

پیاده‌سازی نرم‌افزار محاسبه‌کننده سطح مقطع راداری با استفاده از تئوری نور

فیزیکی (RCSPO)

مهران تسلیمی^۱، عطااله ابراهیم‌زاده^{۲*}

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

(دریافت: ۹۴/۰۹/۱۴؛ پذیرش: ۹۵/۰۷/۰۷)

چکیده

محاسبه سطح مقطع راداری (RCS)، از موضوعات مهم برای پنهان‌سازی و شناسایی اهداف می‌باشد. هزینه بالای اندازه‌گیری RCS در فضای آزاد، طراحی یک نرم‌افزار برای این کار را اجتناب‌ناپذیر کرده‌است. در این مقاله طراحی یک نرم‌افزار مناسب به نام RCSPO با استفاده از تئوری نور فیزیکی برای محاسبه سطح مقطع راداری اجسام پیچیده هادی و عایق در فرکانس‌های بالا، مورد تحقیق قرار گرفته است. در روش معرفی شده، ابتدا جسم مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مش‌بندی می‌گردد. سپس با انتقال اطلاعات هر مش به نرم‌افزار MATLAB، تئوری نور فیزیکی بر آن اعمال گردیده و با مجموع میدان‌های الکتریکی دیده شده از هر مش، سطح مقطع راداری کل جسم به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد الگوریتم ارائه‌شده، با نتایج نرم‌افزار CST-MS مطابقت مناسبی دارد و مشخصات RCS را با پیچیدگی کمتر نسبت به روش‌های قبل، در زمان کمتری تعیین می‌کند.

واژگان کلیدی

سطح مقطع راداری، تئوری نور فیزیکی، اجسام پیچیده، مش‌بندی در آباکوس

روش‌های مبتنی بر نور هندسی مانند GO و GTD و روش‌های مبتنی بر نور فیزیکی مانند PO و PTD تقسیم نمود [۶]. یکی از مهمترین معایب روش‌های مبتنی بر نور هندسی همانند GTD این است که مقدار میدان محاسبه شده ناشی از لبه‌های یک جسم، توسط این روش بی‌نهایت می‌گردد، لذا در این پژوهش از تئوری نور فیزیکی (PO) به عنوان یک روش مناسب برای محاسبه سطح مقطع راداری ساختارهای پیچیده، در فرکانس‌های بالا استفاده شده است.

در مرجع [۷] نرم‌افزاری با نام ACES با استفاده از روش‌های عددی PO و PTD برای محاسبه RCS اهداف پیچیده استفاده شده است که از محیط گرافیکی GUI نرم‌افزار متلب بهره می‌برد و تاثیر مواد و پوشش‌های مختلف و زمین در محاسبه RCS را با استفاده از ضرایب فرنل و بدون استفاده از مقدار رسانندگی در این فرمول‌ها در نظر می‌گیرد که البته نتایج خود را نیز با نرم‌افزارهای تجاری مقایسه نموده است. در مرجع [۸] صرفاً برپایه تعاریف اولیه از کاربرد روش‌های عددی، یک بسته نرم‌افزاری با نام RCSAS برای تمام باندهای فرکانسی از فرکانس پایین تا فرکانس بالا معرفی شده است که بسته به باند فرکانسی از یکی از روش‌های عددی مثل از روش MoM برای فرکانس‌های

۱. مقدمه

شناسایی و پنهان‌سازی اهداف در حوزه‌های نظامی دارای اهمیت بسیار بالایی می‌باشد [۱]، بنابراین طراحی یک نرم‌افزار برای محاسبه سطح مقطع راداری (RCS)، به منظور فراهم کردن یک پایگاه اطلاعاتی برای تشخیص شکل هدف و همچنین مطالعاتی جهت کاهش توان بازگشتی از هدف بسیار مهم و ضروری می‌باشد.

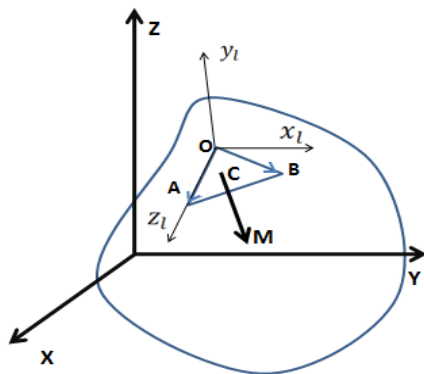
برای طراحی چنین نرم‌افزاری می‌توان از روش‌های مختلف عددی استفاده نمود [۲]. دسته‌ای از این روش‌ها همانند FDTD [۳]، MoM [۴] و... روش‌های دقیق در محاسبه سطح مقطع راداری بوده اما حجم محاسبات بالایی داشته و به حافظه بالایی برای شبیه‌سازی نیاز دارند. در مقابل دسته‌ی دیگری از روش‌ها همانند PO، GTD، GO، PTD 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

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

که در آن، \vec{H}_s^{tot} مجموع میدان‌های مغناطیسی تابشی و بازتابی و \vec{E}_s^{tot} مجموع میدان‌های الکتریکی تابشی و بازتابی بر سطح جسم، R_{\perp} و R_{\parallel} ضرایب بازتاب برای قطبش‌های 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} و \vec{s}_{\perp} به ترتیب جریان‌های الکتریکی و مغناطیسی معادل در هر مش و η امپدانس ذاتی ماده می‌باشند این بار نیز با انتگرال‌گیری از این جریان‌ها می‌توان میدان‌های راه دور را به دست آورد [۱۱]. نحوه به‌دست آوردن مقادیر \vec{a}_{\perp} ، \vec{a}_{\parallel} و \vec{s}_{\parallel} در بخش ۳ توضیح داده شده است.

۳. مراحل طراحی نرم‌افزار محاسبه‌گر سطح مقطع راداری

مرحله اول: در ابتدا جسم با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به مش‌های مثلثی (با ابعاد کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج) تقسیم می‌شود. این نرم‌افزار مختصات رئوس هر مش مثلثی را استخراج می‌کند (یعنی نقاط A، O و B را مطابق شکل تعیین می‌کند) و در نتیجه می‌توان با این اطلاعات ساختار شکل هندسی را در نرم‌افزار MATLAB، بازسازی کرده و با روش معرفی شده در مرجع [۱۷]، مطابق فرمول‌های (۶) - (۹)، بردار عمود بر هر مش محاسبه می‌گردد:



شکل ۱. نحوه مش‌بندی و یافتن بردار عمود بر هر مش

$$\vec{z}_1 = \frac{\vec{OA}}{|\vec{OA}|} \quad (6)$$

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{OB}}{|\vec{OB}|} \quad (7)$$

$$\vec{y}_1 = \vec{e}_1 \times \vec{z}_1 \quad (8)$$

$$\vec{x}_1 = \vec{y}_1 \times \vec{z}_1 \quad (9)$$

که در آن، نقاط O، A و B سه راس تشکیل دهنده هر مش

پایین استفاده می‌نماید. در مرجع [۹] نرم‌افزاری با نام SigmaHat برای محاسبه RCS معرفی شده است. این نرم‌افزار از روش‌های عددی تقریبی مانند PO و SBR می‌تواند برای محاسبه RCS اجسام هادی کامل استفاده نماید.

نکته قابل توجه در این پژوهش آن است که از روش تئوری نور فیزیکی برای محاسبه RCS اجسام هادی کامل و عایق استفاده شده است. این روش به‌ویژه برای اجسام عایق صرفه‌جویی زمانی قابل توجهی داشته است و یک استفاده جدید از تئوری نور فیزیکی بوده که حتی نرم‌افزارهای تجاری همانند HFSS و CST نیز از این روش برای محاسبه RCS اجسام عایق استفاده نکرده‌اند.

برای محاسبه سطح مقطع راداری یک ساختار پیچیده همانند هواپیما یا موشک در ابتدا جسم را به مش‌های بسیار کوچک مثلثی (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 به‌دست‌آمده را با هم جمع نموده و سطح مقطع راداری کل ساختار به‌دست می‌آید [۲ و ۱۰].

۲. تئوری نور فیزیکی

بر طبق تئوری نور فیزیکی جریان‌های معادل الکتریکی ناشی از برخورد موج الکترومغناطیسی بر روی یک جسم هادی کامل به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۱]:

$$\vec{J} = \begin{cases} 2\vec{n} \times \vec{H}_i & \text{سطح روشن} \\ 0 & \text{سطح تاریک} \end{cases} \quad (1)$$

که \vec{n} بردار عمود و برون‌سو بر سطح جسم، \vec{H}_i میدان مغناطیسی تابشی و \vec{J} جریان الکتریکی بر سطح هادی می‌باشد. با انتگرال‌گیری از این جریان‌ها می‌توان میدان‌های راه دور را به دست آورد [۱۱].

حال اگر جسم عایق باشد در کنار جریان‌های معادل الکتریکی، جریان‌های معادل مغناطیسی نیز بر سطح جسم و برای ناحیه روشن تعریف خواهد شد که در این صورت جریان‌های معادل الکتریکی و مغناطیسی به صورت زیر محاسبه می‌شود (در این حالت از تئوری PO با نام تئوری MECA نیز یاد می‌شود) [۱۶-۱۲]:

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times \vec{H}_s^{\text{tot}} \quad (2)$$

$$\vec{M}_s = -\vec{n} \times \vec{E}_s^{\text{tot}} \quad (3)$$

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

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:

$$\vec{a}_{\perp} = \vec{k}_i \times \vec{n} \quad (17)$$

$$\vec{a}_{\parallel} = \vec{k}_i \times \vec{a}_{\perp} \quad (18)$$

$$\vec{s}_{\parallel} = \vec{k}_r \times \vec{a}_{\perp} \quad (19)$$

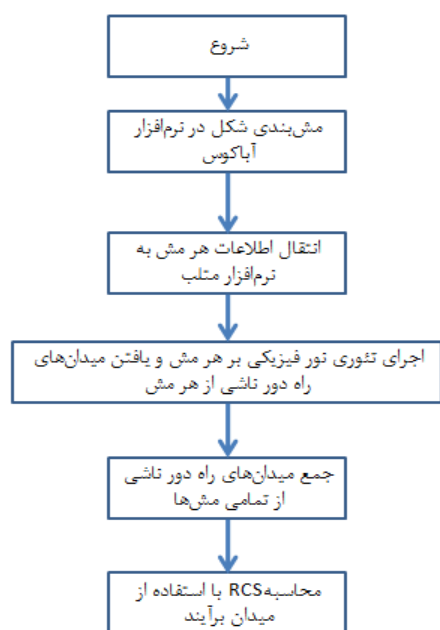
$$\vec{k}_r = \vec{k}_i - 2(\vec{k}_i \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (20)$$

که در آن، \vec{k}_i راستای موج تابشی و \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 (۲۱)، سطح مقطع راداری کل جسم، به ازای هر زاویه محاسبه می‌گردد:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (21)$$

که در آن، σ سطح مقطع راداری دیده شده از جسم، R فاصله فرستنده تا هدف، \vec{E}_i میدان تابشی و \vec{E}_s میدان‌های پراکنده شده می‌باشد. در شکل ۲ الگوریتم محاسبه سطح مقطع راداری با استفاده از تئوری نور فیزیکی ارائه شده است:



شکل ۲. فلوجارت محاسبه سطح مقطع راداری با استفاده از تئوری نور فیزیکی

مثلی، \vec{e}_1 بردار یکه در راستای بردار \vec{OB} ، \vec{a}_1 و \vec{y}_1 بردار راستای محورهای دستگاه مختصات محلی تعریف شده برای هر مش و همچنین \vec{y}_1 بردار عمود بر هر مش می‌باشد. فرمول‌های فوق به تنهایی نمی‌توانند بردار عمود و برون‌سو بر هر مش را نشان دهند چراکه رابطه (۸) 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. در اجسام محدب، 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 به عنوان مرکز کل حجم جسم در نظر گرفته می‌شود:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N} \quad (10)$$

که در آن، C_i مرکز هر مش و N تعداد مش‌هاست، به عبارت دیگر M مرکز کلی جسم است. با استفاده از شروط زیر در صورت لزوم جهت بردار \vec{y}_1 تصحیح می‌گردد:

$$\text{if } \vec{C}_i M \cdot \vec{y}_1 < 0 \rightarrow \vec{n} = \vec{y}_1 \quad (11)$$

$$\text{if } \vec{C}_i M \cdot \vec{y}_1 > 0 \rightarrow \vec{n} = -\vec{y}_1 \quad (12)$$

که در آن، \vec{n} بردار عمود و برون‌سو بر هر مش مثلثی می‌باشد.

مرحله دوم: با توجه به فرمول‌های (۱) تا (۳) 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 [۱۷-۱۸]:

$$\vec{k}_i \cdot \vec{n} < 0 \quad (13)$$

که در آن، \vec{k}_i راستای انتشار موج است.

مرحله سوم: از فرمول‌های (۴) و (۵) مشخص است که نوع قطبش در محاسبه سطح مقطع راداری موثر است، بنابراین، ضروری است معین گردد یک مش، موج تابشی را با چه قطبش‌هایی و به چه نسبتی از هم می‌بیند، لذا برای هر مش، موج تابشی به آن به قطبش‌های عمودی و موازی تجزیه می‌شود [۱۶]:

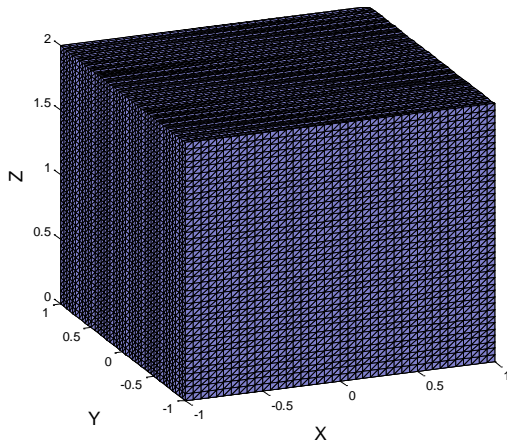
$$\vec{E}_s^{inc} = E_{s,\perp}^{inc} \vec{a}_{\perp} + E_{s,\parallel}^{inc} \vec{a}_{\parallel} \quad (14)$$

$$E_{s,\perp}^{inc} = |\vec{E}_s^{inc} \cdot \vec{a}_{\perp}| \quad (15)$$

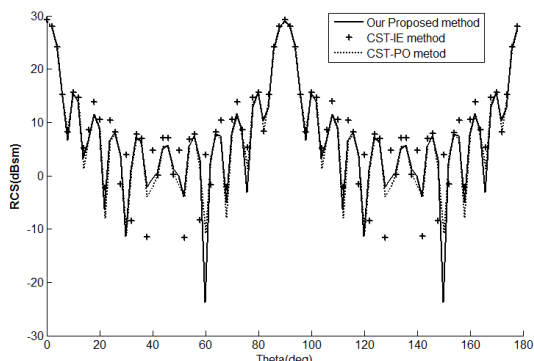
$$E_{s,\parallel}^{inc} = |\vec{E}_s^{inc} \cdot \vec{a}_{\parallel}| \quad (16)$$

که در آن، $E_{s,\perp}^{inc}$ مولفه عمودی موج تابشی، $E_{s,\parallel}^{inc}$ مولفه موازی موج تابشی و همان‌طور که گفته شد، در آن \vec{a}_{\perp} راستای قطبش

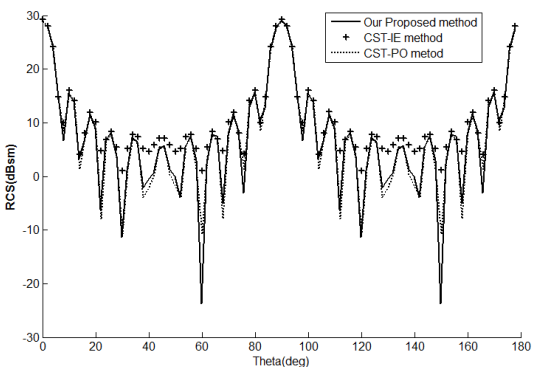
در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین در زوایای ۶۰ و ۱۵۰ درجه با توجه به کم‌ترین مقدار سطح فیزیکی دیده شده و نقش لبه‌ها و اضلاع مکعب در پراکنش امواج، RCS به حداقل مقدار خود می‌رسد. از نظر زمانی نیز روش ما به نسبت روش معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS نزدیک به شصت درصد صرفه‌جویی زمانی داشته است.



شکل ۴. مش‌بندی یک مکعب به ضلع ۲ متر در فرکانس ۶۰۰ MHz



شکل ۵. RCS شکل ۱۰ در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش موازی

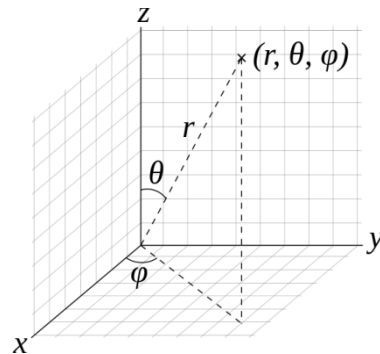


شکل ۶. RCS شکل ۴ در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش عمودی

در حالت بعدی، برای سنجش قابلیت تئوری نور فیزیکی بر اجسام عایق، این بار جنس مکعب شکل ۴ را به یک مکعب عایق

۴. نتایج شبیه‌سازی

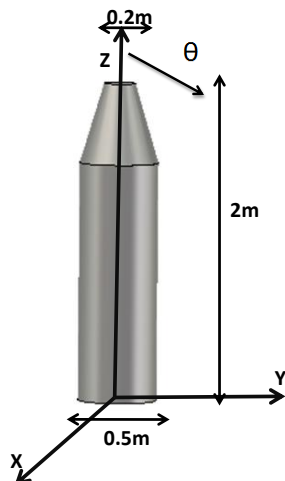
در این بخش نتایج تئوری نور فیزیکی برای محاسبه RCS چند جسم و در قطبش‌های متفاوت بررسی شده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها قطبش‌های عمودی و موازی نسبت به صفحه $Z-Y$ تعریف شده‌اند یعنی در قطبش موازی میدان الکتریکی عمود بر صفحه $Z-Y$ (TE^x)، و در قطبش عمودی میدان الکتریکی عمود بر صفحه $Z-Y$ (TM^x)، می‌باشد. مقادیر RCS در کلیه شبیه‌سازی‌ها به‌ازای $\varphi = 90^\circ$ و $0^\circ < \theta < 180^\circ$ با فاصله زاویه‌ای ۲ درجه محاسبه شده است. زوایای θ و φ که به ترتیب نسبت به محور Z و X سنجیده می‌شوند همان زوایای استاندارد تعریف شده برای دستگاه مختصات کروی هستند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد هر مش مثلثی نیز یک‌دهم طول موج می‌باشد.



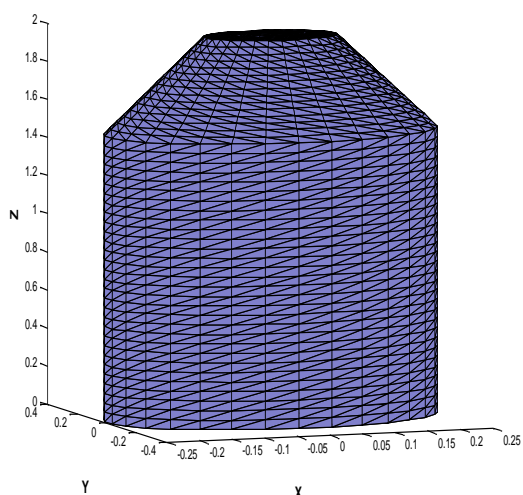
شکل ۳. زوایای θ و φ تعریف شده برای دستگاه کروی

در شبیه‌سازی اول به بررسی سطح مقطع راداری برای یک مکعب هادی کامل به ضلع ۲ متر، در فرکانس ۶۰۰ MHz و برای قطبش‌های موازی و عمودی می‌پردازیم. همان‌طور که گفته شد، جهت محاسبه RCS، این ساختار مکعبی به مش‌های مثلثی تقسیم می‌شود. مطابق شکل ۴، این ساختار به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس به ۱۹۲۰۰ مش مثلثی تقسیم شده است و نتایج مربوط به محاسبه RCS آن در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. این نتایج 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 (مرتبه اول) را در محاسبه سطح مقطع راداری در نظر می‌گیرد. روش IE نرم‌افزار CST-MS، یک روش مبتنی بر معادلات انتگرالی بوده و از نوع روش‌های دقیق در محاسبه سطح مقطع راداری می‌باشد. با توجه به حداکثر مقدار سطح فیزیکی دیده شده از ساختار مکعبی تحت زوایای صفر، ۹۰ و ۱۸۰ درجه، مقدار RCS تحت این زوایا به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از آنجایی که مکعب دارای ساختار متقارن بوده، نمودار RCS بر حسب زاویه θ باید متقارن باشد، که این مسائل به وضوح

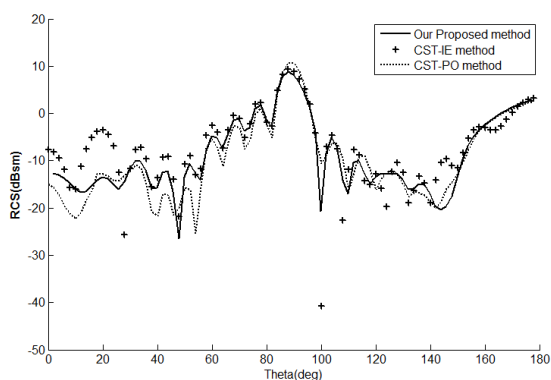
مطابق شکل ۱۰ به وسیله نرم‌افزار آباکوس به ۳۱۴۲ مش مثلثی تقسیم شده است و سطح مقطع راداری برای قطبش‌های موازی و عمودی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۹. ابعاد جسم در شبیه‌سازی دوم

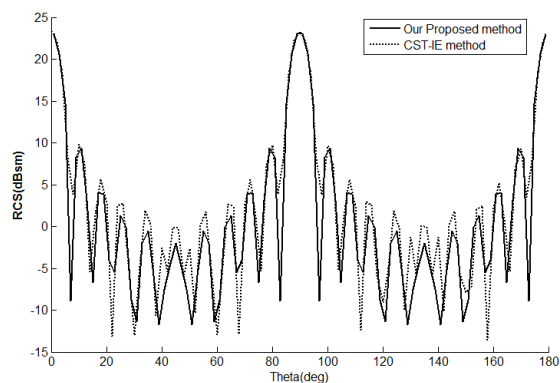


شکل ۱۰. مش‌بندی شکل ۹ در فرکانس ۶۰۰MHz

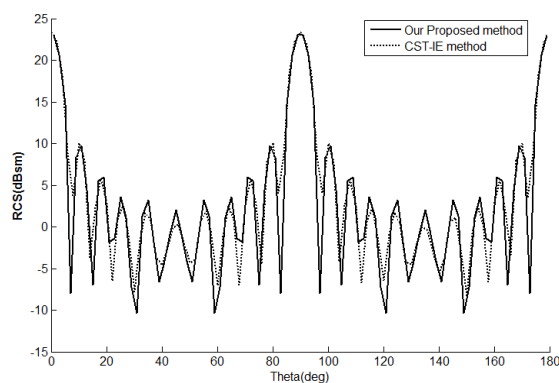


شکل ۱۱. RCS شکل ۹ در فرکانس ۶۰۰MHz برای قطبش موازی

با $\epsilon_r = 9$ و $\sigma = 0.1$ تبدیل نموده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی برای قطبش‌های موازی و عمودی به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ در فرکانس ۶۰۰MHz ارائه شده است. از آنجایی که نرم‌افزار CST-MS از روش نور فیزیکی فقط برای اجسام هادی کامل استفاده می‌نماید، نتایج این شبیه‌سازی تنها با روش معادلات انتگرالی این نرم‌افزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در مقایسه با حالت قبل که جسم مکعبی، هادی کامل بوده، میزان دقت نتایج بیشتر و نتایج حاصل از این پژوهش، به روش دقیق معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS مخصوصاً در زوایای ۴۵ و ۱۳۵ درجه نزدیک‌تر شده است، چراکه تاثیر لبه‌ها در محاسبه RCS اجسام عایق ضعیف‌تر بوده [۱۹] و بنابراین محاسبه اجسام عایق به نسبت اجسام هادی کامل، با دقت بیشتری انجام می‌گیرد. از نظر زمانی نیز روش ما به نسبت روش معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS تقریباً هشتاد درصد صرفه‌جویی زمانی داشته است.

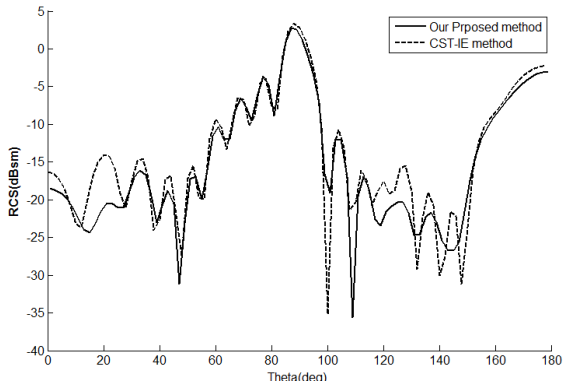


شکل ۷. RCS شکل ۱۰ (عایق) در فرکانس ۶۰۰MHz برای قطبش موازی



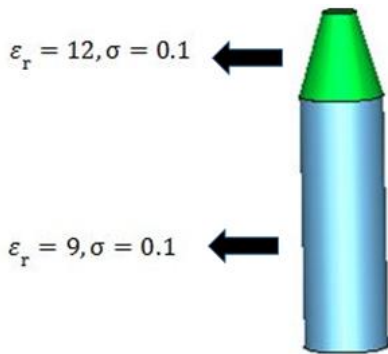
شکل ۸. RCS شکل ۴ (عایق) در فرکانس ۶۰۰MHz برای قطبش عمودی

در شبیه‌سازی دوم سطح مقطع راداری مونوستاتیک، برای یک شی هادی کامل، شبیه به موشک با ابعاد مشخص شده در شکل ۹، در فرکانس ۶۰۰ MHz، ارائه شده است. این ساختار

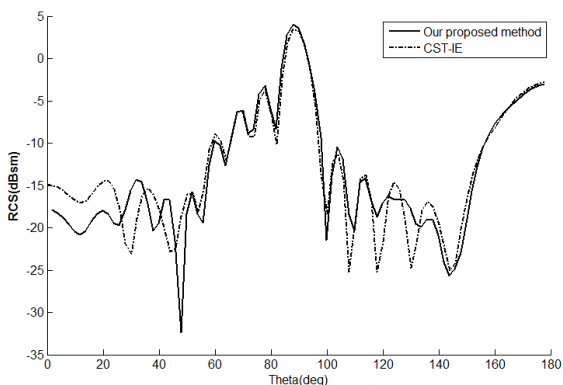


شکل ۱۴. RCS شکل ۹ (عایق) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش موازی

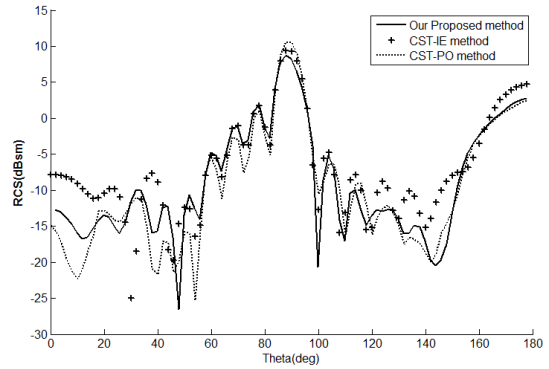
همچنین روش نور فیزیکی ارایه شده در این پژوهش، بر یک ساختار مشابه شکل ۹، ولی با دی‌الکتریک‌های متفاوت اعمال شده است (شکل ۱۵) که نتایج مربوط به محاسبه RCS در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۵. ساختار شکل ۹ با دی‌الکتریک‌های متفاوت



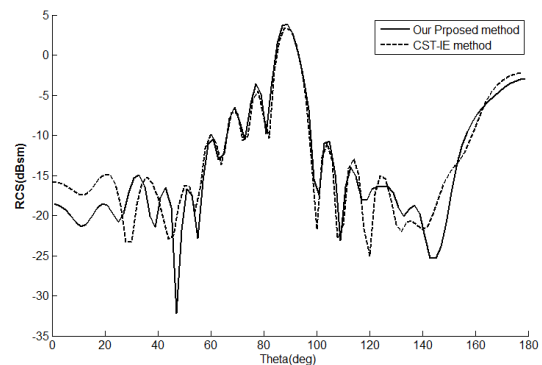
شکل ۱۶. RCS شکل ۱۵ (عایق-ترکیبی) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش عمودی



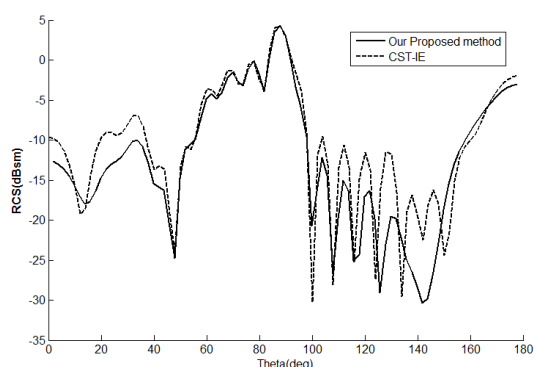
شکل ۱۲. RCS شکل ۹ در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش عمودی

همان‌طور که مشخص است الگوریتم ما با استفاده تئوری نور فیزیکی (PO) مطابقت بیشتری به روش بسیار دقیق معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS دارد تا تئوری نور فیزیکی نرم‌افزار CST-MS. 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 نرم‌افزار CST-MS همچنان بهتر می‌گردد. البته این امر نمی‌تواند یک توجیه کلی بر برتری تئوری نور فیزیکی ما بر تئوری نور فیزیکی نرم‌افزار CST باشد، اما در این مثال خاص می‌توان گفت عواملی همانند مش‌بندی دقیق‌تر و یا تعیین دقیق‌تر ناحیه روشن در روش ما موجب برتری تئوری نور فیزیکی این پژوهش بر تئوری نور فیزیکی نرم‌افزار CST شده است، چنانکه در ادامه خواهیم دید با افزایش فرکانس نتایج این پژوهش با نرم‌افزار CST دقیقاً منطبق می‌شود.

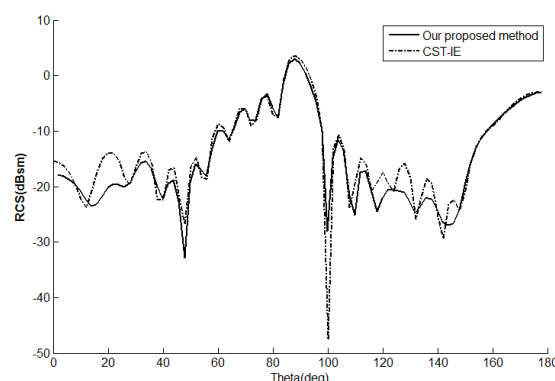
بار دیگر برای سنجش قابلیت تئوری نور فیزیکی بر اجسام عایق، جنس ساختار شکل ۹ را به یک ساختار عایق با $\epsilon_r = 9$ و $\sigma = 0.1$ تبدیل نموده‌ایم (فرکانس همان مقدار ۶۰۰ MHz می‌باشد). نتایج روش PO ارائه شده در این پژوهش با روش IE نرم‌افزار CST-MS مقایسه شده است و برای قطبش‌های مختلف در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است:



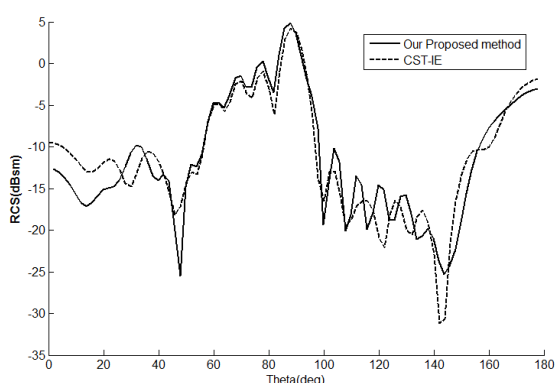
شکل ۱۳. RCS شکل ۹ (عایق) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش عمودی



شکل ۱۹. RCS شکل ۱۸ (ترکیب عایق- هادی) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش موازی



شکل ۱۷. RCS شکل ۱۵ (عایق- ترکیبی) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش موازی

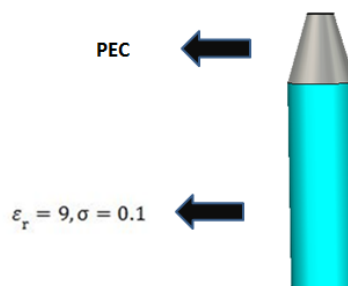


شکل ۲۰. RCS شکل ۱۸ (ترکیب عایق- هادی) در فرکانس ۶۰۰ MHz برای قطبش عمودی

همان‌طور که گفته شد، دلایل عدم تطابق نتایج ما با نرم‌افزار CST به دلیل تاثیر لبه‌ها و ناحیه تاریک بویژه در فرکانس‌های نه چندان بالا می‌باشد، از این‌رو چنانچه فرکانس افزایش یابد، انتظار داریم، دقت نتایج ما با روش‌های دقیق به‌ویژه روش IE نرم‌افزار CST که در اینجا مورد بحث است، بیشتر گردد. از این‌رو برای نشان دادن دقت تئوری نور فیزیکی در فرکانس‌های بالا، این‌بار فرکانس را از ۶۰۰ MHz به ۳ GHz رسانده و سطح مقطع راداری مونوستاتیک برای شکل ۹، در حالتی که جنس آن هادی کامل می‌باشد، یک‌بار دیگر محاسبه شده است. نتایج برای قطبش‌های متفاوت در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. در فرکانس ۳GHz، شکل ۹ به وسیله نرم‌افزار آباکوس به ۶۵۸۹۴ مش مثلثی تقسیم شده است. مشاهده می‌شود مطابقت نتایج ما با نتایج نرم‌افزار CST-MS نسبت به فرکانس ۶۰۰MHz (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) بهبود قابل توجهی داشته است به گونه‌ای که برای هر دو قطبش موازی و عمودی در زوایای صفر تا ۱۵ درجه و از زوایای ۱۷۰ تا ۱۸۰ دقیقاً با روش معادلات انتگرالی مطابقت دارد زیرا تحت این زوایا تاثیر لبه‌ها و ناحیه تاریک با توجه به فرکانس کاری ناچیز است. در زوایای نزدیک به ۹۰ درجه (مثلاً ۸۰ تا ۹۰

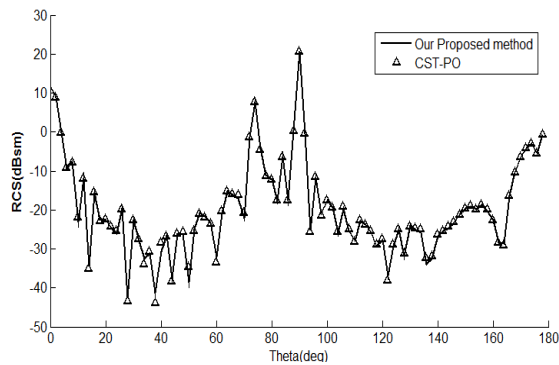
علاوه بر این ساختار ترکیبی، یک ساختار ترکیبی دیگر، به صورت ترکیبی از هادی و عایق (شکل ۱۸) و نتایج شبیه‌سازی برای قطبش‌های مختلف در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود نتایج آرایه شده در محاسبه RCS، برای ساختار جسم شکل ۹ در حالتی که جسم متشکل از یک ماده عایق است، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، و در حالتی که جسم متشکل از دو ماده عایق متفاوت است در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، و برای حالتی که جسم به صورت ترکیبی از دی‌الکتریک و هادی کامل است در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که روش ما به نتایج روش دقیق معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST بسیار نزدیک و از مطابقت مناسبی برخوردار می‌باشد. دلایل عدم تطابق روش ما با روش IE نرم‌افزار CST، به تاثیر لبه‌ها در پراکنش امواج و همچنین تاثیر ناحیه تاریک (ناحیه‌ای که در معرض تابش امواج قرار ندارد، و در روش PO آرایه شده در این پژوهش، سهم این ناحیه را در نظر نمی‌گیرد اما در روش IE در نظر گرفته می‌شود). با توجه به این‌که جسم از نظر الکتریکی خیلی هم بزرگ نمی‌باشد تاثیر این عوامل مشهودتر می‌باشد، بنابراین، با افزایش فرکانس انتظار بهبود و انطباق بیشتر میان نتایج روش آرایه شده در این پژوهش و نتایج نرم‌افزار CST وجود دارد. لازم به ذکر است روش PO آرایه شده در کلیه این موارد، تقریباً ۸۰ درصد صرفه جویی زمانی داشته است.

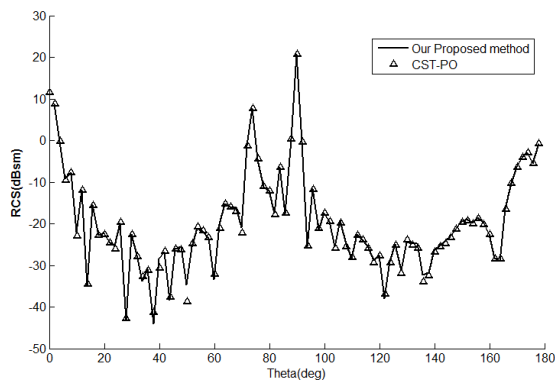


شکل ۱۸. ساختار شکل ۹ به صورت ترکیبی از هادی کامل و عایق

شده است؛ چراکه در فرکانس‌های بالا پراکنش از لبه‌ها کاهش می‌یابد.

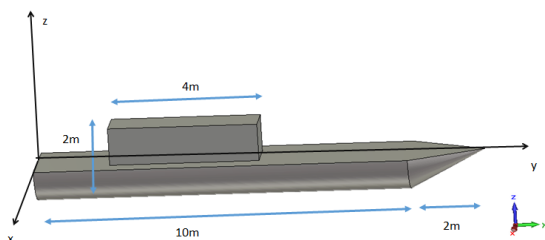


شکل ۲۳. RCS در فرکانس ۱۰ GHz برای قطبش عمودی



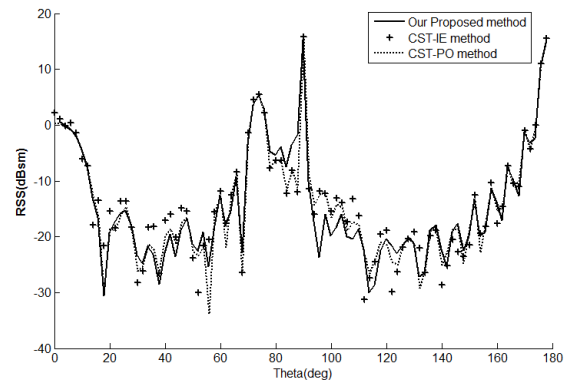
شکل ۲۴. RCS در فرکانس ۱۰ GHz برای قطبش موازی

در شبیه‌سازی سوم، یک ساختار نسبتاً پیچیده‌تر، که در شکل ۲۵ نشان داده شده است و شبیه به یک مدل کوچک ساده از کشتی است، را بررسی می‌نماییم. در این ساختار تاثیر بازتاب‌های چندگانه در محاسبه RCS، خود را نشان می‌دهد. سطح مقطع راداری این ساختار هندسی با جنس هادی کامل، در فرکانس ۱ GHz در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ برای قطبش‌های مختلف ارائه شده است. روش ارائه شده در این پژوهش با روش‌های مختلف نرم‌افزار CST یعنی PO، IE، و SBR این نرم‌افزار مقایسه شده است. روش SBR یک روش فرکانس بالای تقریبی است که به صورت ترکیبی از روش‌های نور فیزیکی و نور هندسی عمل کرده و تاثیر بازتاب‌های چندگانه را در محاسبه RCS در نظر می‌گیرد.

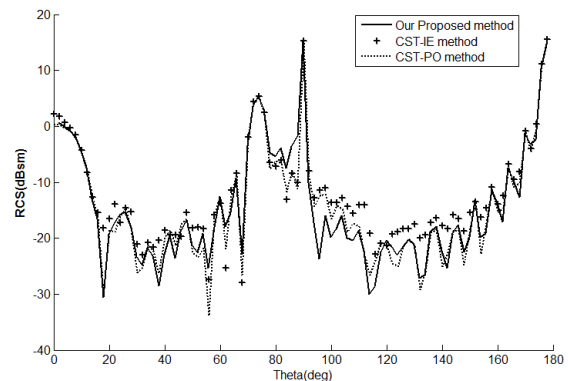


شکل ۲۵. ساختار هندسی شبیه‌سازی شماره ۳

درجه)، جریان‌های ناحیه تاریک قوی‌تر شده (به دلیل امواجی که ساختار استوانه را دور می‌زنند (creeping wave)) و سهم بیشتری در محاسبه RCS پیدا می‌کند لذا تحت این زوایا روش‌های نور فیزیکی با روش معادلات انتگرالی تفاوت پیدا می‌کند، در صورتی که در فرکانس ۶۰۰ MHz با توجه به ناچیز بودن جریان‌های ناحیه تاریک در این زوایا ما با دقت مناسبی نتایج روش معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS را به دست آوردیم. همچنین تاثیر لبه‌ها در این زوایا و در فرکانس ۳ GHz نیز باعث شده تا نتایج ما با روش PO نرم‌افزار CST اختلاف پیدا نماید. به‌طور کلی دلایل عدم تطابق به عواملی مانند تاثیر لبه‌ها، ناحیه تاریک و بازتاب‌های چندگانه (در صورت وجود) در محاسبه سطح مقطع راداری، نسبت داد که تاثیر این عوامل در روش PO ارائه شده در این پژوهش در نظر گرفته نشده است. از نظر زمانی نیز روش ما به نسبت روش معادلات انتگرالی نرم‌افزار CST-MS در این حالت بیش از شصت درصد صرفه‌جویی زمانی داشته است.



شکل ۲۱. RCS در فرکانس ۳ GHz برای قطبش موازی



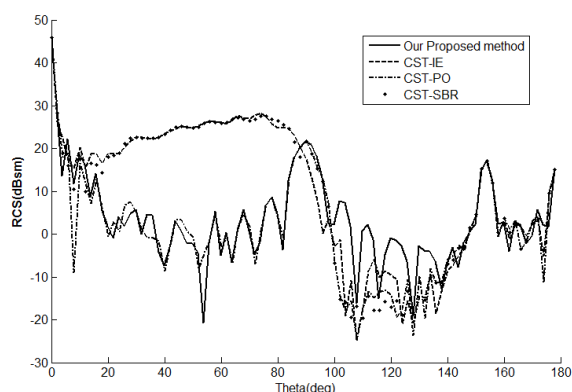
شکل ۲۲. RCS در فرکانس ۳ GHz برای قطبش عمودی

برای نشان دادن دقت بیشتر روش PO ارائه شده در این پژوهش در فرکانس‌های بالا، در حالت بعدی RCS ساختار شکل ۹ را در فرکانس ۱۰ GHz محاسبه نموده‌ایم که در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که نتایج ما با نتایج PO نرم‌افزار CST، که تاثیر لبه‌ها را نیز در نظر می‌گیرد، منطبق

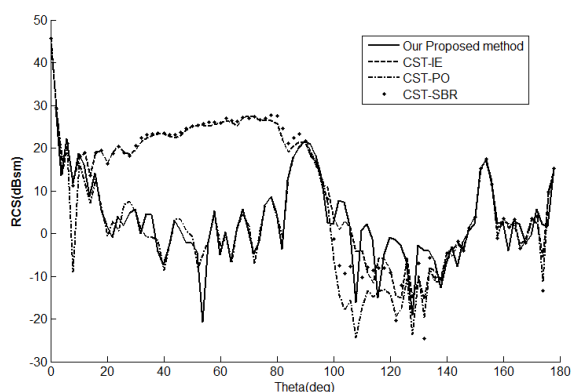
که جسم از مواد مختلف تشکیل شده باشد، ϵ ، μ ، σ هر مش باید محاسبه گردد. این روش در فرکانس‌های ۱GHz، ۳GHz و ۱۰GHz و ۶۰۰ MHz برای محاسبه RCS مونوستاتیک جسم هادی کامل و برای محاسبه RCS مونوستاتیک جسم عایق با $\epsilon_r = 9$ و $\sigma = 0.1$ و $\epsilon_r = 12$ و $\sigma = 0.1$ و همچنین و برای محاسبه RCS مونوستاتیک جسم ترکیبی عایق-هادی در فرکانس ۶۰۰ MHz مورد ارزیابی قرار گرفته‌است و نتایج آن با نتایج نرم‌افزار CST-MS مقایسه گردیده است. با وجود نتایج قابل قبول در مدت زمان بسیار کم‌تر، دلایل اختلاف نتایج ما با نرم-افزار CST را می‌توان به تاثیر لبه‌ها، ناحیه تاریک و بازتاب‌های چندگانه (در صورت وجود) در محاسبه سطح مقطع راداری، نسبت داد. همچنین تئوری نور فیزیکی با توجه به نقش کمتر ناحیه تاریک و لبه‌ها در محاسبه RCS اجسام عایق، RCS این اجسام را با دقت بیشتری نسبت به اجسام هادی کامل محاسبه می‌کند، که صرفه جویی زمانی تقریباً ۸۰ درصد در شبیه‌سازی‌ها را در پی داشته است.

۶. مراجع

- [1] S. Hajisadeghian and A. Sheikhi, "Detection of Sea Target Using Satellite Radiation Using the Weights of Adaptive Filter," Journal of Radar, vol. 1, no. 1, pp. 35-47, 2012 (In persian).
- [2] M. Jalilvand and H. Abiri, "Echo Area of an Aircraft Model Using GTD-EC Method," Int. Conf. on Computer as a Tool, pp. 22-24, 2005.
- [3] A. Toflove and S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics," Artech House, 2005.
- [4] W. C. Gibson, "The Method of Moments in Electromagnetics," CRC Press, 2015.
- [5] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. Tuley, "Radar Cross Section," Sci. Tech. Publishing, 2004.
- [6] D. H. Duan, J. P. Mahon, and Y. Rahmat-Samii, "A Comparative Study Among GTD and PTD Techniques for Circular Disks," Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1578-1581, 1990.
- [7] H. Kobayashi and S. Shi, "RCS Calculation Software for Large and Complex Obstacles," Int. Conf. on Electronics, Communications and Control (ICECC), pp. 975-978, 2011.
- [8] J. Xin and W. BaoFa, "RCS Analysis and Calculation System in All-Band Region Based on Object-Oriented and Visualization Design," CIE Int. Conf. on Radar Proceedings, pp. 869 - 873, 2001.
- [9] J. C. Smit, "SigmaHat: A Toolkit for RCS Signature Studies of Electrically Large Complex Objects," IEEE Radar Conference, pp. 446-451, 2015.
- [10] N. Altin and E. Yazgan, "The Calculation of Back Scattering Field of Unmanned Air Vehicle," PIERS Proceedings, pp.1460-1463, 2009.
- [11] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, 2012.
- [12] J. G. Meana, J. A. Martínez-Lorenzo, F. Las-Heras, and C. Rappaport, "Wave by and Using the Modified Equivalent



شکل ۲۶. RCS شکل ۲۵ در فرکانس ۱ GHz برای قطبش عمودی



شکل ۲۷. RCS شکل ۲۵ در فرکانس ۱ GHz برای قطبش موازی

لازم به ذکر است روش SBR نرم‌افزار CST تا بازتاب‌های مرتبه سه را در شبیه‌سازی ارائه شده در نظر می‌گیرد، از این رو نتایج PO ارائه شده به وسیله ما و نتایج PO نرم‌افزار CST در زوایای ۱۰ تا ۸۰ درجه به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر زیاد بازتاب‌های چندگانه در محاسبه RCS ضعیف‌تر عمل می‌کنند، در نتیجه روش SBR به روش IE نزدیک‌تر می‌باشد که البته تاثیر بازتاب‌های چندگانه در زوایای ۱۰۰ تا ۱۴۰ درجه کم‌تر شده، از این رو نتایج روش‌های مختلف به یکدیگر همگرا می‌شوند. لازم به یادآوری است که روش ارائه شده در این پژوهش نسبت به معادلات انتگرالی (IE) نرم‌افزار CST در این مورد بیش از ۸۰ درصد صرفه جویی زمانی دارا می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی پایه‌سازی تئوری نور فیزیکی برای محاسبه سطح مقطع راداری اجسام پیچیده ارائه شده است. در این روش، ساختار جسم با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مش‌بندی شده و تئوری نور فیزیکی در هر مش اجرا و با مجموع میدان‌های دیده شده از هر مش، RCS کل جسم محاسبه می‌گردد و در صورتی

- Current Approximation (MECA)," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 11, pp. 3757-3761, 2010.
- [13] J.G. Meana, J. A. Martínez-Lorenzo, C. Rappaport, and F. Las-Heras, "Modified Equivalent Current Approximation (MECA) Applied to Radioelectric Coverage Evaluation in Rural Scenarios," In Proc. of Euro. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 12-16, 2010.
- [14] J. Gutiérrez-Meana, J.A. Martínez-Lorenzo, and F. Fernando Las-Heras, "High Frequency Techniques: the Physical Optics Approximation and the Modified Equivalent Current Approximation (MECA)," Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter, In Tech., 2011.
- [15] H. Gomez-Sousa, J. A. Martinez-Lorenzo, and O. Rubinos Lopez, "Three-Dimensional Wedge Diffraction Correction Deduced by the Stationary Phase Method on the Modified Equivalent Current Approximation (MECA)," Progress in Electromagnetics Research , vol. 23, pp. 207-227, 2012.
- [16] F. Saez de Adana, O. Gutiérrez, I. González, M. F. Cátedra, and L. Lozano, "Practical Applications of Asymptotic Techniques in Electromagnetics," Artech Housse, 2011.
- [17] N. A. Albayrak, "RCS Computations with PO/PTD for Conducting and Impedance Objects Modeled as Large Flat Plates," M. Sc. Thesis, Bilkent university, Ankara, BS, 2005.
- [18] F. Chatzigeorgiadis, "Development of Code for A Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application," M.Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, BS, 2004.
- [19] F. Saez de Adana, I. González, O. Gutiérrez, P. Lozano, and M. Atedra, "Method Based On Physical Optics For The Computation On the Radar Cross Section Including Diffraction And Double Effects of Metallic And Absorbing Bodies Modeled By Parametric Surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 12, pp. 3295-3303, 2004.

Implementation of RCS Software Calculator Using Physical Optics Theorem (RCSP0)

M. Taslimi*, A. Ebrahimzadeh*

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 05/12/2015, Accepted: 28/09/2016)

Abstract

Radar cross section (RCS) calculation is an important issue of objects stealth and identification. It is necessary to design the RCS software because of the high cost of RCS measurements in practice. In this paper, designing of efficient software using physical optics theorem for radar cross section calculation of the complex perfect electric conductors or complex dielectric objects for high frequencies is investigated. In this method, first the object will be meshed in Abaqus Software. Then the obtained data of every mesh is transferred to MATLAB Software and, after that, the physical optics theorem is applied for every mesh, with considering the summation of electric fields that is seen from each mesh. As the result, the radar cross section of total object will be obtained. Simulations results show the proposed method has good agreement with CST-MS results and determines the RCS of the objects with lower complexity in the lower time consuming.

Keywords: Radar Cross Section, Physical Optics Theorem, Complex Objects, Meshing in Abaqus.

* Corresponding author E-mail: e_zadeh@nit.ac.ir