محاسبه سطح مقطع راداری اجسام الکتریکی بزرگ به روش نورفیزیکی

نویسندگان: سیده مهسا سرائی- msaraee72@yahoo.com

چکیده: در میان روش‌های گوناگون ارائه شده برای محاسبه سطح مقطع راداری اجسام هادی بزرگ، با توجه به اینکه در ناحیه نوری قرار دارند، فرکانس بالا مانند روش نور هندسی و روش نور فیزیکی پیشنهاد شده است؛ که با توجه به اینکه روش نورفیزیکی روشی بین الکترومغناطیس تمام موج و نور هندسی است، مصالحه‌ی مطلوبی بین دقت و بار محاسباتی داشته و بنابراین از این روش برای محاسبه میدان‌های پراکندگی استفاده می‌شود. برای محاسبه میدان‌های پراکندگی لازم است ابتدا ناحیه روشن معلوم و آزمون برخورد انجام شود. پس از آن با انتگرال‌گیری از جریان القا شده بر روی سطح جسم، انتگرال نور فیزیکی و به دنبال آن سطح مقطع راداری محاسبه می‌شود. برای انجام و محاسبه آزمون برخورد و انتگرال نورفیزیکی، سطح جسم مش بندی می‌شود، که این، برای اجسام با ابعاد بزرگ در قیاس با طول موج و یا پیچیده، بار محاسباتی سنگینی را بر مسئله تحمیل می‌کند. که برای حل این چالش، از قابلیت محاسبات موازی MATLAB بر روی GPU ها بهره گرفته می‌شود.

کلید واژه: برنامه نویسی موازی، روش نور فیزیکی، سطح مقطع راداری

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سیستم‌های رادار، بسیار قدرتمند شده‌اند و قادر هستند کوچک‌ترین پراکندگی از سطح اهداف را شناسایی کنند. لذا اهداف پرنده مانند هواپیما و موشک، می‌توانند توسط میدان‌های پراکندگی الکترومغناطیسی ردیابی شوند. توان دریافتی آنتن گیرنده طی برخورد موج به هدف طبق رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$P_{Rx} = \left(\frac{P_{Tx}G_{Tx}}{4\pi R_1^2}\right)\left(\frac{\sigma}{4\pi R_2^2}\right)\left(\frac{\lambda^2 G_{Rx}}{4\pi}\right) \qquad (۱)$$

این معادله، به معادله رادار موسوم است و ارتباط بین برد رادار، گین آنتن فرستنده و گیرنده را بیان و حداکثر فاصله قابل‌رؤیت جسم توسط رادار و عوامل تأثیرگذار بر کیفیت عملکرد آن را مشخص می‌کند [۱]. پرانتز اول بیانگر چگالی سطحی توان ارسالی در محل جسم، پرانتز دوم چگالی توان پراکندگی از جسم در محل آنتن گیرنده و پرانتز سوم سطح مقطع مؤثر آنتن گیرنده می‌باشد. در این رابطه P_{Tx} و G_{Tx} به ترتیب توان و بهره آنتن فرستنده، P_{Rx} و G_{Rx} توان و بهره آنتن گیرنده، R برد رادار، σ سطح مقطع راداری و λ طول‌موج است.

با توجه به این معادله، هر چه اندازه فاصله جسم از رادار بیشتر باشد، توان دریافتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین این معادله، بیان‌کننده رابطه بین برد رادار و سطح مقطع راداری[۱] است که در صورت یکجا بودن آنتن گیرنده و فرستنده، ($R_1=R_2=R$) با ریشه چهارم سطح مقطع راداری ($\sigma^{1/4}$) متناسب است. بدان معنی که با کاهش سطح مقطع راداری میزان رؤیت پذیری هدف کاهش‌یافته و می‌تواند در فاصله نزدیک‌تری نسبت به رادار پرواز کند. لذا کاهش سطح مقطع راداری به‌خصوص در کاربردهای نظامی میان محققین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است.

۲- سطح مقطع راداری

نحوه تعریف ریاضی سطح مقطع راداری به‌صورت زیر است [۲]:

$$\sigma = \lim_{r\to+\infty}(4\pi r^2)\frac{W_s}{W_i} \qquad (۲)$$

در این رابطه W_s چگالی سطحی توان پراکندگی از جسم درراه دور، W_i چگالی سطحی توان تابشی در محل جسم و r فاصله رادار از جسم است. واحد سطح مقطع راداری m^2 می‌باشد. با توجه به اینکه چگالی سطحی توان پراکندگی

درراه دور با میدان‌های الکترومغناطیسی متناسب است می‌توان این رابطه را به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$\sigma = \lim_{r\to+\infty}(4\pi r^2)\frac{|\mathbf{E_s}|^2}{|\mathbf{E_i}|^2} = \lim_{r\to+\infty}(4\pi r^2)\frac{|\mathbf{H_s}|^2}{|\mathbf{H_i}|^2} \quad (۳)$$

همچنین با توجه به اینکه درراه دور چگالی سطحی توان پراکندگی متناسب با عکس مجذور فاصله است، سطح مقطع راداری مستقل از فاصله بوده و تنها وابسته به جهت مشاهده هدف از دید رادار است.

سطح مقطع راداری به دو شکل تعریف می‌شود:

۱- تک‌پایه[۲]: آنتن فرستنده و گیرنده در یک نقطه هستند.

۲- دوپایه[۳]: آنتن فرستنده و گیرنده در دونقطه مختلف هستند.

در تحلیل مسائل مربوط به برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با اجسام موجود در محیط، ابعاد جسم در چگونگی پراکندگی انرژی تابشی نقش مهمی دارد لذا سه ناحیه کاری مختلف برای تحلیل پراکندگی موج و محاسبه سطح مقطع راداری می‌توان در نظر گرفت:

ناحیه رایلی[۴]: در این ناحیه ابعاد جسم در قیاس با طول‌موج بسیار کوچک‌ترند (اجسامی با ابعاد کمتر از ۰/۱ طول‌موج) و قسمت‌های مختلف جسم باهم برهم‌کنش زیادی دارند و یکپارچه عمل می‌کنند لذا مانند یک بازتابنده نقطه‌ای عمل کرده و موج تابشی شکل فیزیکی جسم را درک نمی‌کند.

ناحیه تشدید (Mie)[۵]: در این ناحیه ابعاد جسم و طول‌موج در یک‌مرتبه هستند. برهم‌کنش بین نقاط مختلف جسم در مقایسه با ناحیه رایلی کمتر بوده و با افزایش فاصله دونقطه روی سطح، کاهش می‌یابد. تغییرات سطح مقطع راداری نسبت به فرکانس رفتاری نوسانی خواهد داشت.

ناحیه نوری[۶]: در این ناحیه ابعاد جسم بسیار بزرگ‌تر از طول‌موج است (حدوداً ۱۰ برابر طول‌موج) و برهم‌کنش هر قسمت از سطح جسم با موج تابشی مستقل از سایر نقاط سطح جسم است؛ زیرا موج تابشی هر نقطه از سطح جسم را بزرگ‌تر از طول‌موج می‌بینند. به بیانی دیگر، جریان القاشده از هر نقطه از سطح جسم تنها ناشی از برهم‌کنش موج تابشی با همان نقطه است و به سایر نقاط وابسته نیست (محلی بودن پراکندگی موج الکترومغناطیسی) [۲،۳].

۳- روش‌های محاسبه میدان پراکندگی

ازجمله روش‌های پیشنهادشده روش‌های عددی تمام موج مانند روش ممان[۷]، تفاضل محدود در زمان[۸] و اجزای محدود[۹] هستند که باوجود دقت بالا برای ناحیه نوری مناسب نیستند و بیشتر از آن‌ها برای اجسام با ابعاد متوسط و کوچک استفاده می‌شود. برای اجسام با ابعاد بزرگ‌تر (در قیاس با طول‌موج)، مانند اهداف نظامی، از روش فرکانس بالا مانند روش نور هندسی (GO[۱۰])، روش نور فیزیکی (PO[۱۱])، روش تفرق یکنواخت (UTD[۱۲]) و تفرق فیزیکی (PTD[۱۳]) استفاده می‌شود. این روش‌ها، با توجه به اینکه معادلات ماکسول را با تقریب فرکانس بالا حل می‌کنند، نسبت به روش‌های عددی از دقت پایین‌تری برخوردارند اما به دلیل حجم نسبتاً پایین محاسبات و نیاز نسبتاً کم به حافظه و داشتن دقت قابل‌قبول، مناسب هستند. در ادامه تنها به معرفی روش نور فیزیکی پرداخته می‌شود.

۴- روش نور فیزیکی

درروش نور فیزیکی میدان‌های پراکندگی از جسم توسط انتگرال‌گیری از جریان القاشده بر روی سطح جسم به دست می‌آید لذا ازاین‌جهت بسیار شبیه الکترومغناطیس تمام موج است. هم‌چنین، چگالی جریان القاشده در هر نقطه مستقل از سایر نقاط بوده و دو برابر میدان مغناطیسی مماسی است به این معنی که جریان القاشده در هر نقطه طوری محاسبه می‌شود که گویی آن نقطه بر یک صفحه با ابعاد بی‌نهایت مماس شده است. همچنین در این روش جریان القایی در نقاط سایه صفر بوده و پیوستگی میدان در تمام نقاط حفظ‌شده و نقاط کانونی ایجاد نمی‌شود و همچنین درصورتی‌که جسم فاقد انحنا باشد سطح مقطع راداری همچنان کران‌دار است [۳].

فرض کنید یک موج تابشی مسطح یکنواخت به سطح جسم برخورد کرده است (رابطه ۴)، با توجه به اینکه جریان القایی تنها تابعی از موج تابشی و ویژگی‌های هندسی ساختار است رابطه میدان پراکندگی راه دور به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{H_i} = H_0 e^{-jk\hat{k}.\acute{r}}\hat{h}_i \quad (۴)$$

$$\mathbf{H^s(r)} = -\frac{jkH_0}{2\pi r}e^{-jkr}\int_{S_i} e^{-jk(\hat{r}-\hat{k}).\acute{r}}\hat{r}\times \left(\hat{n}(\acute{r})\times\hat{h}_i\right)d\acute{s} \quad (۵)$$

که $\hat{h}_i$ بردار یکه معرف قطبش میدان مغناطیسی تابشی، $\hat{r}$ فاصله و $\hat{k}$ جهت انتشار موج تابشی است. با استفاده از اتحاد برداری $\mathbf{A}\times(\mathbf{B}\times\mathbf{C})=(\mathbf{A}.\mathbf{C})\mathbf{B}-(\mathbf{A}.\mathbf{B})\mathbf{C}$ و همچنین تعریف بردار f به‌صورت $\mathbf{f}=\int_{s_i}\hat{n}(\acute{r})e^{-jk(\hat{r}-\hat{k}).\acute{r}}\,d\acute{s}$ خواهیم داشت:

$$\mathbf{H^s(r)}=-\frac{jkH_0}{2\pi r}e^{-jkr}\left((\hat{r}.\hat{h}_i)\mathbf{f}-(\hat{r}.\mathbf{f})\hat{h}_i\right) \quad (۶)$$

لذا سطح مقطع راداری با توجه به رابطه (۳) به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma=\frac{4\pi}{\lambda^2}|(\hat{r}.\hat{h}_i)\mathbf{f}-(\hat{r}.\mathbf{f})\hat{h}_i|^2 \quad (۷)$$

که در حالت تک‌پایه به فرم زیر است:

$$\sigma=\frac{4\pi}{\lambda^2}|(\hat{r}.\mathbf{f})|^2 \quad (۸)$$

۵- تعیین ناحیه روشن و آزمون برخورد

قبل از استفاده از انتگرال نور فیزیکی ابتدا باید نواحی روشن‌شده ناشی از برخورد پرتو نور به سطح هدف مشخص شود. لذا جهت تعیین این ناحیه باید مدل‌سازی مناسبی از ساختار جسم ارائه شود، به‌گونه‌ای که داده‌های خروجی ناشی از آن، کم‌ترین بار محاسباتی برای تعیین ناحیه روشن و محاسبه انتگرال نور فیزیکی را ایجاد نماید. نمایش‌های صریح و پارامتری دو صورت مرسوم برای توصیف هندسی سطوح هستند، که در ادامه تنها سطوح پارامتری معرفی خواهند شد.

۵-۱- نمایش پارامتری

در توصیف پارامتری، مش بندی روی صفحه توصیف‌کننده پارامتر نظیر نربز[۱۴] و بی اسپلاین[۱۵] و به‌صورت مستطیلی انجام می‌گیرد و نقاط روی سطح به‌صورت تابعی از دو متغیر بیان می‌شود.

رویه‌های نربز ارائه‌دهنده شکل ریاضی یکپارچه برای اشکال هندسی استاندارد (مخروط، سطوح دوار و ...) و پیچیده است. این رویه‌ها با استفاده از نقاط کنترلی و ضرایب وزن قادر به طراحی و شکل‌دهی اشکال متنوعی هستند و این قابلیت‌ها به شکل قابل قبولی قابل پیاده‌سازی توسط کامپیوتر است.

۵-۲- آزمون برخورد

پس از تعیین ساختار جسم، توسط منبع راه دوری که در ابتدا در نظر گرفته می‌شود پرتوهایی را به‌صورت هدفمند به مرکز هرکدام از مش‌ها تابانیده و آزمون برخورد برای مش‌هایی که در شرط $\hat{n}.\hat{s}_i<0$ صدق می‌کنند انجام می‌شود. سپس با جایگذاری معادله پارامتری سطح در معادله پرتو، نقطه برخورد به دست می‌آید. سپس در صورتی که نقطه برخورد در محدوده مش موردنظر بود، آن مش به‌عنوان مش روشن ذخیره می‌شود.

۶- انتگرال نور فیزیکی

پس از تعیین مش‌های روشن، باید به محاسبه انتگرال نور فیزیکی پرداخت که با توجه به نوع توصیف سطح یک جسم، روش انتخابی جهت اعمال انتگرال نور فیزیکی متفاوت خواهد بود. که در این مقاله با توجه به اینکه از سطوح پارامتری استفاده‌شده است برای حل انتگرال از روش لودویگ استفاده خواهد شد. این روش باعث کاهش قابل‌توجه تعداد نقاط لازم برای محاسبه عددی انتگرال‌های دوگانه در مسائل پراکندگی است که شامل انتگرالی به فرم زیر است:

$$E=\iint_s F(u,v)e^{ik\gamma(u,v)}dudv \quad (۹)$$

در این رابطه F و γ به ترتیب تغییرات دامنه و فاز بر روی سطح S را توصیف می‌کنند. در یک مسئله سطح مقطع راداری جهت محاسبه عددی میدان‌های پراکندگی راه دور یا الگوهای تفرق به رابطه انتگرال نور فیزیکی $f=\iint_{s_i}\hat{n}(\acute{r})e^{-jk(\hat{r}-\hat{k}).\acute{r}}\,d\acute{s}$ خواهیم رسید؛ که با مقایسه آن با رابطه (۳۸-۱) درمی یابیم که توابع F و γ به ترتیب معادل $\hat{n}(\acute{r})$ و $(\hat{r}-\hat{k}).\acute{r}$ است که برای هر مش مقداری ثابت است [۴].

۷- برنامه‌نویسی بر روی GPU [۵]

واحد پردازش گرافیکی (GPU)، همانند CPU، یک پردازنده چندهسته است. با این تفاوت که GPU دارای صدها هسته بر روی یک واحد سخت‌افزار هستند. قدرت محاسباتی و پهنای باند حافظه منحصربه‌فرد GPU آن را به یک ابزار محاسباتی جذاب برای اجرای الگوریتم‌هایی با بار محاسباتی زیاد، تبدیل کرده است.

در ابتدا از GPU برای محاسبه توابع سه‌بعدی استفاده می‌شد زیرا این محاسبات بر روی CPU بار محاسباتی زیادی داشته است. اما هم‌اکنون الگوریتم‌هایی که به‌شدت موازی هستند نیز به‌طور کارآمدی بر روی GPU اجرا می‌شوند. بااین‌حال، GPU همواره بهتر از CPU نیست. طراحی CPU به‌گونه‌ای است برای اجرای کدهای سری بهینه است، و در مقابل، GPU برای محاسبات عددی حجیم به کار می‌رود. بنابراین، در بیشتر برنامه‌ها از هردوی این پردازنده‌ها استفاده می‌شود؛ بدین معنی که، بخش متوالی برنامه بر روی CPU و بخش زمان‌بر آن بر روی GPU اجرا می‌شود.

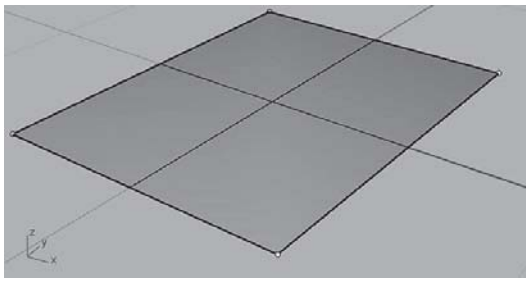
۸- سطح مقطع راداری چند ساختار

در این بخش، سطح مقطع راداری ساختارهای پایه مانند صفحه مسطح مستطیلی و مخروط و ساختارهای پیچیده مانند دو اُگیو مماسی با انحنای غیریکسان و موشک ساده موردبررسی قرارگرفته است.

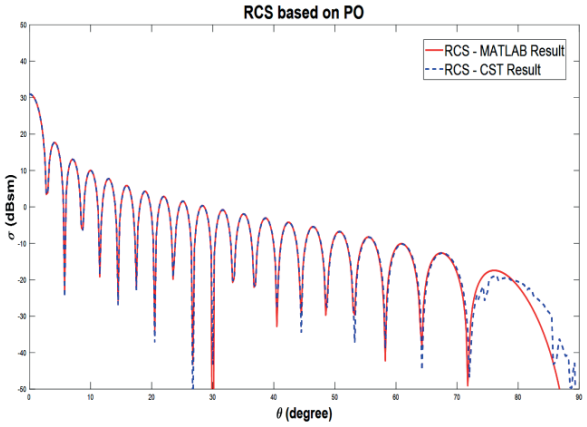
مدل‌سازی ساختارها توسط توصیف پارامتری و رویه‌های NURBS در نرم‌افزار Rhinoceros و محاسبه انتگرال نور فیزیکی به روش لودویگ انجام می‌شود. هم‌چنین برای کاهش زمان شبیه‌سازی، انتگرال نورفیزیکی و آزمون برخورد بر روی GPU در MATLAB پیاده شده است.

۸-۱- صفحه مستطیلی

مطابق شکل ۱، یک صفحه مربعی به طول ضلع ۱ متر طراحی‌شده است. سطح مقطع راداری تک‌پایه این جسم در صفحه $\varphi = ۰^\circ$ به ازای زوایای $\theta = ۰^\circ - ۹۰^\circ$ با رزولوشن زاویه‌ای یک‌چهارم در فرکانس ۳GHz محاسبه‌شده است. با توجه به اینکه سطح جسم کاملاً تخت و فاقد هرگونه انحنایی است، تمامی سطح توسط پرتوهای تابشی به‌طور کامل روشن می‌شود. لذا، آزمون برخورد برای آن در MATLAB بررسی نمی‌شود. در شکل ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از CST مقایسه شده است.



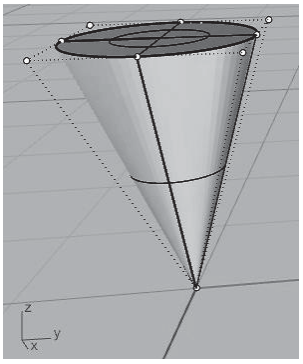
شکل ۱: صفحه مستطیلی همراه با نقاط کنترلی



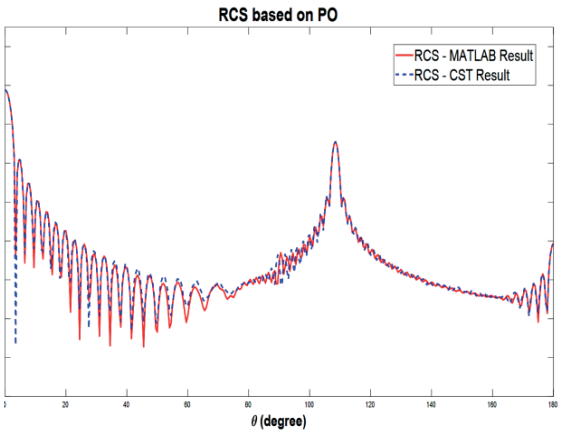
شکل ۲: سطح مقطع راداری صفحه مستطیلی به ازای ۱۰۰۰۰ مش در فرکانس ۳GHZ

۸-۲- مخروط

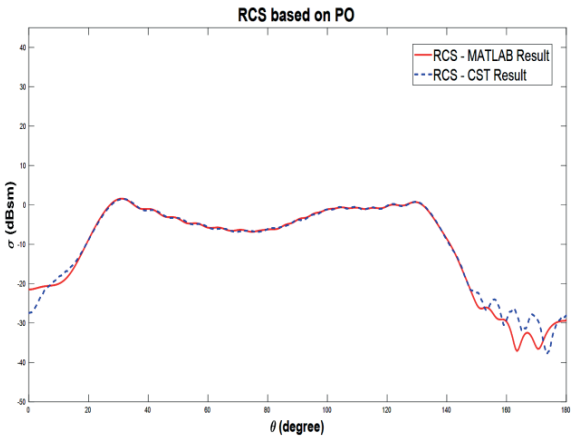
مطابق شکل ۳، یک مخروط به قطر ۱ متر و ارتفاع ۱/۵ متر طراحی‌شده است. پس از اجرای آزمون برخورد، سطح مقطع راداری تک‌پایه این جسم در صفحه $\varphi = ۰^\circ$ به ازای زوایای $\theta = ۰^\circ - ۱۸۰^\circ$ با رزولوشن زاویه‌ای یک‌دوم در فرکانس ۳GHz محاسبه و درنهایت نتایج آن با نتایج CST در شکل ۴ مقایسه شده است.



شکل ۳: مخروط همراه با نقاط کنترلی



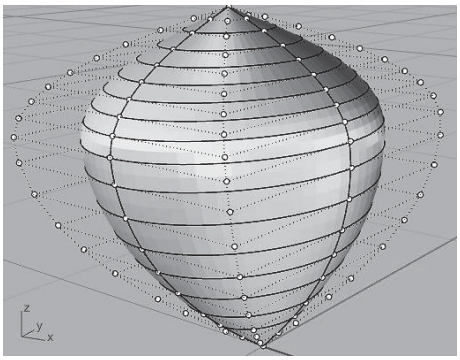
شکل ۴: سطح مقطع راداری مخروط به ازای ۱۲۲۴۶ مش در فرکانس ۳GHZ



شکل ۶: سطح مقطع راداری دو اُگیو با انحنای غیریکسان به ازای ۱۲۱۰۰ مش در فرکانس ۳GHZ

۸-۳- دو اُگیو با انحنای غیریکسان

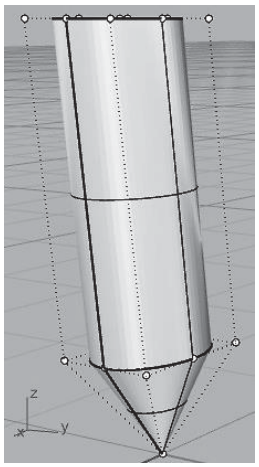
مطابق شکل ۵، دو اُگیو با قطر یکسان ۰/۷۸۴ متر و با نسبت ارتفاع ۱ به ۳ (ارتفاع کل ساختار ۱ متر است) طراحی‌شده که روند آن مشابه اُگیو مماسی است. پس از اجرای آزمون برخورد، سطح مقطع راداری تک‌پایه این جسم در صفحه $\varphi = ۰^\circ$ به ازای زوایای $\theta = ۰^\circ - ۱۸۰^\circ$ با رزولوشن زاویه‌ای یک‌دوم در فرکانس ۳GHz محاسبه‌شده است. در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از CST مقایسه شده است.



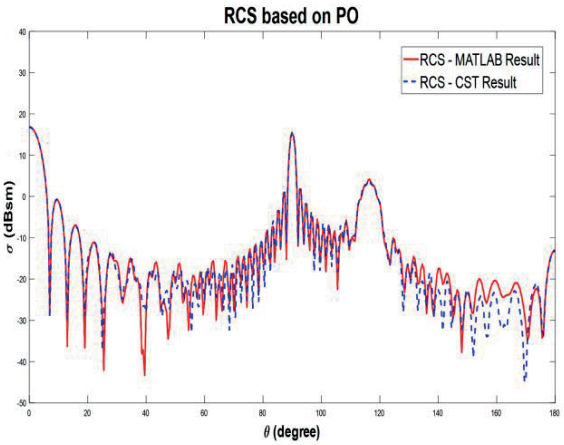
شکل ۵: دو اُگیو با انحنای غیریکسان همراه با نقاط کنترلی

۸-۴- موشک ساده

مطابق شکل ۷، یک موشک ساده با دماغه مخروطی به قطر ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر و بدنه استوانه‌ای به قطر ۰/۵ متر و ارتفاع ۱/۵ متر طراحی‌شده است. پس از اجرای آزمون برخورد، سطح مقطع راداری تک‌پایه این جسم در صفحه $\varphi = ۰^\circ$ به ازای زوایای $\theta = ۰^\circ - ۱۸۰^\circ$ با رزولوشن زاویه‌ای یک‌دوم در فرکانس ۳GHz محاسبه‌شده است. در شکل ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از CST مقایسه شده است.



شکل ۷: موشک ساده همراه با نقاط کنترلی



شکل ۸: سطح مقطع راداری موشک ساده به ازای ۶۰۲۰۰ مش در فرکانس ۳GHZ

در ادامه زمان شبیه‌سازی ساختارهای فوق در محیط GPU به ازای تعداد مش‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده‌شده است.

جدول ۱: زمان شبیه‌سازی در GPU برحسب ثانیه

	GPU در GTX 1080 Ti
صفحه مسطح ۱۰۰۰۰ مش	۱/۵۶
مخروط ۱۲۲۴۶ مش	۷۱۴/۶۹
دو اگیو با انحنای غیریکسان ۱۲۱۰۰ مش	۷۷۸/۰۴
موشک ساده ۶۰۲۰۰ مش	۹۰۷/۲۸

با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود منحنی سطح مقطع راداری محاسبه‌شده در متلب با دقتی نسبتاً یکسان با منحنی حاصل از شبیه‌سازی CST حاصل‌شده است. همچنین محاسبه انتگرال نورفیزیکی و آزمون برخورد بر روی GPU سبب کاهش محسوس زمان شبیه‌سازی‌شده است.

۹- جمع‌بندی

هدف این مقاله محاسبه سطح مقطع راداری اجسام الکتریکی بزرگ با استفاده از روش نورفیزیکی و به روش لودویگ بوده است. ازاین‌رو، چهار ساختار پایه در نظر گرفته‌شده و پس از مدل کردن آن‌ها با رویه‌های نربز به محاسبه سطح مقطع راداری آن در متلب پرداخته‌شده است. با توجه به اینکه تعیین ناحیه روشن، انجام آزمون برخورد و محاسبه انتگرال نورفیزیکی بر روی CPU بسیار زمانبر است، برنامه موردنظر به‌صورت موازی بر روی GPU و در متلب نوشته شده است که سبب کاهش چشم‌گیر زمان محاسبات شده است.

1-Radar Cross Section
2- Monostatic
3-Bistatic
4- Rayleigh
5- resonance
6- Optical
7- Moment Method(MOM)
8- Finite Difference Time-Domain Method
9- finite Element Method(FEM)
10- Geometric optics
11- Physical Optics
12- Uniform Theory of Diffraction
13- Physical Theory of Diffraction
14- Non-Uniform Rational B-Spline(NURBS)
15- B-Spline

منابع

[1] M. I. Skolnik, “Introduction to radar”, Radar Handbook, vol 2, 1962.

[2] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 1999.

[3] E. F. Knott, "A progression of high-frequency RCS prediction techniques," *IEEE*, vol. 73, no. 2, pp. 252-264, 1985.

[4] A. Ludwig, "Computation of radiation patterns involving numerical double integration," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 16, no. 6, pp. 767-769, 1968.

[5] N. Ploskas and N. Samaras, *GPU Programming in MATLAB*, Todd Green, 2016.