JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 16/ No. 61/ Spring 2025
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, sanad.iau.ir/journal/jipet

Doi: 10.71666/jipet.2025.998078

Research Article

# Full-Wave Investigation of Far- and Near- Fields of a Vessel and Extracting Far-Field from Near-Field Data Scattered in X Frequency Band

**Farzad Khajeh-Khalili[1,2], *Assistant Professor*, Reza Jokar[1], *M.Sc.***

[1]Electrical Engineering Department- Kian Institute of Higher Education, Isfahan, Iran
[2]Antenna Design Center- Moj Afzar Farda Company, Isfahan, Iran
khajehkhalili.edu@gmail.com, rezajokar@iran.ir

**Abstract**
In this paper, the far- and near-fields of a vessel are discussed in the full-wave CST software environment. In this regard, the far-field is extracted with the help of the data obtained from the scattered near-field. First, to explain the method used to calculate the scattered near-field, a simple structure (metal cube) is simulated. Then, by simulating the full-wave of a vessel with the dimensions of 130.8×20×23.1 $cm^3$ or 1.54×103 $\lambda^3$ at 8.5 GHz from the X-band, its far- and near-fields were calculated and reported according to the mentioned method. In the following, the far-field of this vessel is obtained with the help of the available data from the scattered near-field. The characteristic of the radar cross section (RCS) of this vessel is also calculated using the Asymptotic solver of the CST software. The maximum RCS of the vessel at 8.5 GHz is equal to 2.51 $m^2$. In order to calculate all near- and far-electric fields, the Time Domain solver has been used. The simplicity of calculating the far-field from the near-field presented in this paper makes it possible to analyze similar structures using the same method.

**Keywords**: far-field, near-field, vessel, radar cross section, X-band

**Received:** 7 September 2022
**Revised:** 14 November 2022
**Accepted:** 31 December 2022

**Corresponding Author:** Dr. Farzad Khajeh-Khalili

Citation: F. Khajeh-Khalili, R. Jokar, "Full-wave investigation of far- and near- fields of a vessel and extracting far-field from near-field data scattered in x frequency band", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 61, pp. 97-110, March 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2025.998078

مقاله پژوهشی

# بررسی تمام‌موج میدان‌های دور و نزدیک یک شناور و استخراج میدان دور از داده‌های میدان نزدیک پراکنده شده در باند فرکانسی ایکس

**فرزاد خواجه خلیلی[۱،۲]، استادیار، رضا جوکار[۱]، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد**

۱- دپارتمان مهندسی برق- موسسه آموزش عالی کیان، شاهین شهر، اصفهان، ایران
۲- مرکز طراحی آنتن- شرکت موج افزار فردا، اصفهان، ایران
khajehkhalili.edu@gmail.com, rezajokar@iran.ir

**چکیده:** در این مقاله، به تشریح میدان‌های دور و نزدیک یک شناور در محیط نرم‌افزار تمام‌موج فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری (CST) پرداخته می‌شود. در همین راستا، میدان دور به‌کمک داده‌های حاصل از میدان نزدیک پراکنده شده استخراج می‌گردد. ابتدا به‌منظور تبیین روش مورد استفاده برای محاسبه میدان نزدیک پراکنده شده، یک ساختار ساده (مکعب فلزی) شبیه‌سازی می‌شود. پس از آن، با شبیه‌سازی تمام‌موج یک شناور به ابعاد ۲۳/۱×۲۰×۱۳۰/۸ سانتی‌متر مکعب یا $1/54\times10^{3}\ \lambda^{3}$ در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز از باند ایکس (X)، میدان‌های دور و نزدیک آن با توجه به روش مذکور محاسبه و گزارش می‌شود. در ادامه، میدان دور این شناور به‌کمک داده‌های موجود از میدان نزدیک پراکنده شده، به‌دست می‌آید. مشخصه سطح مقطع راداری این شناور نیز با استفاده از حل‌کننده مجانبی نرم‌افزار CST محاسبه می‌گردد. بیشینه سطح مقطع راداری شناور در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز برابر با ۲/۵۱ متر مربع است. به‌منظور محاسبه تمامی میدان‌های الکتریکی دور و نزدیک، از حل‌کننده حوزه زمان استفاده شده است. سادگی محاسبه میدان دور از میدان نزدیک که در این مقاله ارائه شده، باعث می‌گردد که بتوان ساختارهای مشابه را نیز با استفاده از همین روش، مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

**کلمات کلیدی:** باند ایکس، سطح مقطع راداری، شناور، میدان دور، میدان نزدیک

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۴۰۱/۶/۱۶
**تاریخ بازنگری مقاله:** ۱۴۰۱/۸/۲۳
**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

**نام نویسنده‌ی مسئول:** دکتر فرزاد خواجه خلیلی
**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** اصفهان- شاهین شهر- موسسه آموزش عالی کیان- دپارتمان مهندسی برق

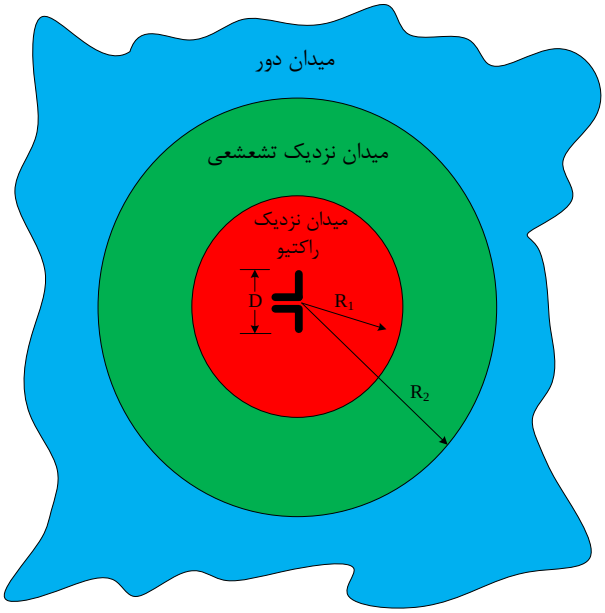
## ۱- مقدمه

در الکترومغناطیس[۱]، میدان نزدیک و دور[۲] به میدان‌های اطراف یک منبع تولیدکننده موج گفته می‌شود که نسبت به منبع از نظر فاصله، دور یا نزدیک است. معیار دوری و نزدیکی، مقایسه فاصله مذکور با طول موج[۳] است [۱]. از آن‌جا که طول موج با فرکانس رابطه عکس دارد، می‌توان گفت فاصله‌ای که برای یک فرستنده فرکانس بالا دور است، شاید برای یک فرستنده فرکانس پایین، نزدیک باشد. در سیستم‌های رادیویی، برخی از مؤلفه‌های میدان‌های الکترومغناطیس که در میدان نزدیک وجود دارند، در میدان دور قابل صرف‌نظر بوده و لذا، در محاسبات میدان دور، در نظر گرفته نمی‌شوند [۴-۲]. به‌همین علت، در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز تمام‌موج[۴] مانند فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری[۵] (CST)، برای تحلیل یک آنتن یا رادار باید تعیین گردد که مشخصه‌های مطلوب، در میدان دور مد نظر هستند یا میدان نزدیک. فضای پیرامون یک تشعشع‌کننده، به سه ناحیه میدان نزدیک راکتیو[۶]، میدان نزدیک تشعشعی[۷] و میدان دور تقسیم‌بندی می‌شود که در شکل (۱) نمایش داده است. ناحیه میدان نزدیک راکتیو عبارت است از بخشی از ناحیه میدان نزدیک که تشعشع‌کننده را احاطه کرده است. در بیشتر تشعشع‌کننده‌ها، عموماً مرز بیرونی این ناحیه در فاصله $R_1$ مطابق با رابطه (۱) از سطح تشعشع‌کننده در نظر گرفته می‌شود که $\lambda$ طول موج و D بزرگ‌ترین بُعد ساختار است. ناحیه میدان نزدیک تشعشعی عبارت است از ناحیه‌ای از میدان یک تشعشع‌کننده، بین ناحیه میدان نزدیک راکتیو و ناحیه میدان دور که در آن، میدان‌های تشعشعی حاکم بوده و توزیع میدان، به فاصله از تشعشع‌کننده وابسته است. ناحیه میدان دور، ناحیه‌ای از میدان یک تشعشع‌کننده است که در آن، توزیع میدان، ذاتاً مستقل از فاصله نسبت به ساختار است. عموماً ناحیه میدان دور در فاصله‌های بزرگ‌تر از $R_2$ مطابق رابطه (۲) نسبت به تشعشع‌کننده تعریف می‌شود. در این ناحیه، مؤلفه‌های میدان، اساساً از نوع میدان‌های عرضی[۸] بوده و توزیع میدان، مستقل از فاصله شعاعی است که در آنجا اندازه‌گیری‌ها صورت می‌پذیرد [۳]. هم‌چنین، مرز داخلی این ناحیه در فاصله شعاعی و مرز بیرونی آن در بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود [۱].

$$R_1 < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \qquad (۱)$$

$$R_2 < \frac{2D^2}{\lambda} \qquad (۲)$$

نواحی میدان نزدیک و میدان دور یک منبع که تشعشع امواج الکترومغناطیس دارد، از مهم‌ترین ابزارها در مقوله اندازه‌گیری مشخصه‌های آن است. این مفاهیم، نواحی را در اطراف منبع توصیف می‌کند که در آن‌ها، قسمت‌های مختلف میدان، کم و بیش از اهمیت برخوردار هستند.

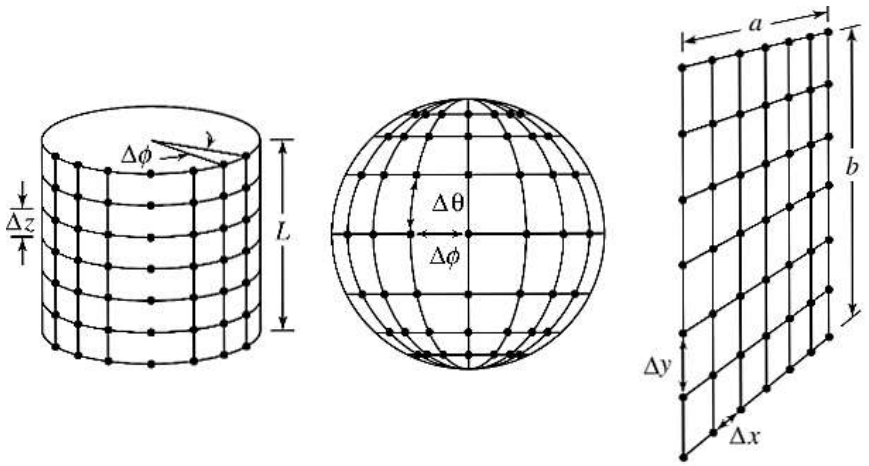



**شکل (۱): نواحی میدانی اطراف یک تشعشع کننده**

Figure (1): Field regions around a radiator

اما هدف اصلی این مقاله، آن است که پس از محاسبه میدان نزدیک به‌طور تمام‌موج، میدان دور به‌کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی میدان نزدیک محاسبه گردد. در طی سالیان اخیر، در زمینه تبدیل میدان‌های نزدیک و دور، فعالیت‌های ویژه‌ای انجام شده است [۸-۵]. روش‌های مبتنی بر جریان مغناطیسی معادل [۵]، ترفندهای مبتنی بر انواع روش‌های اسکن [۶]، به‌کارگیری جریان الکتریکی مبتنی بر روش ممان[۹] [۷] و هم‌چنین، جبران‌سازی پراب[۱۰] [۸]، از نمونه این روش‌ها هستند. اما در عمل، برای تحقق این مهم، از روش‌هایی موسوم به فرآیندهای تبدیل میدان‌های دور و نزدیک یا میدان نزدیک/ میدان دور[۱۱] (NF/FF) استفاده می‌گردد [۱]. این روش‌ها، به سیستم‌های به‌روز و گران‌قیمت، فرآیند کالیبراسیون طولانی و هم‌چنین، نرم‌افزارهای کامپیوتری پیچیده نیاز داشته و الگوهای تشعشعی نیز در همان لحظه آزمایش به‌دست نمی‌آیند. در این روش‌ها، داده‌های اندازه‌گیری شده میدان نزدیک، توسط یک پراب اسکن‌کننده میدان روی یک سطح از پیش انتخاب شده که می‌تواند یک صفحه، یک استوانه و یا یک کره باشد، اندازه‌گیری می‌شود. سپس، داده‌های اندازه‌گیری شده، با استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر معکوس تبدیل فوریه[۱۲]، به داده‌های میدان دور تبدیل می‌شوند [۹]. بدیهی است که پیچیدگی تحلیل از سطح صفحه‌ای به سطح استوانه‌ای و از سطح استوانه‌ای به سطح کروی، افزایش می‌یابد. این سطح، متناسب با تجهیز تحت آزمایش انتخاب می‌گردد. در این روش، با اعمال اصل بسط مودی[۱۳] به داده‌های میدان نمونه‌برداری شده، دامنه و فاز یک طیف زاویه‌ای امواج صفحه‌ای، استوانه‌ای یا کروی، تعیین می‌شود. نوشتن میدان کل بر حسب بسط مودی، محاسبه میزان میدان در هر فاصله‌ای از تشعشع‌کننده را میسر می‌کند. حل میدان‌ها در یک فاصله‌ی نامحدود، الگوی میدان دور را نتیجه خواهد داد.

مطابق آنچه که در مرجع [۱۰] بیان شده است، سه روش NF/FF که به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، بر مبنای سطوح اسکن میدان نزدیک صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی هستند. دست‌یابی به داده‌های میدان نزدیک صفحه‌ای بر روی یک شبکه‌ی x-y مطابق شکل (۲-الف)، با بیشینه فاصله‌ی نمونه‌برداری میدان نزدیک معادل $\Delta y=\Delta x=0/5\ \lambda$ انجام می‌گردد. در این روش، تشعشع‌کننده‌ی آزمون ثابت نگه داشته می‌شود؛ در حالی که پراب که معمولاً یک موجبر با انتهای باز یا یک آنتن شیپوری[۱۴] کوچک است، در هر نقطه از شبکه، روی صفحه حرکت داده می‌شود. با تغییر مکان، جهت آن نسبت به تشعشع‌کننده آزمون تغییر می‌کند. این روش که موسوم به روش جبران‌سازی پراب است، از تئوری مشهور هم‌پاسخی[۱۵] لورنتز[۱۶] استفاده می‌کند تا میدان‌های ناحیه دور تشعشع‌کننده آزمون، به میدان‌های ناحیه دور پراب اندازه‌گیری تزویج گردد [۸]. هم‌چنین، مطابق شکل‌های (۲-ب) و (۲-ج) می‌توان تمامی موارد فوق‌الذکر را برای سیستم‌های استوانه‌ای و کروی با اعمال تغییرات لازم به‌کار برد. در سیستم استوانه‌ای $\Delta\varphi$ و $\Delta z$ [۱۱] و در سیستم کروی $\Delta\varphi$ و $\Delta\theta$ [۱۲] باید مورد بحث قرار بگیرند. با توجه به مطالبی که ارائه گردید، روشن است که موضوع تبدیل میدان‌های دور و نزدیک، یکی از مهم‌ترین و البته چالش برانگیزترین مباحث مرتبط با تشعشع-کننده‌ها است. در این مقاله، به بررسی و شبیه‌سازی میدان‌های دور و نزدیک یک شناور با ابعاد ۲۳/۱×۲۰×۱۳۰/۸ سانتی‌متر مکعب یا $1/54\times10^{3}\ \lambda^{3}$ که $\lambda$ طول موج در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز از باند فرکانسی ایکس (X) است، پرداخته شده است.




(الف) صفحه‌ای (ب) استوانه‌ای (ج) کروی

**شکل (۲): سه سطح اسکن میدان نزدیک برای اکتساب داده‌ها [۱]**

Figure (2): Three levels of near-field scanning for data acquisition; a) Planar, b) Cylindrical, c) Spherical

به‌منظور انجام کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها، از نرم‌افزار تمام‌موج فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری مطابق شرایط راه‌اندازی تشریح شده در مرجع‌های [۱۳] الی [۱۶]، استفاده گردیده است. در ابتدا، میدان‌های نزدیک پراکنده شده شناور محاسبه و سپس، میدان‌های دور از داده‌های میدان نزدیک پراکنده شده، استخراج می‌شود. به‌منظور محاسبه میدان‌های دور و نزدیک، از حل‌کننده حوزه زمان نرم‌افزار CST استفاده شده است. شایان ذکر است که توسط حل‌کننده مجانبی[۱۷] نیز مشخصه سطح مقطع راداری[۱۸] (RCS) شناور محاسبه گردیده است. بیشینه RCS در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز برابر با ۲/۵۱ متر مربع است. در نهایت نیز به‌کمک همین روش، RCS نیز از روی داده‌های میدان الکتریکی دور محاسبه شده، استخراج می‌گردد. سادگی روش ارائه شده در این مقاله، باعث می‌شود که بتوان هر ساختار دلخواه دیگر را مورد تحلیل قرار داده و میدان‌های دور را از داده‌های مربوط به میدان نزدیک پراکنده شده، محاسبه نمود. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش دوم، به بیان ریاضی و البته کلاسیک تبدیل میدان‌های دور و نزدیک پرداخته می‌شود. در بخش سوم، شبیه‌سازی‌های تمام‌موج برای یک ساختار مکعبی‌شکل فلزی و هم-چنین، شناور مد نظر انجام می‌پذیرد. در این بخش، میدان‌های دور و نزدیک هر دو ساختار ارائه خواهد شد. در نهایت، در بخش چهارم نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

## ۲- میدان‌های دور و نزدیک و تبدیل آن‌ها

فرمول‌بندی ریاضی یک سیستم NF/FF صفحه‌ای بر پایه بسط مودی موج صفحه‌ای، بر روش‌های طیفی تبدیل فوریه استوار است [۹]. هر موج یکنواخت دلخواه را می‌توان با یک برهم‌نهی امواج صفحه‌ای رونده در جهت‌های مختلف و با دامنه‌های متفاوت، اما فرکانس‌های یکسان ایجاد نمود. هدف بسط موج صفحه‌ای، تعیین دامنه‌های مجهول و جهت‌های انتشار موج‌های صفحه‌ای است. نتیجه این امر، همان بسط مودی موج دلخواه است.

رابطه‌های بین میدان E ناحیه نزدیک و میدان‌های دور برای سیستم‌های صفحه‌ای، از روش‌های طیفی قابل اکتساب بوده و به فرم رابطه‌های (۳) الی (۶) تعریف می‌شوند. هم‌چنین $f(k_x,k_y)$ طیف موج صفحه‌ای میدان با فرض عددهای موج $k_x$ و $k_x$ است [۱].

$$\mathbf{E}(x,y,z)=\frac{1}{4\pi^2}\int\int_{-\infty}^{+\infty}\mathbf{f}(k_x,k_y)\,e^{-j\mathbf{k}.\mathbf{r}}dk_x dk_y \qquad (۳)$$

که در آن:

$$\mathbf{f}(k_x,k_y)=\hat{\mathbf{a}}_x f_x(k_x,k_y)+\hat{\mathbf{a}}_y f_y(k_x,k_y)+\hat{\mathbf{a}}_z f_z(k_x,k_y) \qquad (۴)$$

$$\mathbf{k}=\hat{\mathbf{a}}_x k_x+\hat{\mathbf{a}}_y k_y+\hat{\mathbf{a}}_z k_z \qquad (۵)$$

$$\mathbf{r}=\hat{\mathbf{a}}_x x+\hat{\mathbf{a}}_y y+\hat{\mathbf{a}}_z z \qquad (۶)$$

لذا، به‌عنوان مثال، مؤلفه‌های x و y میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده در یک صفحه (z برابر صفر)، به‌صورت رابطه‌های (۷) و (۸) تعریف خواهد شد.

$$E_{xa}(x,y,z=0)=\frac{1}{4\pi^2}\int\int_{-\infty}^{+\infty}f_x(k_x,k_y)e^{-j(k_x x+k_y y)}dk_x dk_y \qquad (۷)$$

$$E_{ya}(x,y,z=0)=\frac{1}{4\pi^2}\int\int_{-\infty}^{+\infty}f_y(k_x,k_y)e^{-j(k_x x+k_y y)}dk_x dk_y \qquad (۸)$$

مؤلفه‌های x و y طیف موج صفحه‌ای، $f_x(k_x,k_y)$ و $f_y(k_x,k_y)$، بر حسب میدان الکتریکی ناحیه نزدیک از تبدیل فوریه رابطه‌های (۷) و (۸) تعیین گردیده که در رابطه‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده‌اند.

$$f_x(k_x,k_y)=\int_{-b/2}^{+b/2}\int_{-a/2}^{+a/2}E_{xa}(x',y',z'=0)e^{+j(k_x x'+k_y y')}dx'dy' \qquad (۹)$$

$$f_y(k_x,k_y)=\int_{-b/2}^{+b/2}\int_{-a/2}^{+a/2}E_{ya}(x',y',z'=0)e^{+j(k_x x'+k_y y')}dx'dy' \qquad (۱۰)$$

هم‌چنین، الگوی میدان دور بر حسب تابع طیف موج صفحه‌ای f برابر است با:

$$E(r,\theta,\varphi) \cong j\frac{ke^{-jkr}}{2\pi r}\left[\cos(\theta)f(k_x,k_y)\right] \quad (۱۱)$$

یا:

$$E_\theta(r,\theta,\varphi) \cong j\frac{ke^{-jkr}}{2\pi r}\left[+f_x\cos(\varphi)+f_y\sin(\varphi)\right] \quad (۱۲)$$

$$E_\varphi(r,\theta,\varphi) \cong j\frac{ke^{-jkr}}{2\pi r}\left[-f_x\sin(\varphi)+f_y\cos(\varphi)\right] \quad (۱۳)$$

حال که رابطه‌های کلاسیک مرتبط با مفاهیم میدان‌های دور و نزدیک مطرح گردید، باید به بررسی تمام‌موج نیز پرداخته شود. توجه گردد که رابطه‌های (۹) الی (۱۱) در اصل، بیان کننده چگونگی تبدیل میدان‌های نزدیک به میدان‌های دور هستند. با استفاده از تبدیل فوریه می‌توان میدان‌های نزدیک را از میدان‌های دور به‌دست آورد. هم‌چنین، با استفاده از معکوس تبدیل فوریه، میدان دور از داده‌های مربوط به میدان نزدیک پراکنده شده قابل محاسبه خواهد بود. بررسی این موضوع، از اهداف اصلی این مقاله است. لذا در بخش سوم، شبیه‌سازی‌های تمام‌موج، انجام شده و نتایج هر یک به‌همراه تحلیل‌های لازم، گزارش خواهد شد.

## ۳- شبیه‌سازی‌های تمام‌موج و ارائه نتایج

در این بخش، به ارائه شبیه‌سازی‌های تمام‌موج انجام شده، پرداخته می‌شود. در ابتدا، یک مکعب مورد تحلیل قرار گرفته، میدان نزدیک آن محاسبه شده و از روی داده‌های میدان نزدیک پراکنده شده، میدان دور نظیر محاسبه می‌گردد. این موضوع، در زیربخش اول ارائه شده است. در زیربخش دوم، یک شناور مورد بررسی قرار می‌گیرد. دستورالعمل معرفی شده در بخش اول، برای این شناور مورد استفاده قرار گرفته، میدان نزدیک پراکنده شده آن محاسبه و در نتیجه، میدان دور و RCS با استفاده از میدان‌های نزدیک مذکور، حاصل می‌شود.

در روش مورد استفاده در این مقاله به‌منظور محاسبه میدان دور از داده‌های میدان نزدیک، ابتدا ساختار با این فرض که یک‌بار جنس آن هادی الکتریکی کامل[۱۹] (PEC) و یک‌بار دیگر که جنس آن خلأ است، به‌کمک حل‌کننده حوزه زمان نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌شود. شرایط برای تنظیم حل‌کننده مذکور طبق مرجع‌های [۱۳] الی [۱۶] است. برای به‌دست آوردن میدان پراکنده شده نزدیک ($E_{near}$)، باید میدان برخوردی ($E_{inc}$) از میدان کل ($E_{tot}$) کم شود. به‌عبارت دیگر باید رابطه (۱۴) محاسبه گردد.

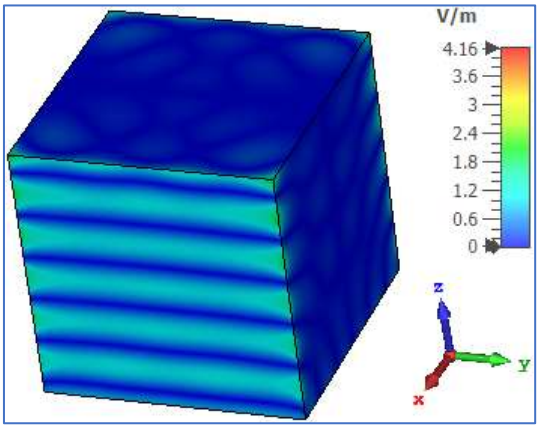
$$E_{tot} = E_{inc} - E_{near} \quad (۱۴)$$

با قرار دادن جسم به‌عنوان محیط خلأ، میدان برخوردی را می‌توان محاسبه نمود ($E_{tot}=E_{inc}$). در این حالت، کل میدان مدنظر، همان میدان برخوردی خواهد بود؛ چرا که شناور، از جنس خلأ است. لذا، در نهایت با داشتن نتایج هر دو شبیه‌سازی، می‌توان میدان نزدیک پراکنده شده را به‌دست آورد. این روند برای یک مکعب و در نهایت برای شناور پیاده‌سازی خواهد شد.

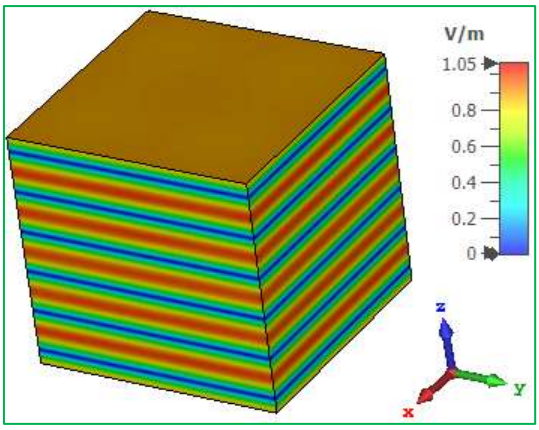
### ۳-۱- شبیه‌سازی تمام‌موج مکعب

به‌منظور اولین شبیه‌سازی، یک مکعب با طول هر ضلع برابر با ۱۰ سانتی‌متر در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا با فرض آنکه جنس مکعب PEC است، شبیه‌سازی انجام و میدان الکتریکی در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که بیشینه میدان الکتریکی برابر با ۴/۱۶ ولت بر متر است. اما به‌منظور پیاده‌سازی روش مدنظر، این مکعب با جنس خلأ نیز شبیه‌سازی شده و میدان الکتریکی آن به‌دست آمده است. این گزارش نیز در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. بیشینه میدان الکتریکی در این حالت برابر ۱/۰۵ ولت بر متر است.

در ادامه، با استفاده از رابطه (۱۴) میدان نزدیک پراکنده شده، محاسبه می‌گردد. این محاسبه در قالب پسا پردازش[۲۰] (TPP) نرم‌افزار CST صورت می‌پذیرد. نتیجه حاصل از این محاسبه، در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، بیشینه میدان الکتریکی برابر ۲/۶۸ ولت بر متر است. این نتیجه، همان میدان الکتریکی نزدیک پراکنده شده مطلوب است. در ادامه، همین مراحل برای یک شناور تکرار شده و نتایج ارائه می‌گردد. شایان ذکر است که محاسبه میدان نزدیک پراکنده شده، ابزار لازم جهت محاسبه میدان دور و RCS در این مقاله است.



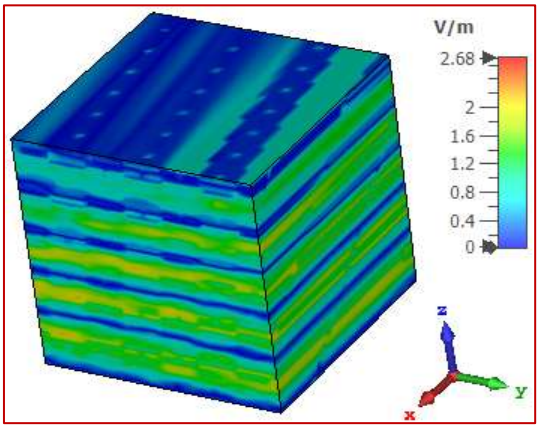

(الف) جنس هادی الکتریکی کامل




(ب) جنس خلأ

**شکل (۳): میدان الکتریکی مکعب در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز**

Figure (3): Electric field of cube at 8.5 GHz with, a) PEC, b) Vacuum

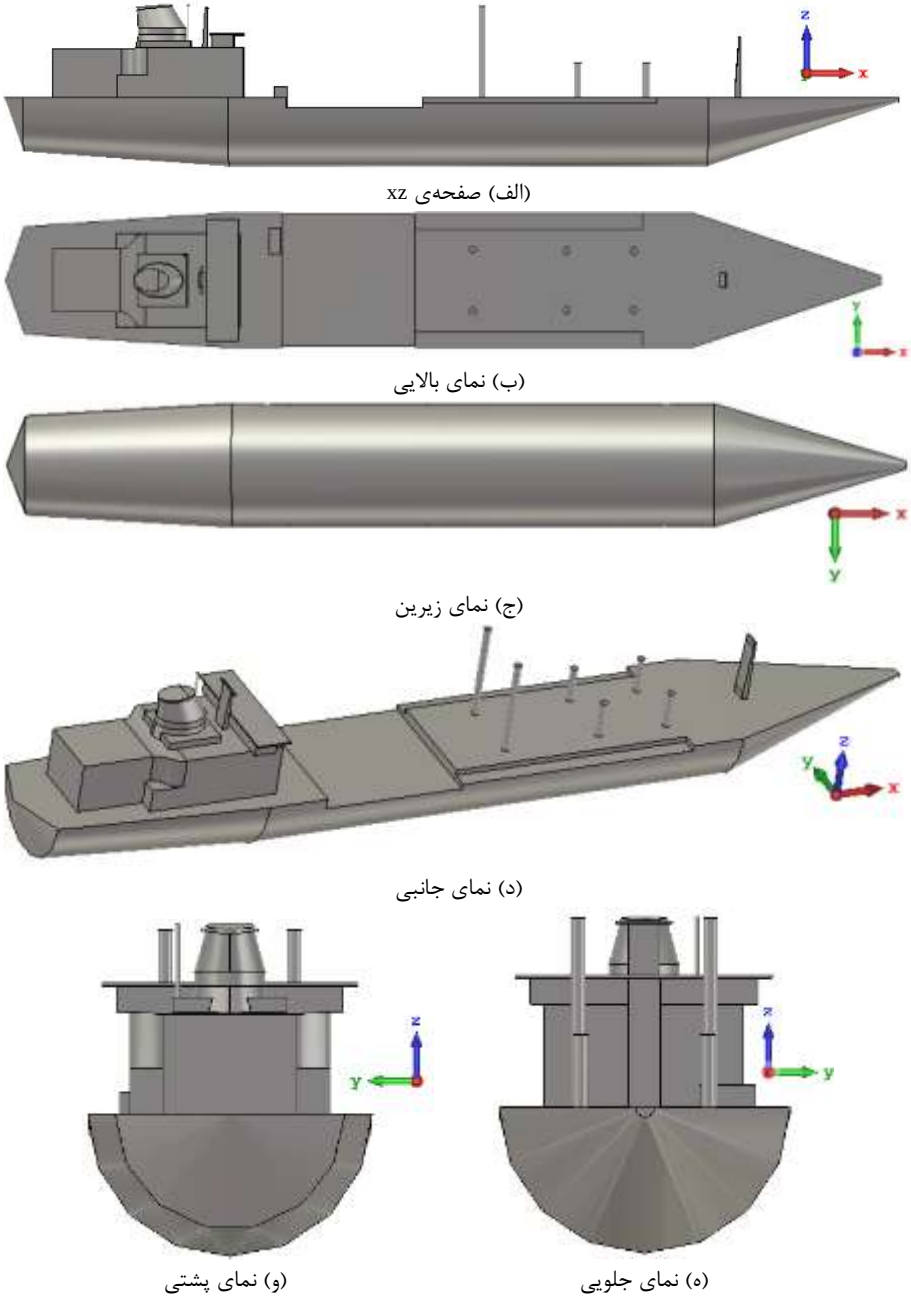



**شکل (۴): میدان نزدیک پراکنده شده مکعب در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز**

Figure (4): Scattered near-field of cube at 8.5 GHz.

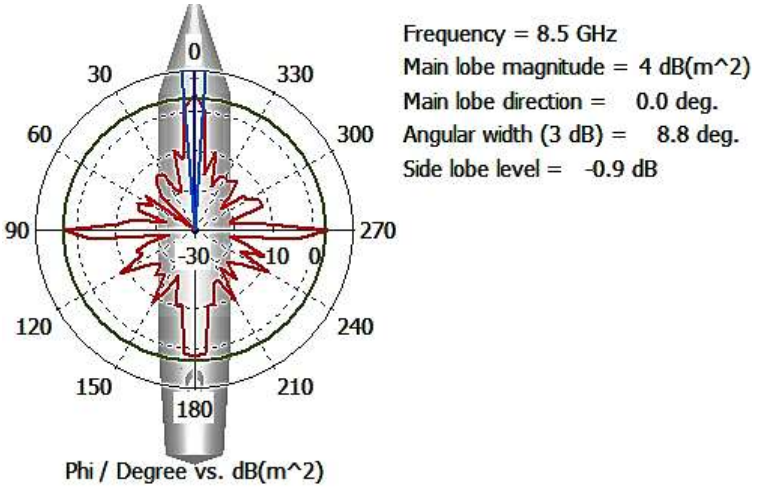
### ۳-۲- شبیه‌سازی تمام‌موج شناور

در این بخش، به شبیه‌سازی تمام‌موج شناور نمایش داده‌شده در شکل (۵) با ابعادی معادل ۱۳۰/۸×۲۰×۲۳/۱ سانتی‌متر مکعب یا $1/54\times10^{3}\lambda^{3}$ که λ طول موج در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز از باند فرکانسی ایکس است، پرداخته می شود. در ابتدا، به‌کمک حل‌کننده مجانبی، سطح مقطع راداری شناور در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز محاسبه شده و در شکل (۶) نمایش داده شده است. بیشینه سطح مقطع راداری برابر با ۴ دسیبل-متر مربع بوده که در زاویه صفر درجه رخ داده است. هر یک از مشخصه‌های پهنای بیم نیم‌توان[۲۱] (HPBW) و سطح لوب جانبی[۲۲] (SLL) این شناور نیز به‌ترتیب برابر با ۸/۸ درجه و ۰/۲- دسیبل هستند. مطابق مراحلی که در بخش سوم بیان شد، در ابتدا با فرض آن‌که جنس شناور PEC است، در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز شبیه‌سازی‌ها انجام و نتایج در شکل (۷-الف) گزارش شده است.



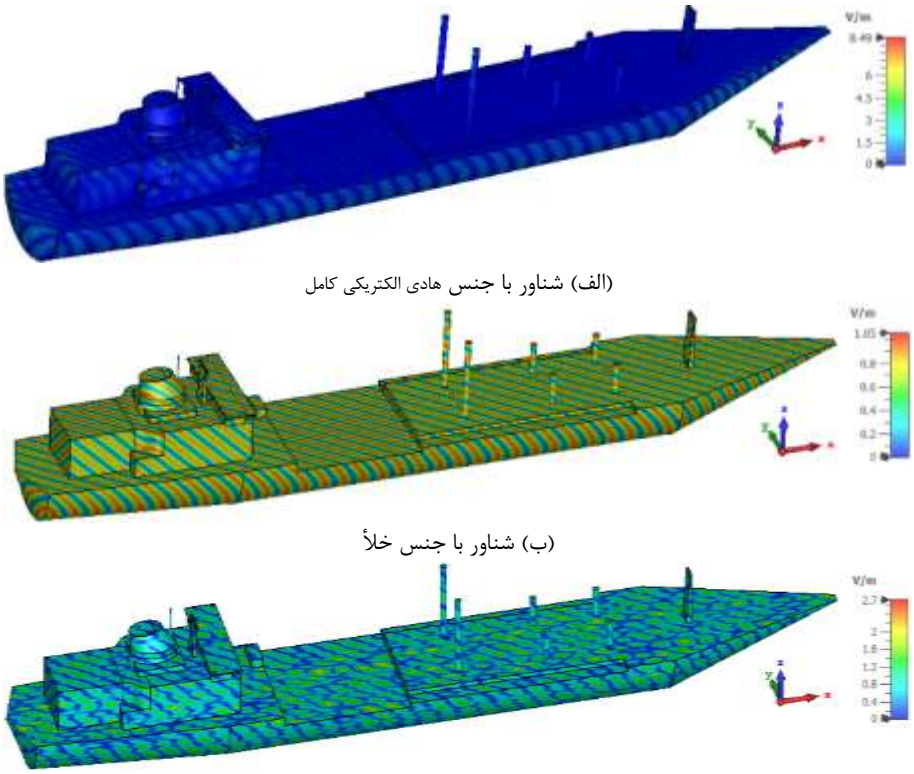

**شکل (۵): شناور مورد بررسی ترسیم شده در محیط نرم‌افزار فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری در نماهای مختلف**

Figure (5): The investigated vessel drawn in CST software in different views, a) xz plane, b) Top view, c) Bottom view, d) Side view, e) Front view, f) Back view




**شکل (۶): سطح مقطع راداری شناور مورد بررسی در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز**

Figure (6): RCS of the investigated vessel at 8.5 GHz



(الف) شناور با جنس هادی الکتریکی کامل

(ب) شناور با جنس خلأ

(ج) میدان نزدیک پراکنده‌شده حاصل

**شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی میدان نزدیک**

Figure (7): Simulation results of near-field, a) Vessel with PEC, b) Vessel with vacuum, c) Scattered near-field

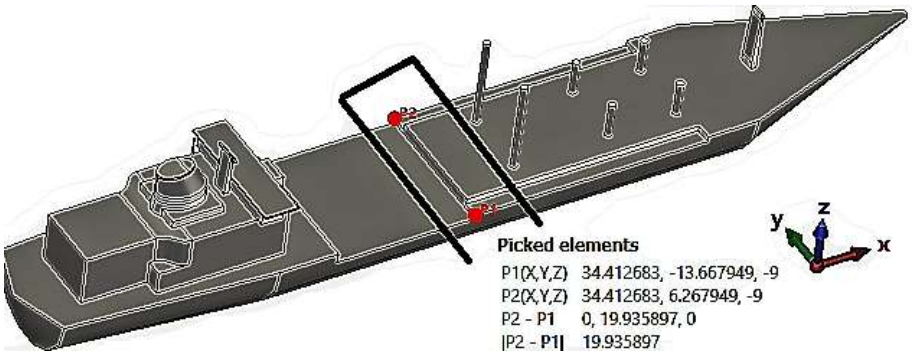
سپس، با فرض آن‌که جنس شناور خلأ است، شبیه‌سازی تکرار و نتایج در شکل (۷-ب) ارائه گردیده است. اما در ادامه، با استفاده از رابطه (۱۴)، میدان نزدیک پراکنده شده نیز محاسبه و در شکل (۸-ج) نمایش داده شده است. بیشینه میدان الکتریکی زمانی که جنس شناور PEC است برابر با ۸/۴۹ ولت بر متر است. این مشخصه، با فرض خلأ بودن جنس شناور، معادل ۱/۰۵ ولت بر متر به‌دست آمده است. هم‌چنین، بیشینه میدان نزدیک پراکنده‌شده در فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز برابر ۲/۷ ولت بر متر است. اکنون باید میدان دور به‌کمک نتایج حاصل از میدان نزدیک پراکنده شده به‌منظور تحقق روش پیشنهادی محاسبه گردد.

برای این امر، مطابق توضیحات ارائه شده در مرجع [۹]، استفاده از معکوس تبدیل فوریه، یک روش مناسب است. لذا در این مقاله نیز همین روش انتخاب شده است. اما توجه گردد که برای اعمال معکوس تبدیل فوریه، ضابطه‌ای برای هر منحنی تقریب زده شده است. بنابراین، مجموعه نقاط میدان نزدیک پراکنده شده که پیش‌تر حاصل گردیدند، در ابتدا برازش[۲۳] شده، سپس فرآیند معکوس فوریه به آن اعمال گردد. توجه شود که برازش‌های یک منحنی، روش‌های تقریبی تخمین ضابطه برای مجموعه‌ای از داده‌های گسسته هستند.

در این مقاله، به‌منظور تبیین روش مدنظر، به بررسی نقاط خاصی در اطراف شناور پرداخته شده است. این نواحی به‌سادگی قابل تغییر بوده و می‌توان به‌کمک همین روش، هر ناحیه دلخواه را مورد تحلیل قرار داد. در شکل (۸)، نواحی مدنظر نشان داده شده است. برای اعمال روش، هر دو مختصه x برابر ۳۴/۷ سانتی‌متر و z برابر ۶/۵۵ سانتی‌متر ثابت فرض شده‌اند. آن‌گاه، تأثیر تغییرات مقادیر میدان الکتریکی در راستای محور y مورد تحلیل قرار می‌گیرد (مختصه y بین ۱۳/۶- سانتی‌متر تا ۶/۲۷ سانتی‌متر). واضح است که با این فرض‌ها در دستگاه مختصات استوانه‌ای، مؤلفه θ برابر با ۱۰۰ درجه بوده و هم‌چنین، با عنایت به نقاط $P_1$ و $P_2$، تغییرات مؤلفه φ نیز در فاصله ۲۳- الی ۱۰ درجه خواهد بود. لازم به‌ذکر است که مجموعه نقاط مدنظر به‌طور گسسته، در شکل (۹) قابل مشاهده هستند. اکنون به‌کمک نرم‌افزار متلب، برازش مدنظر برای نقاط تعیین شده، انجام و با توجه به انتخاب بسط فوریه جهت برازش، ضابطه ارائه شده در رابطه (۱۵) حاصل گردیده است.

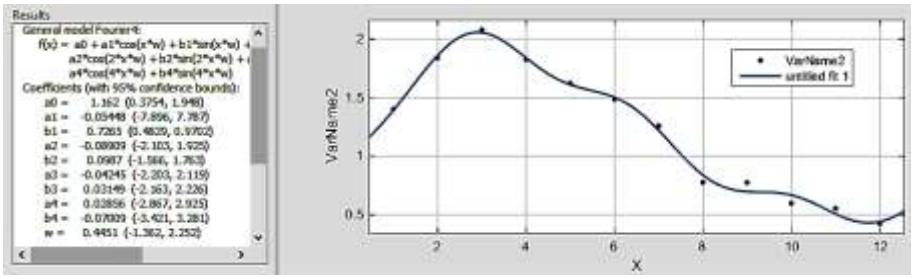
$$\begin{aligned} F_{Fitting} = {} & 1.162 - 0.05448\cos(0.4451x) + 0.7265\cos(0.4451x) - 0.08909\cos(0.4451x) - \\ & 0.0987\cos(2\times 0.4451x) - 0.04245\cos(3\times 0.4451x) + 0.03149\cos(3\times 0.4451x) + \\ & 0.02856\cos(4\times 0.4451x) - 0.07009\cos(4\times 0.4451x) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

در شکل (۹)، منحنی برازش شده به‌همراه نتایج حاصل از نرم‌افزار متلب نمایش داده شده است. مشخص است که تناسب موجود بین نقاط میدان که به‌طور گسسته از نرم‌افزار CST به‌دست آمدند و هم‌چنین نمودار برازش شده نظیر، در حد قابل قبولی است. اکنون می‌توان معکوس تبدیل فوریه را به منحنی برازش شده در محیط نرم‌افزار متلب اعمال و نتیجه را مشاهده نمود. نتیجه حاصل استفاده از معکوس تبدیل فوریه، همان میدان دور مطلوب در این مقاله است.




**شکل (۸): محدوده مورد نظر از شناور جهت اعمال روش معرفی شده**

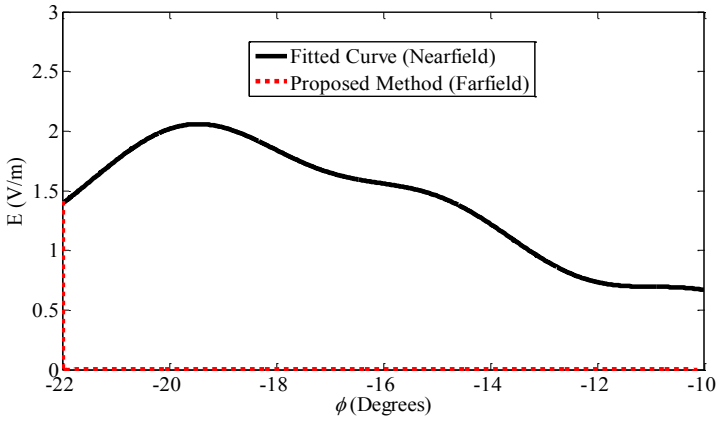
Figure (8): The target range of vessel to apply the proposed method



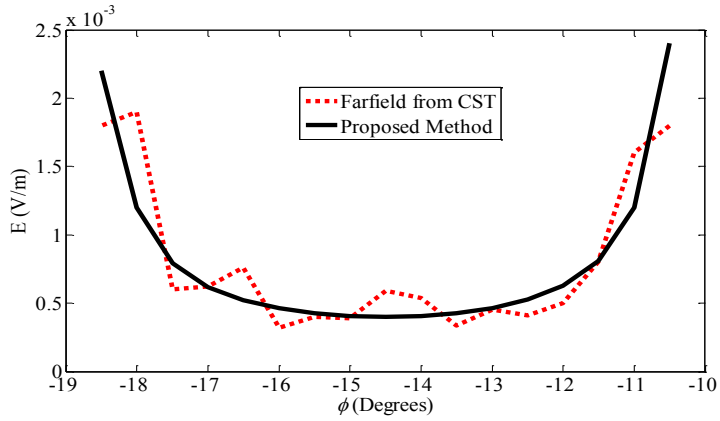

**شکل (۹): نقاط میدان و منحنی برازش شده نظیر آن‌ها در نرم‌افزار متلب**

Figure (9): Field points and fitted curves like them in MATLAB software

این نتایج در شکل (۱۰-الف) با علامت نقطه‌چین به‌همراه نتایج میدان نزدیک برازش شده با علامت خط نشان داده شده‌اند. از نظر سطوح میدان، مشخص است که مقدارهای میدان دور، دامنه کمتری نسبت به میدان نزدیک دارند. این موضوع بدیهی است. اما به‌منظور بررسی صحت روش پیشنهادی، در شکل (۱۰-ب) نتایج حاصل از این روش به‌همراه نتایج میدان دور حاصل از نرم‌افزار CST ارائه شده است. قابل ذکر است که با این امر، می‌توان مقایسه‌ای بین نتایج تمام‌موج حاصل از نرم‌افزار CST و روش معرفی شده در این مقاله انجام داد. مشاهده می‌گردد که هر دو منحنی، تناسب خوبی با یکدیگر دارند. بیش‌ترین اختلاف ایجاد شده در زاویه φ برابر ۱۸ درجه رخ داده که برابر با ۰/۰۰۰۷ ولت بر متر است. این اختلاف، عمدتاً به‌دلیل فرآیند برازش و هم‌چنین، انجام دیگر فرآیندهای شبیه‌سازی انجام شده، است. توجه گردد که میانگین خطای رخ داده از ۶ درصد تجاوز نمی‌کند. ذکر این نکته نیز ضروری است با توجه به مطالبی که در بخش (۱) به‌منظور تبیین نواحی اطراف یک تشعشع‌کننده مطرح گردید، در فاصله‌های کمتر از ۴/۹۴ متر، میدان نزدیک و در فاصله‌های بزرگتر از ۹۶/۹۳ متر، میدان دور شناور محقق می‌شود. این مقدارها، با توجه به فرکانس کار ۸/۵ گیگاهرتز و هم‌چنین، بزرگترین بُعد شناور به‌دست آمده‌اند. این مطلب، بدان جهت مطرح می‌گردد که نشان داده شود مختصه z که برابر با ۶/۵۵- سانتی‌متر به‌طور ثابت در نظر گرفته شده است، باعث گردیده که محل مشاهده میدان الکتریکی در فاصله ۲/۴۵ سانتی‌متر از شناور انجام پذیرد. چون این مقدار کمتر از ۴/۹۴ متر است، تمامی داده‌های حاصل از استخراج میدان پراکنده نزدیک، در ناحیه میدان نزدیک بوده و تحلیل‌ها، به‌درستی انجام شده‌اند. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد که بین نتایج حاصل از روش پیشنهادی مبتنی بر تبدیل فوریه و هم‌چنین، نتایج میدان دور که مستقیم از نرم‌افزار CST به‌دست آمده، تناسب خوبی برقرار است.




(الف) میدان دور حاصل از روش پیشنهادی به‌همراه میدان نزدیک برازش شده




(ب) میدان‌های دور حاصل از روش پیشنهادی و میدان‌های دور به‌دست آمده از فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری

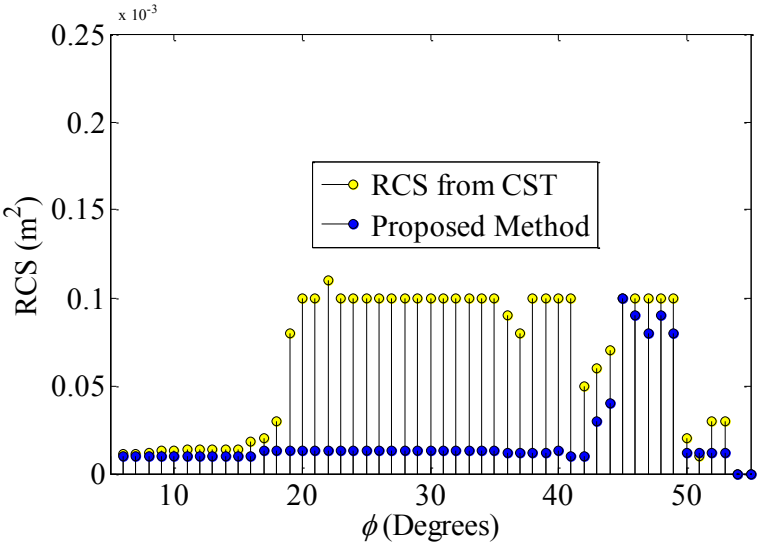
**شکل (۱۰): میدان‌های دور و نزدیک حاصل از روش‌های مختلف**

Figure (10): Far and near fields resulting from different methods, a) Far-field and fitted near-field obtained by the proposed method, b) Far-fields obtained by the proposed method and the far-fields obtained from CST

لذا، می‌توان از این روش به‌منظور تبدیل میدان‌های نزدیک پراکنده شده هر ساختار به میدان‌های دور نظیر استفاده نمود. در انتها، مشخصه سطح مقطع راداری شناور نیز به‌کمک داده‌های میدان دور به‌دست آمده، محاسبه می‌گردد. بین RCS و میدان الکتریکی دور پراکنده شده، رابطه (۱۶) برقرار است. در این رابطه، $E_{sc}$ میدان دور پراکنده شده و $E_{inc}$ میدان برخوردی هستند [۱].

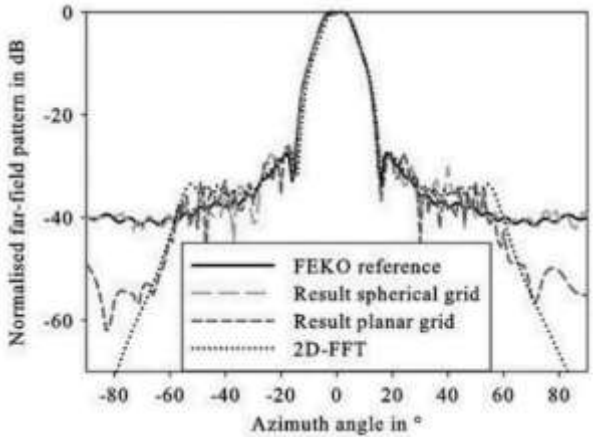
$$RCS = \lim_{r\to\infty} 4\pi r^2 \frac{|E_{sc}|^2}{|E_{inc}|^2} \tag{۱۶}$$

به‌منظور محاسبه RCS، مطابق تنظیمات نرم‌افزار CST، r برابر ۱ متر و $E_{inc}$ برابر ۱ ولت بر متر در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، به‌سادگی می‌توان سطح مقطع راداری را به‌کمک میدان‌های دور محاسبه نمود. این مهم به‌ازای زاویه‌هایی بیشتر (φ بین ۵ تا ۵۵ درجه)، تحقق یافته و در شکل (۱۱) گزارش شده است. برای انجام مقایسه، در این شکل، خروجی مستقیم میدان‌های دور نرم‌افزار CST نیز ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۱)، شرایط محاسبه RCS از داده‌های میدان دور استخراجی با روش پیشنهادی مناسب است. لازم به‌ذکر است که با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۱)، برای ۹۴ درصد نقاط انتخابی، میزان اختلاف نتایج حاصل از روش پیشنهادی و هم‌چنین، نتایج مستقیم نرم‌افزار CST برای RCS کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر مربع است. اکنون به‌منظور انجام مقایسه‌های جامع‌تر و بیان شرایط و مزیت‌های روش پیشنهادی، به بررسی نتایج به‌دست آمده در این مقاله و دیگر نتایج ارائه شده در سایر مرجع‌ها پرداخته می‌شود. با این کار می‌توان اعتبارسنجی روش پیشنهادی را نیز بررسی نمود. در همین راستا، از سه مرجع [۱۷] الی [۱۹] استفاده شده است. در مرجع [۱۷]، فرآیند تبدیل میدان‌های نزدیک به میدان‌های دور یک آنتن بازتابنده به‌کمک روش تبدیل فوریه سریع[۲۴] (FFT) انجام پذیرفته است. در این مرجع، میزان خطای حاصل بین نتایج دقیق و نتایج حاصل از تبدیل فوریه سریع قابل بررسی است. با توجه به تحلیل‌های ارائه شده در این مرجع، میانگین خطا برابر با ۱۵/۸۷ درصد است، در حالی‌که میانگین خطای رخ داده در روش پیشنهادی، کمتر از ۶ درصد است. در مرجع [۱۸]، نتایج حاصل از چهار تحلیل برای محاسبه میدان‌های دور یک آنتن یاگی-یودا[۲۵] در فرکانس ۱/۸ گیگاهرتز به‌کمک داده‌های میدان نزدیک گزارش شده است. این تحلیل در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. دو دسته جواب مرجع فکو[۲۶] (FEKO) و تبدیل فوریه سریع دوبعدی[۲۷] (2DFFT) مدنظر هستند. چرا که نتایج حاصل از نرم‌افزار FEKO حاصل از تحلیل‌های عددی مانند نرم‌افزار CST بوده و هم‌چنین، نتایج تبدیل فوریه سریع دوبعدی نیز مشابه روش پیشنهادی در این مقاله است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۲)، دقیقاً مشابه مرجع [۱۴]، محاسبه گردیده است که میانگین خطا بیش از ۱۱/۵ درصد است. این نتایج نیز نشان می‌دهد که خروجی‌های حاصل از روش پیشنهادی مورد قبول هستند.



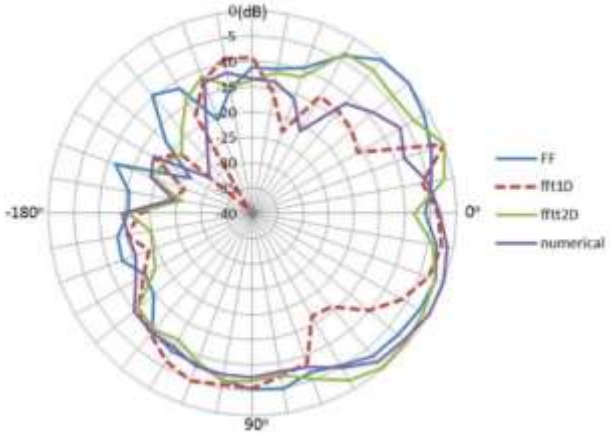

**شکل (۱۱): مشخصه سطح مقطع راداری برای دو حالت مستقیم از فناوری شبیه‌سازی کامپیوتری و بر اساس روش پیشنهادی**

Figure (11): RCS for two modes directly from CST and based on the proposed method




**شکل (۱۲): خطای محاسبه شده برای نتایج تبدیل میدان‌های دور و نزدیک در مرجع [۱۸]**

Figure (12): Calculated error for the conversion results of far- and near-fields in [18]




**شکل (۱۳): نتایج حاصل از تبدیل میدان‌های نزدیک به میدان‌های دور برای چهار حالت تبدیل فوریه سریع، تبدیل فوریه سریع تک-بعدی، تبدیل فوریه سریع دوبعدی و عددی در مرجع [۱۹]**

Figure (13): The results of converting near-fields to far-fields for four modes FF, FFT1D, FFT2D, and numerical in [19]

نهایتاً در شکل (۱۳)، نتایج میدان دور در فرکانس ۳/۳۵ گیگاهرتز برای یک آنتن صفحه‌ای که در مرجع [۱۹] معرفی شده، ارائه گردیده است. این شکل بیانگر چهار دسته جواب تبدیل فوریه گسسته[۲۸] (FF DFT)، تبدیل فوریه سریع تک‌بعدی[۲۹] (1D FFT)، تبدیل فوریه سریع دوبعدی و عددی در دستگاه مختصات قطبی است. داده‌های معرفی شده تحت عنوان numerical، حاصل از نرم‌افزار CST هستند. برای مقایسه، نتایج تبدیل فوریه سریع دوبعدی و عددی مدنظر هستند. با توجه به این نتایج، اختلاف‌های فراتر از ۱۰ دسیبل نیز مشاهده می‌گردد. لذا، کماکان روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، شرایط مناسبی نسبت به دیگر طرح‌ها و روش‌ها دارد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی میدان‌های دور و نزدیک و هم‌چنین، سطح مقطع راداری یک شناور پرداخته شد. در همین راستا، در ابتدا یک مکعب به‌منظور تبیین روش مورد استفاده، شبیه‌سازی شده و میدان نزدیک پراکنده‌شده‌ی آن محاسبه گردید. سپس، یک شناور با ابعاد ۱۳۰/۸×۲۰×۲۳/۱ سانتی‌متر مکعب در محیط نرم‌افزار CST برای فرکانس ۸/۵ گیگاهرتز از بلند ایکس شبیه‌سازی شد و میدان نزدیک پراکنده شده آن به‌دست آمد. سپس، مطابق روشی که برای شبیه‌سازی مکعب بیان گردید، میدان نزدیک پراکنده آن محاسبه و به‌کمک الگوریتم معکوس فوریه در محیط نرم‌افزار متلب میدان دور نیز تعیین گردید و با

نتایج تمام‌موج مورد مقایسه قرار گرفت. سادگی روش پیشنهادی، این روش را برای تحلیل دیگر ساختارها، به گزینه مناسبی تبدیل کرده است.

**سپاسگزاری**

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد در موسسه آموزش عالی کیان است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

## References

## مراجع

[1] A. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 1, pp. 30-45, Jan. 1986 (doi: 10.1109/TAP.1986.1143727).

[2] P. Petre, T.K. Sarkar, "Planar near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 11, pp. 1348-1356, Nov. 1992 (doi: 10.1109/8.202712).

[3] O. Orgeira, G. León, N.J.G. Fonseca, P. Mongelos, O. Quevedo-Teruel, "Near-field focusing multibeam geodesic lens antenna for stable aggregate gain in far-field", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 5, pp. 3320-3328, May 2022 (doi: 10.1109/TAP.2021.3139093).

[4] M.A. Benchana, A. Khalfallaoui, S. Taba, A. Babouri, Z. Riah, "A hybrid equivalent source-particle swarm optimization model for accurate near-field to far-field conversion", Integration, vol. 89, pp. 134-145, Mar. 2023 (doi: 10.1016/j.vlsi.2022.12.001).

[5] R.R. Alavi, R. Mirzavand, A. Kiaee, P. Mousavi, "An adaptive data acquisition technique to enhance the speed of near-field antenna measurement", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 7, pp. 5873-5883, July 2022 (doi: 10.1109/TAP.2022.3145452).

[6] Y. Su, Z.N. Chen, "A radical transformation-optics mapping for flat ultra-wide-angle dual-polarized stacked GRIN MTM Luneburg lens antenna", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 5, pp. 2961-2970, May 2019 (doi: 10.1109/TAP.2019.2900346).

[7] T.K. Sarkar, A. Taaghol, "Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 3, pp. 566-573, Mar. 1999 (doi: 10.1109/8.768793).

[8] Y. Zhang, Y. Jia, X. Liu, J. Li, "Research on near far field transform algorithm based on probe compensation", Journal of Physics, vol. 1827, pp. 1-6, Jan. 2021 (doi: 10.1088/1742-6596/1827/1/012135).

[9] B. Yan, S.A. Saoudy, B.P. Sinha, "A low cost planar near-field/far-field antenna measurement system", Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997, pp. 152-155, Digest, Montreal, QC, Canada, July 1997 (doi: 10.1109/APS.1997.630109).

[10] P.M. Morse, H. Feshbach, "Methods of theoretical physics", McGraw-Hill, New York, 1953, Chapter 13.

[11] Y. Rahmat-Samii, V. Galindo, R. Mittra, "A plane-polar approach for far-field construction from near-field measurements", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-28, no. 3, pp. 216-230, Mar. 1980 (doi: 10.1109/TAP.1980.1142316).

[12] L.I. Williams, Y. Rahmat-Samii, "Novel bi-polar planar near-field measurement scanner at UCLA", Proceeding of the IEEE/APS, pp. 1446-1449, London, Ontario, Canada, June 1991 (doi: 10.1109/APS.1-991.175122).

[13] F. Khajeh-Khalili, M.A. Honarvar, "Novel tunable peace logo planar metamaterial unit-cell for millimeter-wave applications", ETRI Journal, vol. 40, no. 3, pp. 389-395, June 2018 (doi: 10.4218/etrij.2018-0013).

[14] F. Khajeh-Khalili, M.A. Honarvar, M. Naser-Moghadasi, M. Dolatshahi, "High-gain, high-isolation, and wideband millimetre-wave closely spaced multiple-input multiple-output antenna with metamaterial wall and metamaterial superstrate for 5G applications", IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 15, no. 4, pp. 379-388, Mar. 2021 (doi: 10.1049/mia2.12055).

[15] F. Khajeh-Khalili, M.A. Honarvar, M. Naser-Moghadasi M. Dolatshahi, "Gain enhancement and mutual coupling reduction of multiple-intput multiple-output antenna for millimeter-wave applications using two types of novel metamaterial structures", International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 30, no. 1, pp. 1-9, Jan. 2020 (doi: 10.1002/mmce.22006).

[16] P. Shirvani, F. Khajeh-Khalili, M.H. Neshati, "Design investigation of a dual-band wearable antenna for tele-monitoring applications", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 138, pp. 1-8, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.aeue.2021.153840).
[17] W. Yeung, M. Narasimhan, M. Karthikeyan, "Evaluation of Fourier integrals using a FFT with improved accuracy and its applications", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 33, no. 8, pp. 924-926, Aug. 1985 (doi: 10.1109/TAP.1984.1143325).
[18] C.H. Schmidt, T.F. Eibert, "Near-field to far-field transformation utilising multilevel plane wave representation for planar and quasi-planar measurement contours", IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 4, no. 1, pp. 1829- 1836, Nov. 2010 (doi: 10.1049/iet-map.2009.0076).
[19] C. Apriono, N. Nofrizal, M.D. Firmansyah, F.Y. Zulkifli, E.T. Rahardjo, "Near-field to far-field transformation of cylindrical scanning antenna measurement using two dimension fast-Fourier transform", Proceeding of the IEEE/QiR, pp. 368-371, Nusa Dua, Bali, Indonesia, July 2017 (doi: 10.1109/QIR.2017.8168513).

## زیرنویس‌ها

1. Electromagnetics
2. Near and far fields
3. Wavelength
4. Full-wave
5. Computer simulation technology (CST)
6. Reactive near field
7. Near radiation field
8. Transverse fields
9. Method of moment (MoM)
10. Prob compensation
11. Near field/far field (NF/FF)
12. Fourier transform
13. Modal
14. Horn antenna
15. Reciprocal
16. Lorentz
17. Asymptotic
18. Radar cross section (RCS)
19. Perfect electric conductor (PEC)
20. Post processing template
21. Half power beam width (HPBW)
22. Side lobe level (SLL)
23. Fitting
24. Fast Fourier transform (FFT)
25. Yagi-Uda
26. Feldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche (FEKO)
27. Two dimension fast Fourier transform (2D FFT)
28. Fast Fourier discrete Fourier transform (FF DFT)
29. One dimension fast Fourier transform (1D FFT)