

محاسبه RCS اجسام پیچیده با استفاده از روش PO/PTDMEC

مهران تسلیمی^۱، عطا... ابراهیمزاده^۲، داوود اکبرزاده^۳

m.taslimi@stu.nit.ac.ir

- ۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
 ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
 ۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

در این مقاله، از ترکیب روش‌های تئوری نور فیزیکی (PO)، تئوری پراکنش (تفرق) فیزیکی (PTD) و جریان‌های معادل (MEC) برای محاسبه RCS اجسام پیچیده استفاده شده است. مدل کردن جسم پیچیده با مش‌بندی در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است، بدین ترتیب که عمل مش‌بندی یک‌بار برای سطح و یک‌بار برای لبه‌های جسم انجام می‌شود. سپس با انتقال اطلاعات مش‌بندی به نرم‌افزار MATLAB، تئوری نور فیزیکی را بر سطح و روش جریان‌های معادل با ضرایب PTD، بر لبه‌ها اعمال می‌گردد و با مجموع میدان‌های الکتریکی دیده شده از مش‌های موجود در سطح و لبه‌ها، سطح مقطع راداری کل جسم با در نظر گرفتن اثر لبه‌ها به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده بوسیله ما، با نتایج نرم‌افزار CST-MS مطابقت بسیار مناسبی دارد و قادر است مشخصات RCS را با پیچیدگی کمتر و در مدت زمان کمتری تعیین کند.

واژگان کلیدی: سطح مقطع راداری (RCS)، تئوری نور فیزیکی، تئوری پراکنش (تفرق) فیزیکی، روش جریان‌های معادل، اجسام پیچیده، مش‌بندی در آباکوس

تاریخ دریافت مقاله : ۹۵/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۰۳/۲۵

۱- مقدمه

محاسبه سطح مقطع راداری (RCS)^۱، به منظور انجام مطالعات بر روی پنهان سازی و یا شناسایی اهداف نظامی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [۱]. از آنجایی که اندازه‌گیری دقیق RCS مستلزم هزینه بالا از نظر زمان، نیروی انسانی و تجهیزات می‌باشد، لذا طراحی یک نرم‌افزار برای انجام این کار ضروری به نظر می‌رسد.

برای طراحی چنین نرم‌افزاری می‌توان از روش‌های مختلف عددی استفاده نمود [۲]. دسته‌ای از این روش‌ها همانند FDTD^۲ [۳]، MoM^۳ [۴] و... روش‌های دقیق در محاسبه سطح مقطع راداری بوده اما حجم محاسبات بالایی داشته و به حافظه بالایی برای شبیه‌سازی نیاز دارند. در مقابل دسته‌ی دیگری از روش‌ها همانند PO^۴، PTD^۵، GO^۶ و GTD^۷ و... روش‌های تقریبی در محاسبه سطح مقطع راداری بوده [۵] که در فرکانس‌های بالا، جایی که ابعاد جسم نسبت به طول موج خیلی بزرگ‌تر بوده، مناسب می‌باشند. این روش‌ها جواب قابل قبولی را در مدت زمان کم‌تری ارائه می‌دهند. روش‌های تقریبی را می‌توان به دو دسته روش‌های مبتنی بر نور هندسی مانند GO و GTD و روش‌های مبتنی بر نور فیزیکی مانند PO و PTD تقسیم نمود [۶].

در مرجع [۷] از روش‌های عددی PO و PTD برای محاسبه RCS اهداف پیچیده استفاده شده است که از محیط گرافیکی GUI نرم‌افزار متلب بهره می‌برد که البته نتایج روش خود را با نرم‌افزارهای تجاری مقایسه ننموده است. در مرجع [۸] صرفاً برپایه تعاریف اولیه از کاربرد روش‌های عددی، یک بسته نرم‌افزاری برای تمام باندهای فرکانسی از فرکانس پایین تا فرکانس بالا معرفی شده است که بسته به باند فرکانسی از یکی از روش‌های عددی مثلاً از روش MoM برای فرکانس‌های پایین استفاده می‌نماید. در مرجع [۹] نیز از روش‌های عددی تقریبی مانند PO و SBR برای محاسبه RCS اجسام هادی کامل استفاده شده است.

در این مقاله ضمن تعریف اولیه از مفهوم RCS در بخش دوم، در بخش سوم روش‌های تقریبی فرکانس بالا در محاسبه RCS به طور مختصر معرفی شده و در بخش چهارم به عنوان یک کاربرد جدید، روش‌های نور فیزیکی،

PTD و جریان‌های معادل به صورت کاربردی و برای ساختارهای پیچیده توضیح داده شده و الگوریتم‌های مناسب برای اعمال این روش‌ها بر سطوح پیچیده ارائه شده‌اند.

۲- مفهوم سطح مقطع راداری

زمانی که جسم در معرض تابش امواج رادیویی قرار می‌گیرد [۵]، با توجه به جنس جسم و شکل آن، امواج رادیویی را در جهت‌های مختلف پراکنده می‌سازد. نسبت توان پراکنده شده از سطح جسم در یک راستای مشخص به توان تابشی به سمت جسم را سطح مقطع راداری در آن راستا می‌گویند، که از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (1)$$

از معادله (۱) مشخص است که توان پراکنده شده نسبت به توان تابشی و همچنین نسبت به فاصله از جسم نرمالیزه می‌شود، بنابراین RCS به توان فرستنده و همچنین فاصله آنتن تا جسم بستگی ندارد، بلکه به عواملی همانند: مکان نسبی هدف با توجه به فرستنده و گیرنده، شکل هندسی هدف، جنس مواد سازنده آن، راستای نسبی زاویه‌ای هدف با توجه به مکان فرستنده و گیرنده، فرکانس کاری و قطبش فرستنده و گیرنده بستگی دارد.

۳- روش‌های تقریبی فرکانس بالا در محاسبه سطح مقطع راداری

در این قسمت مروری بر چند روش تقریبی که در فرکانس‌های بالا RCS را با دقت و سرعت خوبی محاسبه می‌کنند، خواهیم داشت و مزایا و معایب هر یک را یادآور می‌شویم. ما در این پژوهش از ترکیب روش‌های PO، PTD و جریان‌های معادل برای محاسبه RCS استفاده نموده‌ایم.

۳-۱- تئوری نور هندسی (GO)

شاید تئوری نور هندسی ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش برای محاسبه میدان‌های پراکنده باشد [۱۰، ۱۱]. وقتی موج به یک سطح صاف برخورد می‌کند، بخشی از آن منتقل

^۵ Physical Theory of Diffraction

^۶ Geometrical Optics

^۷ Geometrical Theory of Diffraction

^۱ Radar Cross Section

^۲ Finite-Difference Time-Domain

^۳ Method of Moments

^۴ Physical Optics

عمودی و موازی، \vec{a}_\perp راستای قطبش عمودی برای موج تابشی، \vec{a}_\parallel راستای قطبش موازی برای موج تابشی و \vec{S}_\parallel راستای قطبش موازی برای موج بازگشتی از هر مش است که نحوه محاسبه آن‌ها در بخش ۴-۱ توضیح داده می‌شود. در این روش با فاصله گرفتن از زاویه بازتاب نتایج تئوری نور فیزیکی بدتر می‌شوند چراکه این روش تاثیر لبه‌ها را در نظر نمی‌گیرد. برای حل این مشکل می‌توان از روش PTD و یا جریان‌های معادل استفاده نمود [۱۲].

۳-۳- تئوری پراکندگی (تفرق) هندسی (GTD)

این روش نوع بهبود یافته GO می‌باشد [۱۸ و ۱۰] که تاثیر لبه‌ها را در محاسبه RCS در نظر می‌گیرد. Keller اثبات کرد، پرتو برخورد کننده به لبه در امتداد مخروط Keller به صورت شکل (۱) پراکنده می‌شود و تنها در یک راستا بازتاب نمی‌کند. وی با معرفی ضرایب پراکندگی برای قطبش‌های مختلف، میدان‌های پراکنده از لبه را محاسبه نمود. میدان‌های پراکنده شده از لبه با استفاده از تئوری GTD را می‌توان با معادله زیر یافت [۱۸ و ۱۰]:

$$E^d(s) = E^i(Q_d) \cdot \vec{D} \cdot A(s', s) e^{-i\beta s} \quad (6)$$

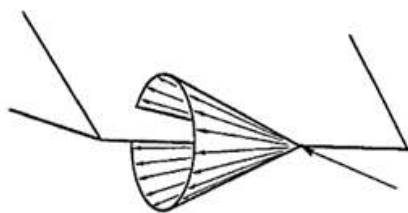
که در آن E^d میدان‌های پراکنده (تفرق) از لبه، Q_d نقطه تفرق، D ضریب تفرق، A فاکتور گسترش، $e^{-i\beta s}$ فاکتور فاز می‌باشد. ضریب D برای قطبش‌های سخت و نرم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_s = \frac{e^{-\frac{i\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi\beta \sin(\beta_i)}} (X - Y) \quad (7)$$

$$D_h = \frac{e^{-\frac{i\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi\beta \sin(\beta_i)}} (X + Y) \quad (8)$$

که ضرایب X و Y به صورت زیر می‌باشند:

$$X = \frac{\frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\delta_s - \delta_i}{n}\right)} \quad (9)$$



شکل (۱) پرتوهای پراکنده از مخروط Keller [۵].

و بخشی از آن منعکس می‌شود. این روش با استفاده از ضرایب فرنل و قانون اسنل به ترتیب دامنه موج بازگشتی و زاویه بازتاب و با استفاده از قانون بقای انرژی، میزان تضعیف انرژی در هنگام دور شدن از نقطه بازتاب را تعیین می‌کند. از آنجایی که در لبه‌های جسم پدیده تفرق امواج رخ می‌دهد، در هنگام استفاده از این روش نیاز است نقطه بازتاب، از لبه‌ها دور باشد. همچنین این تئوری برای سطوحی که شعاع انحنای آن بینهایت است مثل مثل سطوح صاف به درستی جواب نمی‌دهد.

۳-۲- تئوری نور فیزیکی (PO)

تئوری نور فیزیکی را می‌توان یک روش، بینابین تئوری نور هندسی و روش‌های تمام موج (دقیق) در نظر گرفت که یکی از کاربردهای گسترده آن در محاسبه RCS اجسام بزرگ الکتریکی می‌باشد و بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری همانند CST و HFSS نیز از این روش برای محاسبه RCS استفاده می‌نمایند [۱۲].

در این روش با محاسبه جریان‌های الکتریکی بر سطحی از جسم که در معرض تابش امواج قرار دارد (ناحیه روشن) و با انتگرال گیری از آن‌ها بر این سطح، می‌توان میدان‌های راه دور، و در نتیجه RCS جسم را به دست آورد. برای اجسام هادی کامل، جریان‌های الکتریکی ناشی از برخورد موج الکترومغناطیس بر روی یک جسم هادی کامل به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۳]:

$$\vec{J} = \begin{cases} \vec{n} \times \vec{H}_s^{\text{tot}} & \text{سطح روشن} \\ 0 & \text{سطح تاریک} \end{cases} \quad (2)$$

که \vec{n} بردار عمود و برون سو بر سطح جسم و \vec{H}_s^{tot} میدان مغناطیسی مجموع (تابشی و بازتاب) بر سطح جسم می‌باشد و به صورت زیر به دست می‌آید [۱۴، ۱۲-۱۷]:

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times \vec{H}_s^{\text{tot}} \quad (3)$$

$$\vec{E}_s^{\text{tot}} = \vec{E}_s^{\text{inc}} + R_\perp \cdot \vec{E}_{s,\perp}^{\text{inc}} \vec{a}_\perp + R_\parallel \vec{E}_{s,\parallel}^{\text{inc}} \vec{S}_\parallel \quad (4)$$

$$\vec{H}_s^{\text{tot}} = \frac{1}{\eta} (\vec{k}_1 \times \vec{E}_s^{\text{inc}} + R_\perp \cdot \vec{E}_{s,\perp}^{\text{inc}} \vec{S}_\parallel - R_\parallel \vec{E}_{s,\parallel}^{\text{inc}} \vec{a}_\perp) \quad (5)$$

که در آن \vec{E}_s^{tot} مجموع میدان‌های الکتریکی تابشی و بازتابی بر سطح جسم، R_\perp و R_\parallel ضرایب بازتاب برای قطبش‌های

بوسیله Keller توسعه یافت. هدف او بهبود تئوری نور فیزیکی با در نظر گرفتن این واقعیت که تئوری نور فیزیکی برای راستاهای غیر از راستای بازتاب به درستی جواب نمی‌دهد، بوده است [۱۱ و ۱۵]. روش او با معرفی ضرایب جدید، نقاط تکین ضرایب Keller در نواحی مرزی بازتاب و تاریکی حذف می‌شوند. نتایج کار Ufimtsev به صورت زیر بیان می‌شود:

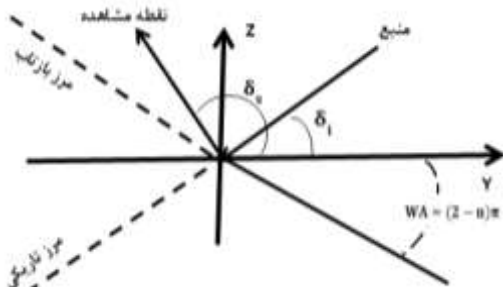
$$E_z^s = \frac{E_{0z} f e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2k\pi r}} \quad (11)$$

$$H_z^s = \frac{H_{0z} g e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2k\pi r}} \quad (12)$$

که در آن ضرایب تفرق به صورت زیرند:

$$f = \begin{cases} (X - Y) - (X_1 - Y_1) & 0 \leq \delta_i \leq \alpha - \pi \\ (X - Y) - (X_1 - Y_1) - (X_2 - Y_2) & \alpha - \pi \leq \delta_i \leq \pi \\ (X - Y) - (X_2 - Y_2) & \pi \leq \delta_i \leq \alpha \end{cases} \quad (13)$$

$$g = \begin{cases} (X + Y) - (X_1 + Y_1) & 0 \leq \delta_i \leq \alpha - \pi \\ (X + Y) - (X_1 + Y_1) - (X_2 + Y_2) & \alpha - \pi \leq \delta_i \leq \pi \\ (X + Y) - (X_2 + Y_2) & \pi \leq \delta_i \leq \alpha \end{cases} \quad (14)$$



شکل (۲) زاویه تابش و بازتاب برای تعریف ضرایب Keller [۱۳]

کاملاً مشخص است نقاط تکین از ضرایب Keller حذف می‌شوند. در این روش نیز همانند GTD میدان فقط در راستای مخروط Keller به درستی تعیین می‌شود.

۳-۵- جریان‌های معادل (MEC)

چنانچه در محاسبه RCS مونواستاتیک (حالتی که فرستنده و گیرنده در یک نقطه هستند)، راستای نقطه مشاهده بر راستای لبه جسم عمود باشد، به آن حالت caustics گفته

$$Y = \frac{\frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\delta_s + \delta_i}{n}\right)} \quad (10)$$

باید گفت که روش GTD پراکنش از لبه‌هایی را در نظر می‌گیرد که راستای مخروط Keller برای آن‌ها، در جهت نقطه مشاهده قرار می‌گیرد. همچنین این روش دارای معایب زیر نیز می‌باشد:

- ۱- از معادلات (۹) و (۱۰) مشخص است که ضرایب X به ترتیب در مرز تاریکی و بازتاب، تکین می‌شوند.
- ۲- میدان ناشی از cuspics (حالتی که در آن راستای انتشار موج عمود بر لبه‌ای از جسم، که موج به آن برخورد می‌کند) را بی‌نهایت محاسبه می‌کند.

۳-۴- تئوری پراکنش (تفرق) فیزیکی (PTD)

این روش بوسیله Ufimtsev [۱۹] همزمان با توسعه GTD

که در آن زاویه داخلی گوه در شکل (۲) و برابر است با $\alpha = (2 - n)\pi$ و داریم:

$$\begin{aligned} X_1 &= -\frac{1}{2} \tan\left(\frac{\delta_s - \delta_i}{2}\right) \\ Y_1 &= -\frac{1}{2} \tan\left(\frac{\delta_s + \delta_i}{2}\right) \\ X_2 &= \frac{1}{2} \tan\left(\frac{\delta_s - \delta_i}{2}\right) \\ Y_2 &= -\frac{1}{2} \tan\left(\alpha - \frac{\delta_s + \delta_i}{2}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

که X و Y همان ضرایب Keller هستند و محور Z محوری است که لبه جسم بر آن قرار گرفته است. عبارات فوق را در نواحی مرزی می‌توان به صورت زیر ساده نمود:

$$\begin{aligned} X - X_1 \text{ یا } X - X_2 &\rightarrow -\frac{1}{2n} \cot\left(\frac{\pi}{n}\right) \\ Y - Y_1 \text{ یا } Y - Y_2 &\rightarrow -\frac{1}{2n} \cot\left(\frac{\pi}{n}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

¹ Method of Equivalent Currents

با توجه به معادله (۲۰) کاملاً واضح است که این جریان‌ها مجازی می‌باشند چراکه در کنار راستای تابش، به راستای نقطه مشاهده نیز بستگی دارند.

۴- مراحل طراحی نرم‌افزار محاسبه‌گر سطح مقطع راداری

برای محاسبه سطح مقطع راداری یک ساختار پیچیده همانند هواپیما یا موشک در ابتدا جسم را به مش‌های بسیار کوچک مثلی - با ابعاد کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج - تقسیم کرده، سپس میدان الکتریکی دیده شده از هر مش در فاصله دور را محاسبه و در نهایت مقادیر به دست آمده را با هم جمع نموده و سطح مقطع راداری کل ساختار را با استفاده از تئوری نور فیزیکی به دست می‌آوریم [۲۰ و ۲۱]. همچنین برای در نظر گرفتن تاثیر لبه‌ها، میدان‌های ناشی از لبه‌ها در فاصله دور، با استفاده از روش PTD و جریان‌های معادل (MEC) محاسبه و با مقدار حاصل از PO جمع می‌نماییم تا تاثیر لبه‌ها در محاسبه RCS نیز در نظر گرفته شود. این مراحل به صورت زیر انجام می‌گیرند:

۴-۱- محاسبه RCS سطح جسم با استفاده از تئوری نور فیزیکی (PO)

مرحله اول: در مرحله اول بعد از آن که جسم را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به مش‌های مثلی - با ابعاد کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج - تقسیم نمودیم، ساختار شکل هندسی را در نرم‌افزار MATLAB، بازسازی می‌کنیم و با استفاده از معادلات (۲۱) تا (۲۴) بردار عمود بر هر مش برای یک جسم محدب را می‌یابیم [۲۰]:

$$\vec{z}_1 = \frac{\vec{OA}}{|\vec{OA}|} \quad (21)$$

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{OB}}{|\vec{OB}|} \quad (22)$$

$$\vec{y}_1 = \vec{e}_1 \times \vec{z}_1 \quad (23)$$

$$\vec{x}_1 = \vec{y}_1 \times \vec{z}_1 \quad (24)$$

می‌شود [۱۲ و ۱۵]. در این حالت با توجه به راستای مخروط Keller، مقدار میدان به درستی تعیین نمی‌شود و مقدار آن بی‌نهایت محاسبه می‌گردد. با استفاده از تعریف جریان‌های معادل می‌توان این مشکل را حل نمود. در این روش با قرار دادن، یک سری جریان‌های فرضی برای لبه‌ها مطابق شکل (۳)، علاوه بر حل مشکل caustics، میدان‌های الکتریکی را در راستایی غیر از مخروط Keller نیز محاسبه می‌کنند. در این قسمت نمونه‌ای از جریان‌های معادل الکتریکی و مغناطیسی که بوسیله Rayan و Peter معرفی شده و سپس بوسیله Knott و Senior بهبود پیدا کرده است، برای محاسبه RCS استفاده شده است. این جریان‌ها مطابق معادلات (۱۷-۱۹) می‌باشند و بر روی لبه‌های جسم قرار می‌گیرند که با انتگرال گیری از آن‌ها تاثیر لبه‌ها در محاسبه RCS در نظر گرفته می‌شود.

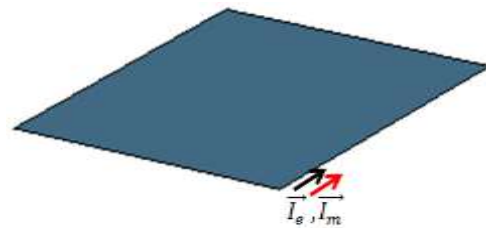
$$I_e = \frac{if(\vec{t}, \vec{E}_t)}{kZ_0 \sin^2(\beta)} \vec{t} \quad (17)$$

$$I_m = \frac{i2g(\vec{t}, \vec{H}_t)}{kY_0 \sin^2(\beta)} \vec{t} \quad (18)$$

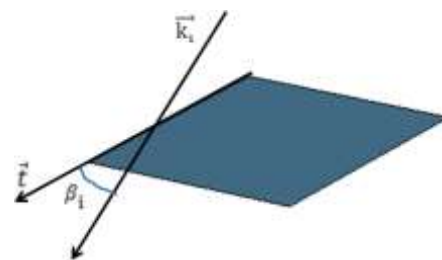
$$\sin^2(\beta) = \sin(\beta_i) \sin(\beta_s) \quad (19)$$

که در آن β_s و β_i به ترتیب راستای پرتو تابش و راستای پرتو تفرق (نقطه مشاهده) با لبه می‌باشند. برای محاسبه RCS مونواستاتیک داریم:

$$\beta_i = \beta_s = \text{acos}(\vec{k}_i \cdot \vec{t}) \quad (20)$$



شکل (۳) جریان‌های معادل الکتریکی و مغناطیسی برای لبه‌ها.



شکل (۴) زاویه میان راستای موج تابش و لبه.

پلاریزه‌هایی و به چه نسبتی از هم می‌بینند، لذا برای هر مش، موج تابشی به آن را به قطبش‌های عمودی و موازی تجزیه می‌نماییم [۱۵ و ۱۶]:

$$\vec{E}_s^{inc} = E_{s,\perp}^{inc} \vec{a}_\perp + E_{s,\parallel}^{inc} \vec{a}_\parallel \quad (29)$$

$$E_{s,\perp}^{inc} = \overline{E_s^{inc}} \vec{a}_\perp \quad (30)$$

$$E_{s,\parallel}^{inc} = \overline{E_s^{inc}} \cdot \vec{a}_\parallel \quad (31)$$

همان‌طور که گفته شد، در آن راستای قطبش عمودی برای موج تابشی، \vec{a}_\parallel راستای قطبش موازی برای موج تابشی به ازای هر مش است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\vec{a}_\perp = \vec{k}_1 \times \vec{n} \quad (32)$$

$$\vec{a}_\parallel = \vec{k}_1 \times \vec{a}_\perp \quad (33)$$

$$\vec{s}_\parallel = \vec{k}_r \times \vec{a}_\perp \quad (34)$$

$$\vec{k}_r = \vec{k}_1 - 2(\vec{k}_1 \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (35)$$

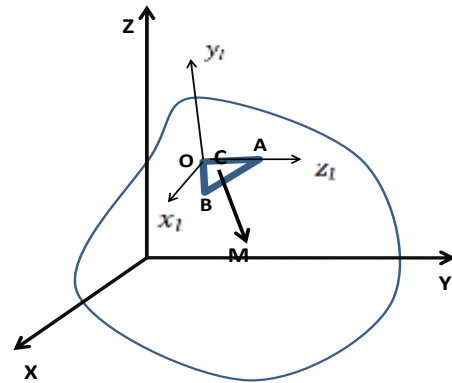
که در آن \vec{k}_r راستای موج بازگشتی می‌باشد. مرحله چهارم: در مرحله آخر میدان الکتریکی دیده شده از هر مش با استفاده از تئوری نور فیزیکی محاسبه و با مجموع این مقادیر و با استفاده از فرمول (۱)، سطح مقطع راداری کل جسم، به ازای هر زاویه محاسبه می‌گردد.

۴-۲- تئوری پراکنش (تفرق) فیزیکی برای اجسام

پیچیده

در این بخش ترکیبی از روش‌های PTD و جریان‌های معادل ارائه شده توسط Peter و Rayan مطابق معادلات (۱۷) تا (۱۹) برای ساختارهای پیچیده اعمال شده است. این روش تاثیر لبه‌ها را در نظر می‌گیرد که اگر با روش PO جمع گردد میزان دقت در محاسبه RCS افزایش می‌یابد. الگوریتم این کار به صورت زیر می‌باشد:

مرحله اول: در ابتدا لبه‌های جسم را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مش‌بندی می‌نماییم و همانند روش PO، روش PTD/MEC را بر روی هر مش لبه‌ای اجرا، و با مجموع میدان‌های دیده شده از هر مش لبه‌ای، تاثیر لبه‌ها در محاسبه در نظر گرفته می‌شود. برای تجسم لبه‌های یک جسم و مش‌بندی آن، سطح داخلی جسم را توخالی کرده و



شکل (۵) نحوه مش‌بندی و یافتن بردار عمود بر هر مش.

که در آن \vec{a}_\perp بردار عمود بر هر مش می‌باشد. معادلات فوق به تنهایی نمی‌توانند بردار عمود و برون‌سو بر هر مش را نشان دهند چراکه (۲۳) ممکن است بردار عمود و درون‌سو بر هر مش را نیز بدهد. بنابراین در صورت لزوم، یک تصحیح برای جهت بردار عمود بر هر مش ضروری می‌باشد. برای این کار ابتدا مرکز هر مش را به عنوان نماینده آن مش در نظر گرفته (چراکه اندازه مش‌ها بسیار کوچک است) و نقطه M را به عنوان مرکز کل حجم جسم در نظر می‌گیریم:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N} \quad (25)$$

که C_i مرکز هر مش و N تعداد مش‌هاست، به عبارت دیگر M مرکز کلی حجم جسم است. با استفاده از شروط زیر در صورت لزوم جهت بردار \vec{a}_\perp را تصحیح می‌نماییم:

$$\text{if } \vec{C}_1 M \cdot \vec{y}_1 < 0 \rightarrow \vec{n} = \vec{y}_1 \quad (26)$$

$$\text{if } \vec{C}_1 M \cdot \vec{y}_1 > 0 \rightarrow \vec{n} = -\vec{y}_1 \quad (27)$$

که در آن بردار عمود و برون‌سو بر هر مش مثلثی می‌باشد. مرحله دوم: با توجه به معادله (۲) باید ناحیه روشن تعیین گردد، یعنی مشخص شود موج الکترومغناطیس به کدام یک از مش‌های جسم برخورد می‌نماید. چنانچه شرط زیر برقرار باشد موج به مش مورد نظر از جسم برخورد می‌کند [۲۱-۲۲]:

$$\vec{k}_1 \cdot \vec{n} < 0 \quad (28)$$

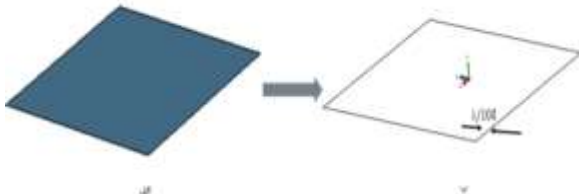
که در آن \vec{k}_1 راستای انتشار موج است. مرحله سوم: از معادلات (۳) تا (۵) مشخص است که نوع قطبش در محاسبه سطح مقطع راداری موثر است، بنابراین ضروری است که بدانیم یک مش، موج تابشی را با چه

$$\delta = \text{acos}(-\vec{d} \cdot \vec{u}) \quad (37)$$

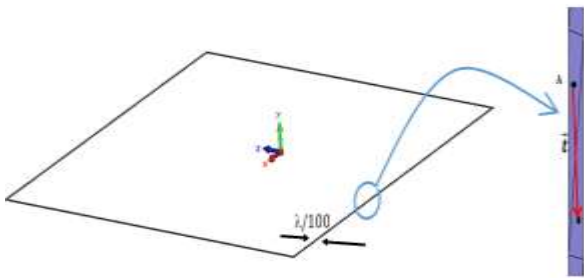
برای یافتن بردار عمود بر هر مش و به سمت داخل صفحه یعنی \vec{u} از رابطه زیر استفاده می‌نماییم (شکل (۹)):

$$\vec{u} = \vec{n} \times \vec{t} \quad (38)$$

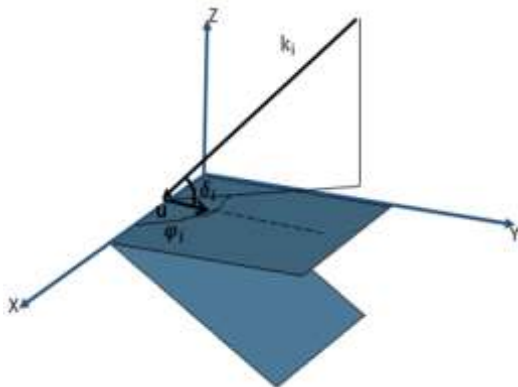
که n بردار عمود بر هر مش لبه‌ای است که نحوه محاسبه آن در بخش ۴-۱ مرحله اول بیان گردید.



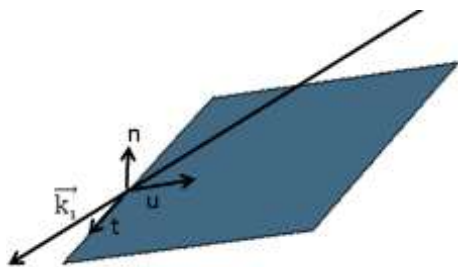
شکل (۶) ایجاد لبه برای یک صفحه مربعی.



شکل (۷) بردار مماس بر لبه در هر مش.



شکل (۸) زاویه‌ی میان راستای انتشار موج و لبه‌های جسم.



شکل (۹) بردارهای مورد استفاده در هر مش لبه‌ای.

تنها به لبه‌های جسم، ضخامت ناچیز در حد $\lambda/100$ اعمال می‌نماییم به گونه‌ای که تنها لبه‌های جسم باقی بماند. دلیل این امر آن است که نرم‌افزار آباکوس بر سطح مش‌بندی را اجرا می‌نماید و با این روش ما یک سطح برای این نرم‌افزار تداعی کرده که از طرف دیگر با تقریب خوبی لبه‌های جسم را نیز محقق می‌سازد. این کار برای یک مربع در شکل (۶) نشان داده شده است.

مرحله دوم: با توجه به معادلات (۱۷) تا (۱۹) برای تعیین جریان‌های معادل برای لبه‌ها، بردار مماس بر مسیر لبه یعنی \vec{t} باید تعیین گردد. این کار، بویژه برای لبه‌های به شکل منحنی می‌تواند کار سختی باشد. روشی که ما برای محاسبه بردار مماسی \vec{t} ارائه کردیم به این صورت است که، تفاضل مراکز دو مش مجاور موجود در لبه به عنوان بردار مماس بر لبه مطابق شکل (۷) تعریف می‌گردد. برای این کار باید مش‌های مجاور در لبه‌ها را یافت. لازم به یادآوری است، نرم‌افزار آباکوس تنها مختصات هر مش را ارائه می‌دهد و اطلاعاتی از مجاورت و در کنار هم بودن این مش‌ها نمی‌دهد. بنابراین لازم است الگوریتمی به صورت زیر برای یافتن مش‌های مجاور ارائه و مش‌های مجاور را یافته و سپس بردار مماس بر لبه را بیابیم:

۱- مجموعه مراکز مش‌های خروجی از نرم‌افزار آباکوس را می‌یابیم (مجموعه M).

۲- اولین مش خروجی از نرم‌افزار آباکوس را در حافظه ذخیره می‌نماییم (مش A).

۳- نزدیک‌ترین مش، به مش A را می‌یابیم (مش B). این مش، مش مجاور A می‌باشد.

۴- بردار یکه تفاضل مراکز دو مش A و B، به عنوان بردار مماسی مش A تعریف می‌شود.

۵- مش A را از مجموعه مش‌های M حذف می‌نماییم و مش B را به عنوان مش A جدید قرار می‌دهیم و سپس به مرحله ۳ بر می‌گردیم.

لازم به یادآوری است برای آخرین مش باقی‌مانده از مجموعه M، بردار مماسی به صورت بردار یکه تفاضل مراکز اولین مش خروجی از نرم‌افزار آباکوس از آخرین مش باقی‌مانده از مجموعه M تعریف می‌شود.

برای محاسبه ضرایب X و Y باید زاویه‌ی δ نشان داده شده در شکل (۸) محاسبه گردد.

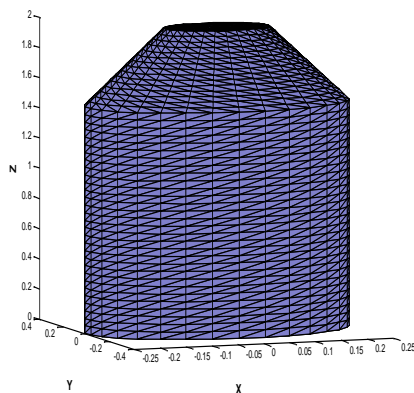
$$\vec{d} = \vec{k}_i - (\vec{k}_i \cdot \vec{t}) \vec{t} \quad (36)$$

نرم افزار CST-MS، یک روش مبتنی بر معادلات انتگرالی بوده و از نوع روش‌های دقیق در محاسبه سطح مقطع راداری است. در شکل (۱۲)، مقادیر RCS، برای قطبش موازی و در شکل (۱۳)، مقادیر RCS، برای قطبش عمودی، به ازای $\varphi = 90^\circ$ و $0^\circ < \theta < 180^\circ$ نشان شده است.

همان‌طور که مشخص است الگوریتم ما با استفاده تئوری نور فیزیکی (PO) به نسبت تئوری نور فیزیکی نرم افزار CST-MS مطابقت بیشتری به روش بسیار دقیق معادلات انتگرالی نرم افزار CST-MS دارد. این امر مخصوصاً برای زوایای نزدیک به صفر درجه بیش‌تر صدق می‌کند. علاوه بر آن برای زوایای ۶۰ تا ۹۰ درجه دقت راهکار ما، نسبت به تئوری نور فیزیکی نرم افزار CST-MS همچنان بهتر می‌گردد. این بهبود عملکرد برای قطبش موازی بهتر از قطبش عمودی می‌باشد. در زاویه ۱۰۰ درجه نیز یک صفر وجود دارد که راهکار ما در در قطبش موازی آن را بهتر از قطبش عمودی برآورد کرده است.



شکل (۱۰) ابعاد جسم در شبیه‌سازی اول.



شکل (۱۱) مش‌بندی شکل (۱۰) در فرکانس ۶۰۰ مگاهرتز.

حال جریان‌های معادل را از معادلات (۱۷) تا (۱۹) می‌یابیم و با انتگرال‌گیری از آن‌ها میدان‌های راه دور و در نتیجه RCS را می‌یابیم [۱۲]:

$$A(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{I_e(r) e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} dl' \quad (39)$$

$$F(r) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_L \frac{I_m(r) e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} dl' \quad (40)$$

$$E_\theta = -j\omega A_\theta - j\omega \eta F_\phi \quad (41)$$

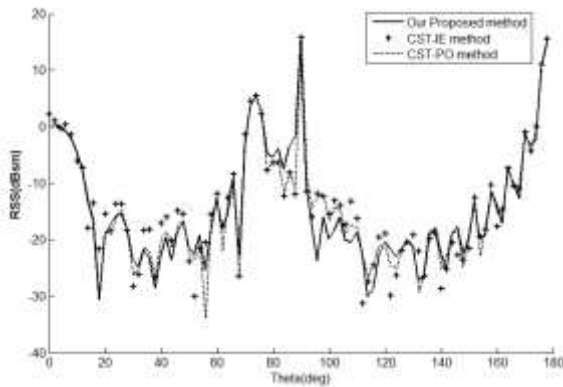
$$E_\phi = -j\omega A_\phi + j\omega \eta F_\theta \quad (42)$$

که در آن L طول مسیر لبه‌ای است که بر آن انتگرال‌گیری می‌شود.

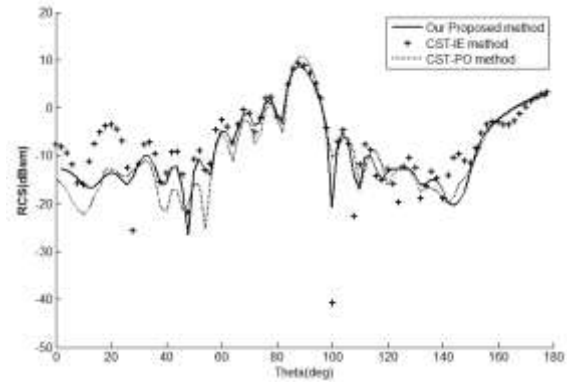
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج تئوری نور فیزیکی برای محاسبه RCS چند جسم و در قطبش‌های متفاوت بررسی شده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها قطبش‌های عمودی و موازی نسبت به صفحه z-y تعریف شده‌اند یعنی در قطبش موازی میدان الکتریکی موازی صفحه z-y (TE_x)، و در قطبش عمودی میدان الکتریکی عمود بر صفحه z-y (TM_x)، می‌باشد. ابعاد هر مش مثلثی نیز یک‌دهم طول موج می‌باشد و مقادیر RCS، به ازای $\varphi = 90^\circ$ و $0^\circ < \theta < 180^\circ$ محاسبه شده است. در شبیه‌سازی اول، صرفاً به بررسی تئوری نور فیزیکی ارائه شده در این مقاله پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی سطح مقطع راداری مونواستاتیک، برای یک شی هادی کامل، شبیه به موشک با ابعاد مشخص شده در شکل (۱۰)، در فرکانس ۶۰۰ مگاهرتز، ارائه شده است. این ساختار مطابق شکل (۱۱) به وسیله نرم‌افزار آباکوس به ۳۱۴۲ مش مثلثی تقسیم شده است و سطح مقطع راداری برای قطبش‌های موازی و عمودی در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است و نتایج شبیه‌سازی با روش‌های مختلف محاسبه سطح مقطع راداری به وسیله نرم‌افزار CST-MS 2014 مقایسه شده است.

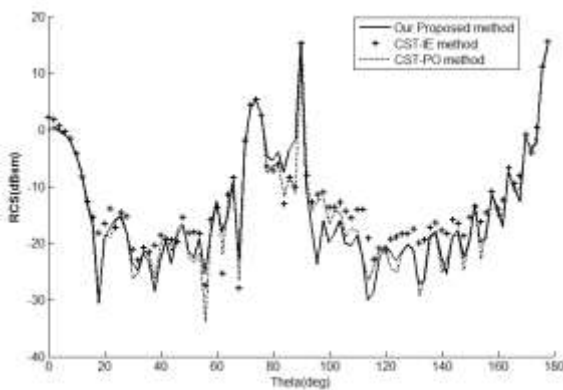
روش PO نرم‌افزار CST-MS از نوع پیشرفته‌تر تئوری نور فیزیکی برای محاسبه سطح مقطع راداری اجسام استفاده می‌نماید که البته تاثیر لبه‌ها و بازتاب‌های چندگانه را در محاسبه سطح مقطع راداری در نظر می‌گیرد. روش IE



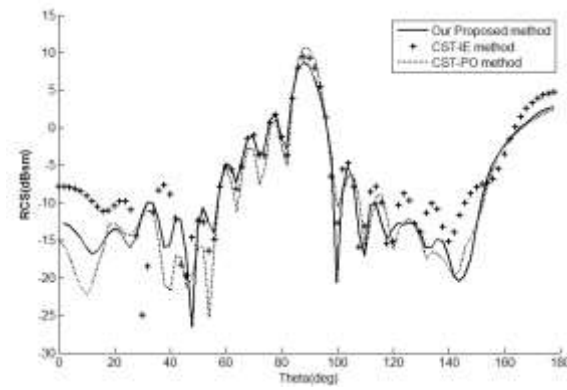
شکل (۱۴) RCS شکل (۱۰) در فرکانس ۳ گیگاهرتز برای قطبش موازی.



شکل (۱۲) RCS شکل (۱۰) در فرکانس ۶۰۰ مگاهرتز برای قطبش موازی.



شکل (۱۵) RCS شکل (۱۰) در فرکانس ۳ گیگاهرتز برای قطبش عمودی.

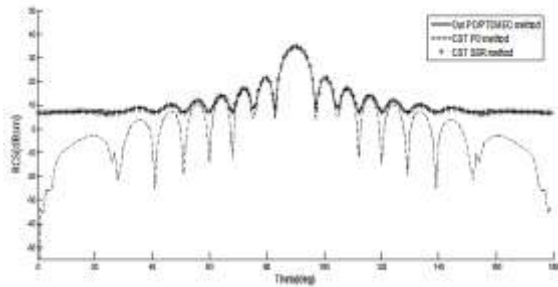


شکل (۱۳) RCS شکل (۱۰) در فرکانس ۶۰۰ مگاهرتز برای قطبش عمودی.

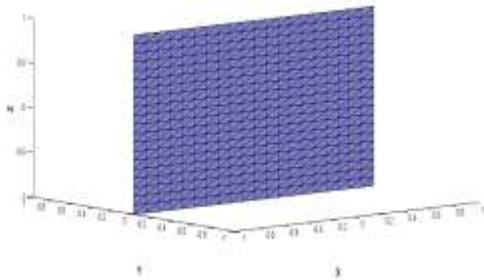
چنانچه در برخی از زوایا، روش PO جواب مناسبی ارائه ندهد، دلیل این عدم تطبیق را می توان به تغییر در ساختار مکانیکی دیده شده جسم توسط امواج رادیویی - برای مثال به تاثیر لبه ها - نسبت داد که اگر چنانچه فرکانس افزایش یابد، میزان دقت روش PO بیشتر و تاثیر عواملی همانند لبه ها کاهش می یابد. به طور کلی دلایل عدم تطابق به عواملی مانند تاثیر لبه ها، ناحیه تاریک و بازتاب های چندگانه در محاسبه سطح مقطع راداری، نسبت داد که ما تاثیر این عوامل رادر روش خودمان در نظر نگرفتیم. لازم به ذکر است روش PO ارائه شده در این پژوهش، برای شبیه سازی های فوق در مقایسه با روش IE بیش از ۸۰ درصد صرفه جویی زمانی داشته است. در شبیه سازی دوم روش PO/PTDMEC برای محاسبه RCS یک صفحه هادی کامل مربعی در فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز با ابعاد $2\lambda \times 2\lambda$ استفاده شده است. این سطح مربعی مطابق شکل (۱۶) بر روی صفحه z-x قرار گرفته است و موج با قطبش موازی به آن برخورد می نماید. نتایج شبیه سازی در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

برای نشان دادن دقت تئوری نور فیزیکی در فرکانس های بالا، این بار فرکانس را از ۶۰۰ مگاهرتز به ۳ گیگاهرتز رسانده و سطح مقطع راداری مونواستاتیک برای شکل (۱۰) را یک بار دیگر محاسبه نمودیم. نتایج برای قطبش های متفاوت در شکل های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. در فرکانس ۳ گیگاهرتز، شکل (۱۰) به وسیله نرم افزار آباکوس به ۶۵۸۹۴ مش مثلثی تقسیم شده است.

مشاهده می شود مطابقت نتایج ما با نتایج نرم افزار CST-MS نسبت به فرکانس ۶۰۰ مگاهرتز بهبود قابل توجهی داشته است به گونه ای که برای هر دو قطبش موازی و عمودی در زوایای ۰ تا ۱۵ درجه و از زوایای ۱۷۰ تا ۱۸۰ نتایج ما دقیقاً با روش معادلات انتگرالی مطابقت دارد زیرا تحت این زوایا تاثیر لبه ها و ناحیه تاریک با توجه به فرکانس کاری ناچیز است. با توجه به شکل های (۱۴) و (۱۵)، می توان گفت، برای قطبش موازی به نتایج دقیق تری دست پیدا کرده ایم چرا که به روش بسیار دقیق معادلات انتگرالی مطابقت بیش تری دارد.

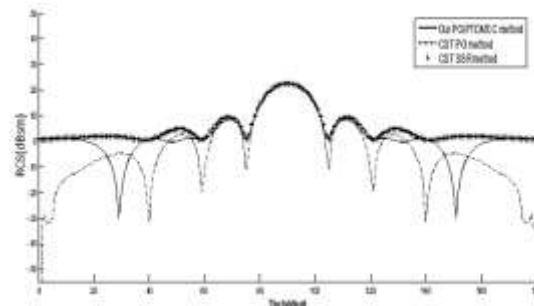


شکل (۱۸) RCS یک صفحه مربعی به ضلع 4λ در فرکانس 300 مگاهرتز.

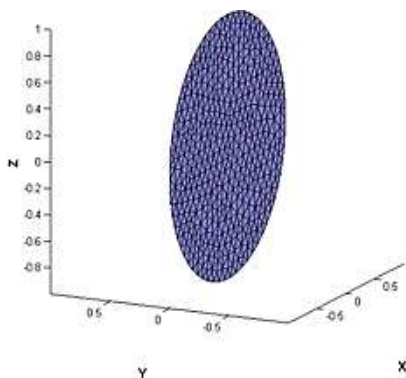


شکل (۱۶) مش بندی صفحه مربعی.

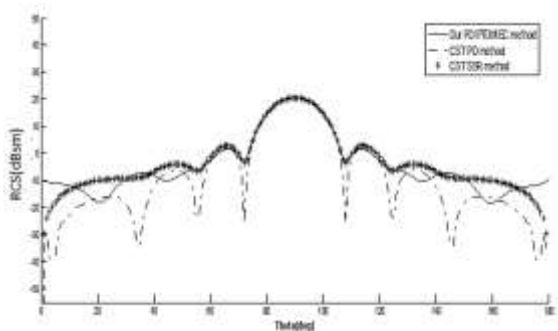
با توجه به افزایش ابعاد الکتریکی جسم، روش ما با دقت بیشتری محاسبات را انجام می دهد به گونه ای که روش ما مطابقت کامل با روش SBR نرم افزار CST-MS دارد. در شبیه سازی آخر با استفاده از روش PO/PTDMEC به محاسبه RCS دو صفحه هادی کامل دایروی به شعاع λ و 2λ می پردازیم. فرکانس کاری 300 مگاهرتز است و سطح دایروی بر روی صفحه Z-X قرار گرفته است (شکل (۱۹)) و موج با قطبش موازی به آن برخورد می نماید. برای دایره به شعاع λ نتایج شبیه سازی به صورت شکل (۲۰) می باشد.



شکل (۱۷) RCS یک صفحه مربعی به ضلع 2λ در فرکانس 300 مگاهرتز.



شکل (۱۹) مش بندی صفحه دایروی.



شکل (۲۰) یک صفحه دایروی به شعاع λ در فرکانس 300 مگاهرتز.

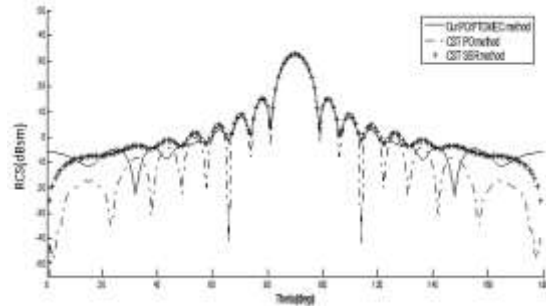
در این شبیه سازی ما نتایج خود را با روش PO و SBR^۱ نرم افزار CST-MS مقایسه نمودیم. اساس روش SBR بر آن است که به صورت ترکیبی از نور هندسی و نور فیزیکی است و به نسبت روش PO، روش قدرتمندتری است و تاثیر بازتاب های چندگانه را در نظر می گیرد. مشاهده می شود نتایج ما با روش SBR مطابقت بیشتری پیدا کرده است و با استفاده از مقادیر اضافه شده توسط روش PTDMEC توانستیم تاثیر لبه ها در محاسبه RCS را در نظر گرفته و به نسبت روش PO، مقادیر RCS را بهبود بخشیم. بیشترین تفاوت نسبت به روش SBR در زوایای 30 و 150 درجه است که روش ما یک صفر در این زوایا ارائه کرده در صورتی که در روش SBR و PO نرم افزار CST-MS چنین نیست. دلیل این صفر را می توان اینگونه عنوان کرد که جسم از لحاظ الکتریکی چندان بزرگ نمی باشد و همچنین امکان استفاده از روش دیگری (به جز روش PTDMEC) برای در نظر گرفتن تاثیر لبه ها توسط نرم افزار CST-MS وجود دارد که موجب تفاوت نتایج شده است. حال ابعاد صفحه مربعی را از 2λ به 4λ می رسانیم. نتایج شبیه سازی به صورت شکل (۱۸) تغییر می کند.

¹ Shooting and Bouncing Ray method

CST-MS را می توان به تاثیر لبه ها، ناحیه تاریک و بازتاب های چندگانه در محاسبه سطح مقطع راداری، نسبت داد. همچنین روش PO/PTDMEC ارائه شده بوسیله ما، در فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز برای صفحات هادی مربعی و دایروی با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که روش ما به دلیل در نظر گرفتن تاثیر لبه ها، نسبت به روش PO نرم افزار CST-MS ارتقای چشم گیری داشته و از مطابقت مناسبی با روش SBR این نرم افزار برخوردار است و دلیل اختلاف روش ما با روش SBR را می توان به تاثیر بازتاب های چندگانه نسبت داد.

۷- مراجع

- [1] Weinmann, F., "Ray Tracing With PO/PTD for RCS Modeling of Large Complex Objects", IEEE Transactions on Antennas And Propagation, Vol.54, No.6, pp.1797-1806, 2006.
- [2] Jalilvand, M., Abiri, H., "Echo Area of an Aircraft Model Using GTD-EC Method", Serbia & Montenegro, Belgrade, pp.22-24, 2005.
- [3] Toflove, A., Hagness, S.C., "Computational Electro-dynamics", Third Edition, ARTECH HOUSE, 2005.
- [4] Gibson, W.C., "The Method of Moments in Electromagnetics", Second Edition, CRC Press, 2015.
- [5] Knott, E.F., Shaeffer, J.F., Tuley, M., "Radar Cross Section", Second Edition, SciTech Publishing, Inc, 2004.
- [6] Duan, D.H., Mahon, J.P., and Rahmat-Samii, Y., "A Comparative Study Among GTD and PTD Techniques For Circular Disks", Antennas and Propagation Society International Symposium, pp.1578-1581, 1990.
- [7] Kobayashi, H., Shi, S., "RCS Calculation Software For Large And Complex Obstacles", Electronics, Communications and Control (ICECC), pp.975-978, 2011.
- [8] Xin, J., BaoFa, W., "RCS Analysis and Calculation System in All-Band Region Based on Object-Oriented and Visualization Design", Radar, Proceedings on CIE International Conference, pp.869 - 873, 2001.
- [9] Smit, J., C., "SigmaHat: A Toolkit for RCS Signature Studies of Electrically Large Complex Objects", IEEE Radar Conference, pp.446-451, 2015.
- [10] Jawad Khan, Wenyang Duan and Salma Sherbaz, "Radar Cross Section Prediction and Reduction for Naval Ships", J. Marine Sci., Vol.11, pp.191-199, 2012.
- [11] Eugene F. Knott, "A Progression High Frequency RCS Prediction Technique", Proceedings Of The IEEE, Vol.73, No.2, pp.252-264, 1935.



شکل (۲۱) یک صفحه دایروی به شعاع 2λ در فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز.

همان طور که از شکل (۲۰) مشخص است تحت زوایای 60° تا 120° درجه روش ما با روش SBR مطابقت کامل دارد. و در زوایای دیگر به نسبت روش PO نرم افزار CST-MS به دلیل در نظر گرفتن اثر لبه ها بهتر می باشد. این نتایج نشان می دهد روش ما بهتر از روش PO نرم افزار CST-MS تاثیر لبه ها را در نظر می گیرد. حال شعاع صفحه دایروی را از λ به 2λ می رسانیم. همچنان مشخص است تحت زوایای 60° تا 120° درجه، روش ما با روش SBR بیشترین مطابقت را دارد. دلیل تفاوت با روش SBR را می توان به تاثیر بازتاب های چندگانه نسبت داد چراکه پرتو برخورد کننده به یک لبه می تواند بازتاب مجددی به سمت لبه های دیگر داشته باشد که در روش ما در نظر نگرفته شده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از روش PO و PO/PTDMEC برای محاسبه سطح مقطع راداری اجسام پیچیده استفاده شده است. روش PO، سطح مقطع راداری دیده شده از سطح جسم را نشان می دهد. این روش با استفاده از روش PTDMEC بهبود پیدا کرده است، که تاثیر لبه ها در محاسبه RCS را در نظر می گیرد. در این روش، یک بار ساختار سطح جسم و یک بار لبه های جسم با استفاده از نرم افزار آباکوس مش بندی شده و تئوری نور فیزیکی بر سطح جسم و روش PTDMEC بر لبه های جسم اعمال گردیده و نتایج حاصل با هم جمع می شود تا RCS کل جسم را ارائه نماید. روش PO ارائه شده بوسیله ما در فرکانس های ۳ گیگاهرتز و ۶۰۰ مگاهرتز برای محاسبه RCS مونواستاتیک جسم هادی کامل مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج آن با نتایج نرم افزار CST-MS مقایسه گردیده است. با وجود نتایج قابل قبول در این حالت ها، دلایل اختلاف نتایج ما با نرم افزار

- [12] Saez de Adana, F., Gutiérrez, O., González, I., Cátedra, M.F., Lozano, L., "Practical Applications of Asymptotic Techniques in Electromagnetics", ARTECH HOUSE, 2011.
- [13] Balanis, C.A., "Advanced Engineering Electromagnetics", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [14] Meana J.G., Martínez-Lorenzo J.Á., Las-Heras F. and Rappaport C., "Wave by and Using the Modified Equivalent Current Approximation (MECA)", IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol.58, No.11, pp.3757-3761, 2010.
- [15] Meana, J.G., Martínez-Lorenzo J.Á., Rappaport, C., Las-Heras, F., "Modified Equivalent Current Approximation (MECA) Applied to Radioelectric Coverage Evaluation in Rural Scenarios", Antennas and Propagation (EuCAP), Proceedings of the Fourth European Conference on, pp.2-16, 2010.
- [16] Gutiérrez-Meana, J., Martínez-Lorenzo, J.A., and Fernando Las-Heras, F., "High Frequency Techniques: the Physical Optics Approximation and the Modified Equivalent Current Approximation (MECA), Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter", Prof. Ahmed Kishk (Ed.), InTech, 2011.
- [17] Gomez-Sousa, H., Martinez-Lorenzo, J.A., and RubinosLopez, O., "Three-Dimensional Wedge Diffraction Correction Deduced By The Stationary Phase Method on The Modified Equivalent Current Approximation (MECA)", Progress In Electromagnetics Research M, Vol.23, pp.207-227, 2012.
- [18] Daemit, Jalililand, M., "Diffraction Techniques Prediction of an Aircraft Model ", IET International Conference on Radar Systems, 2007.
- [19] Pyotr Ya. Ufimtsev, "Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction ", John Wiley & Sons, 2007.
- [20] Altin, N., and Yazgan, E., "The Calculation of Back Scattering Field of Unmanned Air Vehicle", PIERS Proceedings, Beijing, China, pp.23-27, 2009.
- [21] Albayrak, N. A., "Rcs Computations with PO/PTD For Conducting and impedance Objects Modeled as Large Flat Platess", M.Sc. Thesis, Bilkent university, 2005
- [22] Chatzigeorgiadis, F., "Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application", M.Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, 2004.