
On the Analysis of Electromagnetic Susceptibility of Superconducting Microstrip Transmission Lines in Oblique Incidence

M. H. Amini¹, A. R. Mallahzadeh^{2*}

* Electrical & Electronic Engineering department. Shahed University. Tehran. Iran

(Received: 17/05/2020; Accepted: 16/07/2020)

Abstract

Superconducting microwave circuits are composed of components made from superconducting microstrip transmission lines (SMTLs). The spatial features of the superconductors provide the system operation at high speed and low noise floor. However, coupling the external electromagnetic field in these systems reduces or nullifies their performance. In this article a general solution for evaluating the electromagnetic behavior of SMTL in different incidence angles is proposed. The analysis is portrayed in the spectral domain. Using the proposed approach, the electromagnetic susceptibility (EMS) of the line is evaluated for oblique incidence. It is investigated for different film thicknesses. The study reveals that the line's susceptibility has the highest value at 80°. But, its value varies for different thicknesses. Different behavior of the induced current for different thicknesses is due to the difference in equivalent impedance. Moreover, due to increase in the equivalent reactance, the line's susceptibility is decreased as the film thickness is decreased.

Keywords: Electromagnetic Susceptibility, Electromagnetic Superconductivity, Spectral Domain, Method of Moment.

* Corresponding author E-mail: mallahzadeh@shahed.ac.ir

تحلیل تاثیر پذیری الکترومغناطیسی خطوط ریزنوار ابررسانا در تابش مایل

محمدحسین امینی^۱، علیرضا ملاحزاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری و ۲- دانشیار، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶)

چکیده

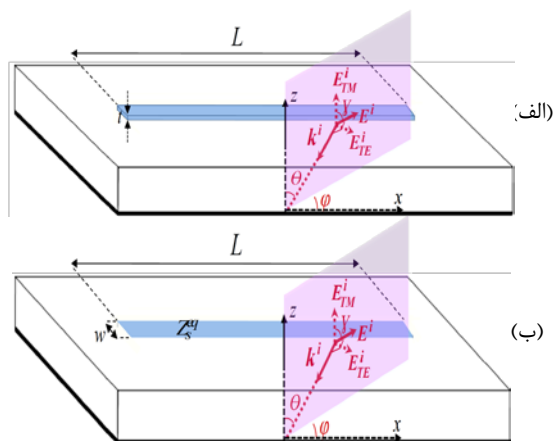
مدارهای میکروویو ابررسانا از عنصرهایی متشکل از خطوط انتقال ابررسانا ساخته می‌شوند. هر چند که ابررساناها عملکرد سامانه را در سرعت بالا و کف نویز پایین فراهم می‌کند، اما تزویج میدان الکترومغناطیسی خارجی به آن‌ها می‌تواند در عملکرد این سیستم‌ها اختلال به وجود آورد. در این مطالعه ابتدا در حوزه طیفی یک رهیافت کلی جهت تحلیل رفتار الکترومغناطیسی ساختارهای ابررسانا در زوایای تابش مختلف ارائه می‌شود. سپس به کمک روش ارائه شده، تاثیر پذیری خطوط ریزنوار ابررسانا در تابش مایل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی اثر ضخامت فیلم ابررسانا بر تاثیر پذیری خط را شامل می‌شود. مطابق با نتایج حاصل شده، بیشینه حساسیت پذیری برای تمام ضخامت‌ها با توجه به طول معمول به کار رفته در مدارات، در تابش با زاویه ۸۰ درجه اتفاق می‌افتد اما مقدار آن برای ضخامت‌های مختلف متفاوت است. رفتار متفاوت جریان القایی در ضخامت‌های مختلف به علت تفاوت در امپدانس معادل ساختار است. همچنین از آنجا که برای فیلم‌های نازک راکتانس معادل بیشتر است، میزان حساسیت پذیری کمتر می‌گردد.

کلید واژه‌ها: تاثیر پذیری، ابررسانایی، حوزه طیفی، روش ممان

سپس تاثیر پذیری این خطوط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این ارزیابی برای ضخامت‌های مختلف فیلم صورت می‌گیرد.

۱- مقدمه

حضور امواج الکترومغناطیسی به سبب وجود تجهیزات بی‌سیم می‌توانند عملکرد سیستم‌های الکترونیکی را کاهش دهد. در این راستا تحقیقات گسترده‌ای بر روی سازگاری الکترومغناطیسی^۱ سیستم‌ها با محیط پیرامون انجام گرفته است [۵-۱]. این تحقیقات در راستای کاهش تداخل الکترومغناطیسی^۲ و در نتیجه برآورده ساختن استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی انجام گرفته است. در ساختارهای ریزنوار، خطوط انتقال نقش عمده‌ای در به وجود آمدن تداخل الکترومغناطیسی و در نتیجه عملکرد نامطلوب سیستم‌ها دارند. از این رو در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی عوامل وجود آورنده و تشدید کننده این پدیده انجام گرفته است [۶-۱۰]. اهمیت پدیده مذکور در مدارهای ابررسانا، به دلیل داشتن سرعت بالا توأم با امنیت داده بیشتر می‌شود [۱۱-۱۳]. باید گفت تاکنون تاثیر پذیری الکترومغناطیسی ساختارهای ابررسانا مورد بررسی قرار نگرفته است. در مطالعه اخیر نویسندگان [۱۴]، خطوط انتقال ابررسانا در تابش عمودی مورد تحلیل قرار گرفتند. به کمک روش ارائه شده، تاثیر پذیری^۳ خطوط انتقال ابررسانا مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله رفتار الکترومغناطیسی این خطوط در تابش مایل مورد تحلیل قرار می‌گیرد. تحلیل در حوزه طیفی انجام می‌شود.



شکل (۱): (الف) نمای سه بعدی خط انتقال ریزنوار ابررسانا در برابر تابش موج، (ب) مساله معادل که در آن فیلم با صفحه امپدانس جایگزین شده است.

۲- تحلیل تاثیر پذیری الکترومغناطیسی در تابش مایل

شکل (۱) نمای سه بعدی خط ریزنوار ابررسانا که در برابر تابش موج قرار گرفته است را نشان می‌دهد. خط ریزنوار متشکل از فیلم ابررسانا به ضخامت t است که بر روی زیرلایه به ضخامت h قرار گرفته است. جهت تحلیل تاثیر پذیری الکترومغناطیسی، ساختار معادل در نظر گرفته می‌شود که در آن فیلم ابررسانا با

* نویسنده مسئول: mallahzadeh@shahed.ac.ir

¹ electromagnetic compatibility

² electromagnetic interference

³ susceptiblity

لازم به ذکر است که با توجه به شکل (۱)، x_m در رابطه (۷) به صورت زیر قابل حصول است:

$$x_m = \left((2m-1) \frac{L}{2M} - \frac{L}{2} \right) \quad (۸)$$

با توجه به رابطه (۶) با تعیین ضرایب a_m جریان قابل حصول است. از آنجا که تابش مایل مد نظر است، با توجه به رابطه (۷)، در حوزه طیفی رابطه (۶) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\tilde{J}_x(k_x, k_y) = \frac{4}{k_x k_y} \sum_{m=1}^M a_m \sin\left(\frac{k_x L}{2M}\right) \sin\left(\frac{k_y w}{2}\right) \exp(k_x x_m i) \quad (۹)$$

با در نظر گرفتن روابط (۹) در (۵)، معادله‌ای با M مجهول حاصل می گردد. با اعمال در نظر گرفتن M تابع آزمون، M معادله لازم جهت حصول ضرایب مجهول به صورت زیر به دست می آید:

$$\sum_{m=1}^M a_m \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}_m(k_x, k_y) [\tilde{G}_{xx}(k_x, k_y, h) - Z_s^{eq}] \tilde{j}_n^*(k_x) dk_x dk_y = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_x^i(k_x, k_y) \tilde{j}_n^*(k_x) dk_x dk_y \quad ; \quad n=1, 2, \dots, M \quad (۱۰)$$

با به کارگیری روش تطبیق نقطه‌ای^۳، توابع آزمون $\tilde{j}_n(k_x, k_y)$ به صورت زیر به دست می آید:

$$\tilde{j}_n(k_x) = \exp(k_x x_n i) \quad (۱۱)$$

معادلات (۱۰) می توانند به صورت فرم رایج $ZI = V$ نوشته شوند که جهت انجام محاسبات عددی مفید می باشد. در این فرم نگارش ماتریس ستونی I دربرگیرنده ضرایب a_m است و عناصر Z و V نیز به صورت زیر تعیین می گردند:

$$Z_{nm} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}_m(k_x, k_y) [\tilde{G}_{xx}(k_x, k_y, h) - Z_s^{eq}] \tilde{j}_n^*(k_x) dk_x dk_y \quad (۱۲-الف)$$

$$V_n = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_x^i(k_x, k_y) \tilde{j}_n^*(k_x, k_y) dk_x dk_y \quad (۱۲-ب)$$

با تعیین ضرایب a_m ، جریان $I(x)$ از طریق رابطه زیر قابل حصول است:

$$I(x) = \int_{-w/2}^{w/2} J_x(x, y) dy = w \sum_{m=1}^M a_m P_m(x) \quad (۱۳)$$

در بخش بعد، پذیرندگی الکترومغناطیسی خط در تابش مایل مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۳- نتایج و بحث

مطابق با تیوری مطرح شده در بخش قبل، تاثیر پذیری الکترومغناطیسی خط ریزنوار ابررسانا در تابش مایل مورد ارزیابی

یک صفحه امپدانس^۱ جایگزین شده است. مطابق با طرح ارائه شده در [۱۴]، امپدانس صفحه معادل از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z_s^{eq} = \sigma^{-1} \cdot \frac{\int_0^t |F(z)|^2 dz}{\left| \int_0^t F(z) dz \right|^2} \quad (۱)$$

که در آن، σ رسانایی فیلم و $F(z)$ توزیع جریان را در راستای ضخامت فیلم نشان می دهد. در [۱۴] نحوه حصول $F(z)$ تشریح شده است. هنگامی که این عامل حاصل شود، امپدانس معادل قابل حصول است و از آنجا اقتناع شرط مرزی قابل اجرا است.

مطابق با شکل (۱) میدان تابشی، جریان $\mathbf{J}(x, y)$ را روی خط ایجاد می کند. تشعشع جریان به وجود آمده، سبب به وجود آمدن میدان پراکنده E^s می گردد. با اقتناع شرط مرزی در $z = h$ داریم:

$$\mathbf{E}_{\tan}^s(x, y, h) + \mathbf{E}_{\tan}^i(x, y, h) = Z_s^{eq} \mathbf{J}(x, y) \quad (۲)$$

حل رابطه (۲) منجر به حصول جریان القایی می شود. برای میدان E^s به کمک تیوری گرین داریم:

$$\mathbf{E}_{\tan}^s(\mathbf{r}) = \iint_S \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') d^2 \mathbf{r}' \quad (۳)$$

\mathbf{r} بردار موقعیت در صفحه $z = h$ است. $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ نیز تابع گرین دیدادیک میدان الکتریکی است. در حوزه طیفی^۲ (۳) به صورت زیر می تواند نوشته شود:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{\tan}^s(k_x, k_y, h) = \tilde{\bar{\mathbf{G}}}(k_x, k_y, h) \cdot \tilde{\mathbf{J}}(k_x, k_y) \quad (۴)$$

از آنجا که عرض فیلم در مقایسه با طول موج کوچک است، از مولفه y در (۴) صرف نظر می گردد. لذا (۲) به صورت زیر بازنویسی می گردد:

$$\left(\tilde{G}_{xx}(k_x, k_y, h) - Z_s^{eq} \right) \tilde{J}_x(k_x, k_y) = -\tilde{E}_x^i(k_x, k_y) \quad (۵)$$

\tilde{G}_{xx} مولفه $\hat{x}\hat{x}$ از تابع گرین دیدادیک است که به کمک [۱۵] در دسترس است.

جهت محاسبه جریان از روش ممان بهره گرفته می شود. لذا با بسط $J_x(x, y)$ به صورت مجموعه‌ای از توابع پالسی داریم:

$$J_x(x, y) = \sum_{m=1}^M a_m P_m(x, y) \quad (۶)$$

که در آن:

$$P_m(x, y) = \begin{cases} 1 & |x - x_m| \leq \frac{L}{2M} \\ 0 & O.W \end{cases} \quad (۷)$$

^۳ point matching

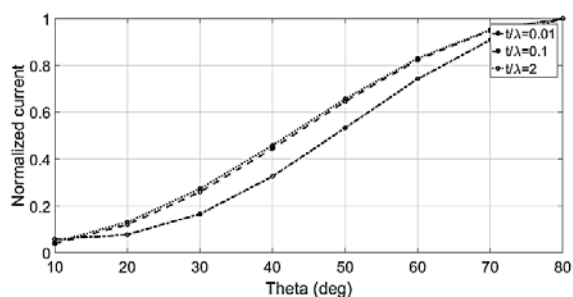
^۱ impedance sheet

^۲ spectral domain

نسبت به عمق نفوذ لاندون λ - در دمای عملکرد ۷۷ K نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد برای ضخامت‌های نازک فیلم، توزیع جریان یکنواخت است. مادامی که ضخامت فیلم افزایش یابد، چگالی جریان با نزدیک شدن به مرکز فیلم به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و مجدداً با دور شدن از مرکز فیلم و نزدیک شدن به سطح بالایی آن افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل اثر میدان‌های حاشیه‌ای^۱ است. لازم به ذکر است که برای $w/t \gg 1$ ، به دلیل کاهش اثر مذکور، چگالی جریان در راستای ضخامت روند کاهشی دارد.

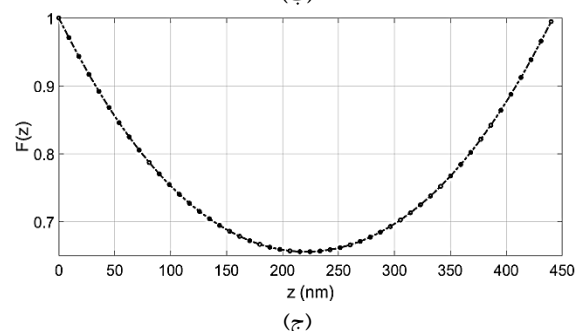
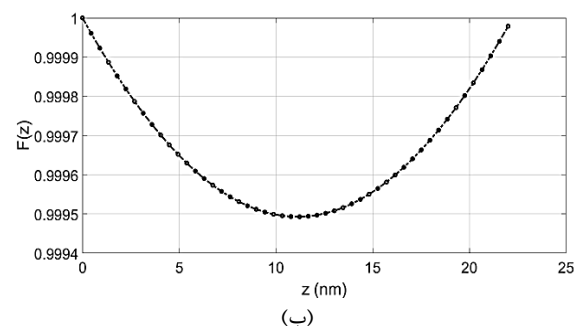
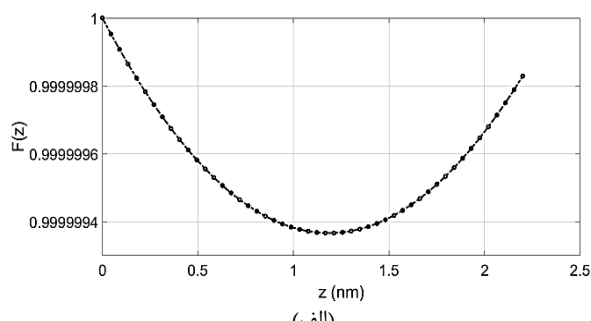
با معلوم شدن $F(z)$ صفحه امپدانس معادل به دست می‌آید و از آنجا مطابق با روند ارائه شده در بخش قبل، تاثیرپذیری الکترومغناطیسی قابل ارزیابی می‌گردد. چنانچه اشاره شد، هدف آن است که برای ضخامت‌های مختلف فیلم، در زوایای مختلف تاثیرپذیری الکترومغناطیسی محاسبه گردد. جهت این کار جریان القایی در محل بار برای مقادیر مختلف ضخامت فیلم یعنی الف) ۲، ۰/۱، ۰/۱۰، $t/\lambda = 0/10$ محاسبه شد. نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. جهت فهم بهتر، نتایج به‌هم‌نگار شده‌اند. همانطور که واضح است، بیشینه‌ی حساسیت‌پذیری برای تمام ضخامت‌ها در تابش با زاویه ۸۰ درجه اتفاق می‌افتد اما مقدار آن برای ضخامت‌های مختلف متفاوت است. لازم به ذکر است حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی بین زوایای ۸۰ تا ۹۰ درجه تغییرات چندانی ندارد. همچنین از آنجا که جریان به‌وجود آمده روی خط طبیعت موج رونده دارد و با توجه به طول کوتاه خط، بیشینه حساسیت‌پذیری در حوالی ۸۰ درجه رخ می‌دهد.

تفاوت در شیب منحنی‌ها به علت تفاوت در امپدانس معادل است. به‌عنوان ارزیابی بر میزان حساسیت‌پذیری، در جدول (۱) جریان به‌هم‌نگار شده نسبت به بیشینه جریان که برای $t/\lambda = 2$ در ۸۰ درجه اتفاق می‌افتد، برای زوایای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه آورده شده است. برای فیلم‌های نازک، راکتانس معادل بیشتر است. از این‌رو چنانچه در جدول مشاهده می‌گردد، حساسیت‌پذیری برای فیلم‌های نازک کمتر است.



شکل (۳): جریان به‌هم‌نگار شده در زوایای مایل برای سه ضخامت فیلم ابررسانا.

قرار می‌گیرد. ارزیابی در فرکانس ۱۰ GHz انجام می‌شود. در این بررسی عرض فیلم برابر $150 \mu\text{m}$ انتخاب می‌شود. طول خط نیز ۸ mm در نظر گرفته شده است. همچنین خط در دو انتها تطبیق است. جنس فیلم و زیرلایه به ترتیب $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ و LaAlO_3 در نظر گرفته شده است. فیلم مذکور، یک ابررسانای دمای بالا و دارای دمای ابررسانایی ۹۰ K است. زیرلایه ذکر شده نیز دارای ثابت دی‌الکتریک $23/6$ است. ضخامت دی‌الکتریک نیز ۱ mm در نظر گرفته شده است. موج تابشی را TM در نظر می‌گیریم که در این صورت برای زاویه پلاریزاسیون مطابق شکل (۱) داریم: $y=0$ دامنه میدان تابشی نیز واحد در نظر گرفته می‌شود. می‌خواهیم در $\theta=0$ ، برای زوایای مختلف θ تاثیرپذیری الکترومغناطیسی را مورد ارزیابی قرار دهیم.



شکل (۲): نمودار $F(z)$ برای سه ضخامت فیلم ابررسانای $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ در دمای عملکرد ۷۷K، الف) $t/\lambda = 0/10$ (ب) $t/\lambda = 0/1$ (ج) $t/\lambda = 2$.

در این تحقیق هدف آن است که برای ضخامت‌های مختلف فیلم، در زوایای مختلف تاثیرپذیری الکترومغناطیسی ارزیابی گردد. در ابتدا $F(z)$ را برای ضخامت‌های مورد نظر رسم می‌کنیم. شکل (۲) تابع مذکور را برای سه ضخامت نسبی - ضخامت فیلم

^۱ fring field

^۲ normalized

- [4] Periyasamy M. Mariappan, Dhanasekaran R. Raghavan, Shady H. E. Abdel Aleem, and A. F. Zobaa, "Effects of electromagnetic interference on the functional usage of medical equipment by 2G/3G/4G cellular phones: A review," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 5, pp. 727-738, Sep. 2016.
- [5] H. Qin, F. He, J. Meng, and Q. Wang, "Analysis and optimal design of radio-frequency interference adaptive cancellation system with delay mismatch," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 6, pp. 2015-2023, Dec. 2019.
- [6] M. Leone and H. L. Singer, "On the coupling of an external electromagnetic field to a printed circuit board trace," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 418-424, Nov. 1999.
- [7] M. Leone, "Radiated susceptibility on the printed-circuit-board level: simulation and measurement," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 3, pp. 471-478, Aug. 2005.
- [8] B. W. Wong and A. Cantoni, "Modeling and analysis of radiated emissions and signal integrity of capacitively loaded printed circuit board interconnections," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 5, pp. 1087-1096, Oct. 2012.
- [9] H. Shall, Z. Riah, and M. Kadi, "A novel approach for modeling near-field coupling with pcb traces," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 5, pp. 1194-1201, Oct. 2014.
- [10] G. P. Veropoulos, P. J. Papakanellos, and C. Vlachos, "A probabilistic approach for the susceptibility assessment of a straight pcb trace excited by random plane-wave fields," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 1, pp. 258-265, Feb. 2018.
- [11] J. S. Hong, E. P. McErlean, and B. M. Karyamapudi, "A high-temperature superconducting filter for future mobile telecommunication systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 6, pp. 1976-1981, June 2005.
- [12] M. J. Lancaster, "Passive microwave device applications of high-temperature superconductors," Cambridge University Press, 2006.
- [13] M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, "Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook," *Science*, vol. 339, p. 1169, 2013.
- [14] M. H. Amini and A. Mallahzadeh, "Analyzing radiated susceptibility of superconducting microstrip transmission line under plane wave excitation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, to be published. DOI: 10.1109/TEM.2019.2958815.
- [15] D. M. Pozar, "Radiation and scattering from a microstrip on uniaxial substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 6, pp. 613-621, Jun. 1987.

جدول (۱): مقایسه حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی برای ضخامت‌های مختلف فیلم ابررسانا.

۶۰	۴۰	۲۰	θ (درجه) t/λ
۰/۵۰	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۱
۰/۸۰	۰/۴۳	۰/۱۲	۰/۱
۰/۸۳	۰/۴۶	۰/۱۳	۲/۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی خطوط انتقال ریزنوار ابررسانا در تابش مایل مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا با استفاده از حوزه طیفی یک رهیافت کلی جهت تحلیل ارائه می‌شود. در تحلیل، فیلم ابررسانا با یک صفحه امپدانس جایگزین می‌گردد که با اعمال شرایط مرزی بر ساختار معادل و حل معادله انتگرالی حاصل، جریان القایی قابل حصول می‌گردد. سپس به کمک روش ارائه شده، تاثیرپذیری خطوط ریزنوار ابررسانا در تابش مایل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی اثر ضخامت فیلم ابررسانا بر تاثیرپذیری خط را شامل می‌شود. مطابق با نتایج حاصل شده، بیشینه حساسیت‌پذیری برای تمام ضخامت‌ها در تابش با زاویه ۸۰ درجه اتفاق می‌افتد اما مقدار آن برای ضخامت‌های مختلف متفاوت است. رفتار متفاوت جریان القایی در ضخامت‌های مختلف به علت تفاوت در امپدانس معادل است. همچنین میزان حساسیت‌پذیری برای فیلم‌های نازک کمتر است. این واقعیت به این دلیل است که برای فیلم‌های نازک، راکتانس معادل بیشتر است. در پایان باید گفت که روند ارائه شده می‌تواند به هر گونه ساختار ریزنوار ابررسانا اعمال شود و از این طریق حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی آن‌ها قابل ارزیابی می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] R. Cicchetti, O. Testa, D. Caratelli, "A numerical procedure for the analysis of EMC/EMI problems in radio communication systems operating in complex environments," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 6, pp. 1269-1280, Dec. 2012.
- [2] Y. Jiang, Y. Ding, and Y. Xie, "Development of an effective feed-forward control method for active antenna cancelation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 5, pp. 973-981, Oct. 2015.
- [3] G. Lugrin, S. V. Tkachenko, F. Rachidi, M. Rubinstein, and R. Cherkaoui, "High-frequency electromagnetic coupling to multiconductor transmission lines of finite length," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 6, pp. 1714-1723, Dec. 2015.

