$$

A_r^s, F_r^s (5)-(10) bağıntılarında yerine konularak alan bileşenleri hesaplanmıştır.

4.2. Dielektrik Küreden Saçılma

Dielektrik kürenin sırasıyla dışında ve içindeki alan davranışı gözönüne alınarak, vektör potansiyelleri şu şekilde tanımlanabilir:

r > a bölgesi için;

$$F_r^s = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega \eta} \sum_{n=1}^{\infty} e_n \tilde{H}_n^{(1)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (27)$$

$$A_r^s = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} d_n \tilde{H}_n^{(1)}(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (28)$$

r < a bölgesi için;

$$F_r^d = E_0 \frac{\sin\phi}{\omega \eta} \sum_{n=1}^{\infty} g_n \tilde{J}_n(\beta \sqrt{\varepsilon_r}\, r) P_n^1(\cos\theta) \quad (29)$$

$$A_r^d = E_0 \frac{\cos\phi}{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} f_n \tilde{J}_n(\beta \sqrt{\varepsilon_r}\, r) P_n^1(\cos\theta) \quad (30)$$

Toplam alan ise,

$$E^T = E^g + E^s \quad (31)$$

den hareketle bulunabilir. b_n ve c_n katsayılarını bulmak için toplam alanın sınır yüzeyi (burada küre yüzeyi) üzerinde sürekli olması gerektiğinden hareketle:

$$E_\theta^d = E_\theta^g + E_\theta^s \Big|_{r=a,\,0\le\theta\le\pi,\,0\le\phi\le 2\pi} \quad (32)$$

$$E_\phi^d = E_\phi^g + E_\phi^s \Big|_{r=a,\,0\le\theta\le\pi,\,0\le\phi\le 2\pi} \quad (33)$$

yazılabilir. İfadeler yerine konulup düzenlenirse,

$$d_n = \frac{j^{-n}(2.n+1)}{n.(n+1)} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_r}\, \tilde{J}_n'(\beta_o a)\, \tilde{J}_n(\beta_o \sqrt{\varepsilon_r} a) - \tilde{J}_n'(\beta_o \sqrt{\varepsilon_r} a)\, \tilde{J}_n(\beta_o a)}{\sqrt{\varepsilon_r}\, \tilde{J}_n'(\beta_o a)\, \tilde{J}_n(\beta_o \sqrt{\varepsilon_r} a) + \tilde{J}_n'(\beta_o \sqrt{\varepsilon_r} a)\, \tilde{J}_n(\beta_o a)} \quad (34)$$

$$e_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{35}$$

$$f_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{36}$$

$$g_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{37}$$

elde edilir. Buradan hareketle $A_r^s, F_r^s, A_r^d, F_r^d$, (5) - (10) bağıntılarında yerine konularak alan bileşenleri hesaplanmıştır.

4.3.Küresel Bessel ve Hankel Fonksiyonlarının Seçimi

Radar hedef kesitinin hesaplanmasında, istenen uzaklığa bağlı olarak Bessel ve Hankel fonksiyonlarının seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Genel olarak cisim ile gözlem noktası arasındaki bölge *(i) yakın alan bölgesi*, (ii) ara bölge, (iii) uzak alan bölgesi olarak gruplandırılabilir. Herbir bölge için Bessel ve Hankel fonksiyonları burada yapılan incelemede aşağıdaki şekilde seçilmiştir;

(i)Yakın alan bölgesi:

$$j_n(\beta\cdot r) = \frac{(\beta\cdot r)^n}{1\cdot3\cdot5\ldots(2n+1)} \cdot \left\{1 - \frac{(\beta\cdot r)^2}{2\,1!(2n+3)} + \frac{(\beta\cdot r)^4}{2^2\,2!(2n+3)(2n+5)} - \ldots\right\} \tag{38}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = -\frac{1\cdot3\cdot5\ldots(2\cdot n-1)}{(\beta\cdot r)^n} \cdot \left\{1 - \frac{(\beta\cdot r)^2}{2\,1!(1-2n)} + \frac{(\beta\cdot r)^4}{2^2\,2!(1-2n)(3-2n)} - \ldots\right\} \tag{39}$$

$n = 0, 1, 2, 3, \ldots$

(ii) Ara bölge;

$$j_0(\beta r) = \frac{\sin(\beta r)}{\beta r} \tag{40}$$

$$j_1(\beta\cdot r) = \frac{\sin(\beta\cdot r)}{(\beta\cdot r)^2} - \frac{\cos(\beta\cdot r)}{\beta\cdot r} \tag{41}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = (-1)^{n+1} \cdot j_{-(n+1)}(\beta\cdot r) \tag{42}$$

$$q_n(\beta\cdot r) = \frac{1}{\beta\cdot r}(2n-1)\, q_{n-1}(\beta\cdot r) - q_{n-2}(\beta\cdot r) \tag{43}$$

(iii) Uzak alan bölgesi:

$$j_n(\beta\cdot r) = \frac{1}{\beta\cdot r}\left[P(n,r)\cdot\sin(\beta\cdot r - n\frac{\pi}{2}) + Q(n,r)\cdot\cos(\beta\cdot r - n\frac{\pi}{2})\right] \tag{44}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = \frac{(-1)^{n+1}}{\beta r}\cdot\left[P(n,r)\cdot\cos(\beta\cdot r + n\frac{\pi}{2}) - Q(n,r)\cdot\sin(\beta\cdot r + n\frac{\pi}{2})\right] \tag{45}$$

$$P(n,r) = \sum_{k=0}^{L(n)} (-1)^k \frac{(n+2\cdot k)!(2\cdot\beta\cdot r)^{-2\cdot k}}{(2\cdot k)!(n-2\cdot k)!} \tag{46}$$

$$Q(n,r) = \sum_{k=0}^{M(n)} (-1)^k \frac{(n+2\cdot k+1)!(2\cdot\beta\cdot r)^{-2\cdot k-1}}{(2\cdot k+1)!(n-2\cdot k-1)!} \tag{47}$$

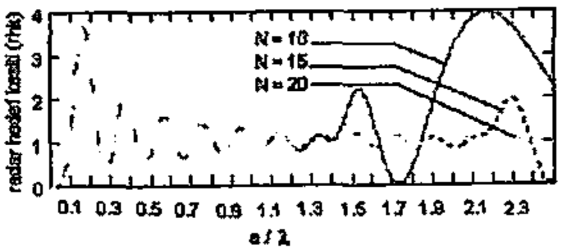
Radar hedef kesiti hesaplamalarında uzak alan bölgesi gözönüne alındığından, burada ele alınan problemde (iii) ile verilen Bessel ve Hankel fonksiyonları alan hesaplamalarında kullanılmıştır.

5.SONUÇLAR

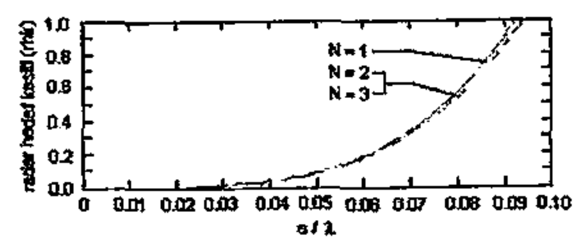
Mükemmel iletken küre için (1) ifadesi kullanılarak monostatik radar hedef kesiti.

$$\sigma_{3D} = \frac{\lambda^2}{4\pi}\left|\sum_{n=1}^{N} \frac{(-1)^n(2n+1)}{\left[\frac{d}{d(\beta r)}(\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r))\right]_{r=a} \cdot \left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}}\right|^2$$

olarak elde edilmiştir. Monostatik radar hedef kesitinin, (a/λ) ve N'e duyarlığı ise aşağıda πa^2'ye göre normalize edilmiş olarak verilmiştir.



Şekil-3.Monostatik radar hedef kesiti
(N= 10, 15, 20) (a = 0.003 m, f = 1 GHz –250 GHz)



Şekil-4.Monostatik radar hedef kesiti
(a / λ → 0 için duyarlık), a=0.003 m

Küreye ait bistatik radar hedef kesitinin N, θ ve ϕ 'ye duyarlığı da aşağıda πa^2'ye göre normalize edilmiş olarak verilen şekillerde incelenmiştir.

$$e_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \cdot \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{35}$$

$$f_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \cdot \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{36}$$

$$g_n = -\frac{j^{-n}(2n+1)}{n(n+1)} \cdot \frac{\left[\tilde{J}_n(\beta r)\right]_{r=a}}{\left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}} \tag{37}$$

elde edilir. Buradan hareketle $A_r^s, F_r^s, A_r^d, F_r^d$, (5) - (10) bağıntılarında yerine konularak alan bileşenleri hesaplanmıştır.

4.3.Küresel Bessel ve Hankel Fonksiyonlarının Seçimi

Radar hedef kesitinin hesaplanmasında, istenen uzaklığa bağlı olarak Bessel ve Hankel fonksiyonlarının seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Genel olarak cisim ile gözlem noktası arasındaki bölge (i) yakın alan bölgesi, (ii) ara bölge, (iii) uzak alan bölgesi olarak gruplandırılabilir. Herbir bölge için Bessel ve Hankel fonksiyonları burada yapılan incelemede aşağıdaki şekilde seçilmiştir;

(i)Yakın alan bölgesi;

$$j_n(\beta\cdot r) = \frac{(\beta\cdot r)^n}{1\cdot 3\cdot 5....(2n+1)} \cdot \left\{1 - \frac{(\beta\cdot r)^2}{2\,1!(2n+3)} + \frac{(\beta\cdot r)^4}{2^2\,2!(2n+3)(2n+5)} - ...\right\} \tag{38}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = -\frac{1\cdot 3\cdot 5...(2\cdot n-1)}{(\beta\cdot r)^n} \cdot \left\{1 - \frac{(\beta\cdot r)^2}{2\,1!(1-2n)} + \frac{(\beta\cdot r)^4}{2^2\,2!(1-2n)(3-2n)} - ...\right\} \tag{39}$$

$$n = 0, 1, 2, 3, ...$$

(ii) Ara bölge;

$$j_0(\beta.r) = \frac{\sin(\beta.r)}{\beta.r} \tag{40}$$

$$j_1(\beta\cdot r) = \frac{\sin(\beta\cdot r)}{(\beta\cdot r)^2} - \frac{\cos(\beta\cdot r)}{\beta\cdot r} \tag{41}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = (-1)^{n+1}.j_{-(n+1)}(\beta\cdot r) \tag{42}$$

$$q_n(\beta\cdot r) = \frac{1}{\beta\cdot r}(2n-1)\,q_{n-1}(\beta\cdot r) - q_{n-2}(\beta\cdot r) \tag{43}$$

(iii) Uzak alan bölgesi;

$$j_n(\beta\cdot r) = \frac{1}{\beta\cdot r}\left[P(n,r)\cdot\sin(\beta\cdot r - n\frac{\pi}{2}) + Q(n,r)\cdot\cos(\beta\cdot r - n\frac{\pi}{2})\right] \tag{44}$$

$$y_n(\beta\cdot r) = \frac{(-1)^{n+1}}{\beta.r}\cdot\left[P(n,r)\cdot\cos(\beta\cdot r + n\frac{\pi}{2}) - Q(n,r)\cdot\sin(\beta\cdot r + n\frac{\pi}{2})\right] \tag{45}$$

$$P(n,r) = \sum_{k=0}^{L(n)} (-1)^k \frac{(n+2\cdot k)!(2\cdot\beta\cdot r)^{-2\cdot k}}{(2\cdot k)!(n-2\cdot k)!} \tag{46}$$

$$Q(n,r) = \sum_{k=0}^{M(n)} (-1)^k \frac{(n+2\cdot k+1)!(2\cdot\beta\cdot r)^{-2\cdot k-1}}{(2\cdot k+1)!(n-2\cdot k-1)!} \tag{47}$$

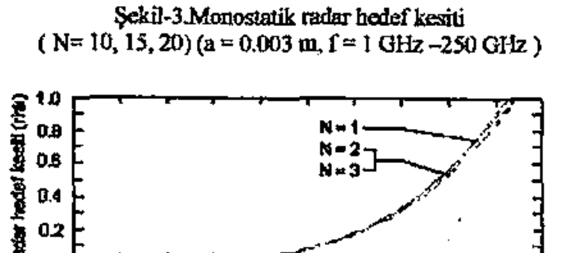
Radar hedef kesiti hesaplamalarında uzak alan bölgesi gözönüne alındığından, burada ele alınan problemde (iii) ile verilen Bessel ve Hankel fonksiyonları alan hesaplamalarında kullanılmıştır.

5.SONUÇLAR

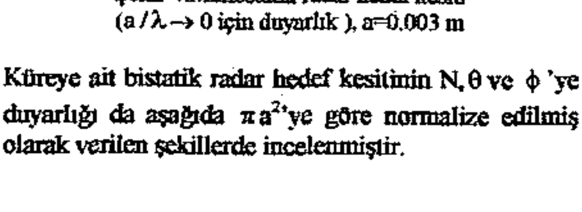
Mükemmel iletken küre için (1) ifadesi kullanılarak monostatik radar hedef kesiti,

$$\sigma_{3D} = \frac{\lambda^2}{4\pi}\left|\sum_{n=1}^{N} \frac{(-1)^n(2n+1)}{\left[\frac{d}{d(\beta r)}(\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r))\right]_{r=a} \cdot \left[\tilde{H}_n^{(2)}(\beta r)\right]_{r=a}}\right|^2$$

olarak elde edilmiştir. Monostatik radar hedef kesitinin (a/λ) ve N'e duyarlılığı ise aşağıda πa^2'ye göre normalize edilmiş olarak verilmiştir.



Şekil-3.Monostatik radar hedef kesiti
(N= 10, 15, 20) (a = 0.003 m, f = 1 GHz –250 GHz)



Şekil-4.Monostatik radar hedef kesiti
$(a/\lambda \to 0$ için duyarlık), a=0.003 m

Küreye ait bistatik radar hedef kesitinin N, θ ve φ 'ye duyarlığı da aşağıda πa^2'ye göre normalize edilmiş olarak verilen şekillerde incelenmiştir.