

تحلیل فیلترهای موجبری شامل رزوناتورهای دی الکتریک با استفاده از روش انتگرال کانتور مالتی مد^۱

سید علی هاشمی^۱، علی بنائی^۲

۱- دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی - اصفهان - ایران

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران

چکیده

روش انتگرال کانتور (CI) برای تحلیل مدارات موجبری صفحه H- که با دی الکتریک ناهمگن پر شده‌اند، نظیر آنهایی که حاوی تیرک^۲ های دی الکتریک هستند، تعمیم داده می‌شود. بدین منظور روش انتگرال کانتور مالتی مد (MCI) که اثرمدهای مرتبه بالاتر TE_{n0} را در نظر می‌گیرد، معرفی می‌شود. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی یک روش هیبرید براساس تکنیک های MCI و تطبیق مد ارائه می‌نمائیم. دقت روش را با مقایسه‌ای که بین نتایج آن و نتایج گزارش شده در مقالات انجام می‌دهیم، ارزیابی می‌کنیم.

کلمات کلیدی

انتگرال کانتور، تیرک دی الکتریک، ناپیوستگی صفحه H-

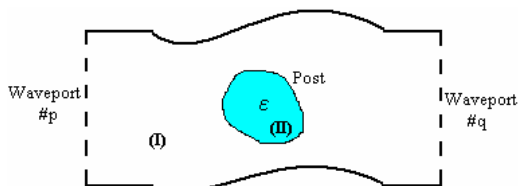
۱- مقدمه

(چند تکه) تعمیم می‌دهیم. روش CI اثر مدهای مرتبه بالاتر را که بواسطه ناپیوستگی تحریک شده‌اند، در نظر نمی‌گیرد و این یک ایراد برای آن محسوب می‌شود [۲،۴]. برای حل این مشکل، روش MCI را معرفی می‌کنیم. همچنین برای کاهش هزینه‌های محاسباتی در تحلیل مدارهای پیچیده، یک روش هیبرید کارآمد بر مبنای تکنیک‌های MCI و تطبیق مد^۴ ارائه می‌شود. این روش براساس قسمت بندی^۵ و تقسیم ساختار به بلوکهای اصلی است. ماتریس پراکندگی کلی^۶ (GSM) مدار را می‌توان با اتصال زنجیره‌ای این بلوکها به دست آورد.

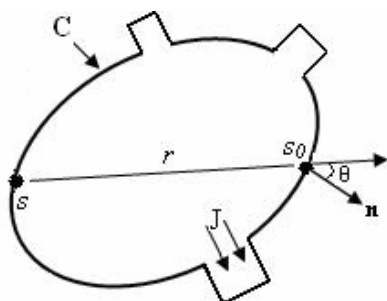
دربخشهای بعدی، ابتدا روش CI را برای مدارهای چند محیطه در بخش ۲ تشریح می‌کنیم. در بخش ۳، روش MCI معرفی می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی شده را تهیه کرده و در نهایت بخش ۵ به جمع‌بندی مطالب می‌پردازد.

روش انتگرال کانتور یکی از روشهای تحلیل مدارهای صفحه‌ای است که توسط یک محقق ژاپنی بنام Okoshi در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد [۱-۵]. این روش همچنین قادر به تحلیل هرگونه ناپیوستگی صفحه H- در موجبرهای مستطیلی است [۲،۴،۵]. در این روش اگر ناحیه مورد تحلیل همگن باشد، کفایت تنها روی مرز پیرامونی (کانتور) آن، زیردهانه‌هایی (نقاط نمونه) تعیین کرده و محاسبات را انجام داد. بنابراین می‌توان حل مسئله را با یک بعد کمتر ادامه داد و در نتیجه در مقایسه با روشهای سه بعدی مانند روش المانهای محدود، روش CI نیازمند حافظه کامپیوتری کمتری است.

در این مقاله ما روش CI را به مدارات موجبری چند محیطه^۳



شکل (۱) نمای بالای مدار موجبری صفحه-H چند محیطه

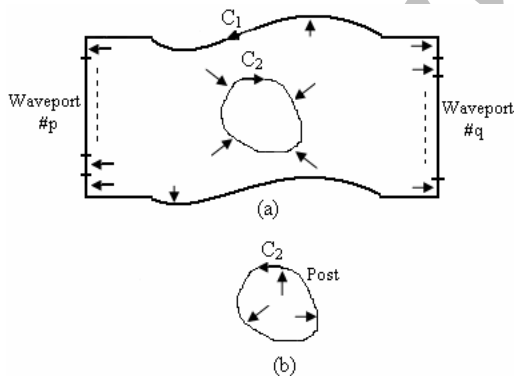


شکل (۲) نمادهای استفاده شده در معادله (۲)

علامت منفی در شرط مرزی جریان ناشی از آن است که جهت جریان خارج شونده در دو ناحیه مجاور، مخالف یکدیگر است. این نکته در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است.

هدف اصلی در روش CI، تعیین ارتباط بین ولتاژ و جریان روی دهانه‌های موجبری است. یعنی ارتباط بین (V^p) و (V^q) با (I^p) و (I^q) . بنابراین از معادله (۵) بدست می‌آوریم که:

$$(V^{Post}) = -[U_{II}]^{-1} [H_{II}] (I^{Post}) = -[Z^{Post}] (I^{Post}) \quad (7)$$



شکل (۳) جهت جریان در زيردهانه‌های روی مرز نواحی I و II

ماتریس امپدانس تیرک است. جایگذاری معادله (۷) در معادله (۴) نتیجه می‌دهد که:

$$\begin{pmatrix} (I^p) \\ (I^q) \\ (I^{Post}) \\ (I^{sc}) \end{pmatrix} = [Y_I] \begin{pmatrix} (V^p) \\ (V^q) \\ -[Z^{Post}] (I^{Post}) \\ (0) \end{pmatrix} \quad (8)$$

۲- تحلیل مسائل چند محیطه

در مدارهای چند محیطه، روش‌های مرزی نیازمند به تشکیل معادلاتی برای هر زیرناحیه همگن ساخته شده توسط یک محیط می‌باشند. هندسه کلی ساختار در شکل (۱) نشان داده شده است. نواحی I و II زیرنواحی همگن هستند. پس می‌توان معادله هلم هولتز را در هر ناحیه نوشت:

$$(\nabla_T^2 + k_i^2)V = 0 \quad ; \quad k_i^2 = \omega^2 \mu \epsilon_i \quad (1)$$

عدد موج در نواحی مختلف است.

در [۱] نشان داده شده است که با استفاده از راه حل وبر، ولتاژ در نقطه‌ای روی کانتور به صورت زیر داده می‌شود:

$$j2V(s) = \oint_C [k \cos \theta H_1^{(2)}(kr) V(s_0) - j\omega \mu b H_0^{(2)}(kr) J(s_0)] ds_0 \quad (2)$$

در این معادله $H_0^{(2)}$ و $H_1^{(2)}$ توابع هنکل مرتبه صفرم و مرتبه اول نوع دوم می‌باشند. J چگالی جریان جاری به قسمت بیرون درامتداد کانتور و b ارتفاع مدار است. متغیر r فاصله بین نقاط s_0 و s است و θ زاویه بین امتداد خط واصل نقاط s_0 و s وعمود بر کانتور در نقطه s_0 می‌باشد. این کمیات در شکل (۲) نشان داده شده است.

حل عددی معادله (۲) به معادله ماتریسی زیر منجر می‌شود:

$$[U](V) = [H](I) \quad (3)$$

که در آن بردار (I) اشاره به جریان خارج شونده از زيردهانه‌ها دارد.

بازنویسی معادله (۳) در ناحیه I می‌دهد:

$$[U_I] \begin{pmatrix} (V^p) \\ (V^q) \\ (V_I^{Post}) \\ (0) \end{pmatrix} = [H_I] \begin{pmatrix} (I^p) \\ (I^q) \\ (I_I^{Post}) \\ (I^{sc}) \end{pmatrix} ; \text{ on } C_1 + C_2 \quad (4)$$

که در آن بالانویس‌های p, q, Post ، و sc به ترتیب مشخص کننده زيردهانه‌های مستقر روی دهانه‌های موجبری $\#p$ و $\#q$ ، مرز تیرک، و بخشهای اتصال کوتاه کانتور می‌باشند.

با روشی مشابه، برای ناحیه II نیز می‌توان نوشت:

$$[U_{II}](V_{II}^{Post}) = [H_{II}](I_{II}^{Post}) ; \text{ on } C_2 \quad (5)$$

شرایط مرزی ولتاژ و جریان روی فصل مشترک دو ناحیه به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} (V_{II}^{Post}) &= (V_I^{Post}) = (V^{Post}) ; \\ (I_{II}^{Post}) &= -(I_I^{Post}) = -(I^{Post}) \end{aligned} \quad (6)$$

روش CI تک مد " تعامل مدهای مرتبه بالاتر را که بواسطه حضور ناپیوستگی تحریک شده‌اند، در نظر نمی‌گیرد [۲] لذا نمی‌توان روش CI را در تکنیک زنجیره‌سازی به کار برد. بنابراین روش انتگرال کانتور مالتی مد (MCI) را معرفی می‌کنیم [۵]. در این روش، M مد اول TE_{n0} را روی صفحه مرجع در نظر می‌گیریم. ولتاژ و جریان هر زیردهانه را می‌توان به صورت ترکیب خطی از ولتاژها و جریانهای مدهای مختلف نوشت:

$$(V^S) = \begin{pmatrix} V_1^S \\ \vdots \\ V_M^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11}V_1 + \dots + \alpha_{1M}V_M \\ \vdots \\ \alpha_{M1}V_1 + \dots + \alpha_{MM}V_M \end{pmatrix} = [a](V) \quad (13)$$

$$(I^S) = \begin{pmatrix} I_1^S \\ \vdots \\ I_M^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11}I_1 + \dots + \beta_{1M}I_M \\ \vdots \\ \beta_{M1}I_1 + \dots + \beta_{MM}I_M \end{pmatrix} = [\beta](I)$$

که در آن V_n و I_n ولتاژ و جریان مد TE_{n0} بوده $(n=1, \dots, M)$ و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V_n = \frac{1}{a/n} \int_0^{a/n} V_{pn} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) dx \quad (14)$$

$$I_n = \int_0^{a/n} J_{pn} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) dx$$

V_{pn} و J_{pn} ماکزیمم ولتاژ و ماکزیمم چگالی جریان مد TE_{n0} هستند. درایه‌های ماتریسهای ضرایب $[a]$ و $[\beta]$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha_{mn} = \frac{M}{n} \sin\left(\frac{2m-1}{2M}n\pi\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2M}\right)$$

$$\beta_{mn} = \sin\left(\frac{2m-1}{2M}n\pi\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2M}\right) \quad (15)$$

$m, n = 1, \dots, M$

روی صفحات مرجع، مدهای مرتبه بالاتر میرا شونده^۱ بوده و فقط مد غالب TE_{n0} منتشر می‌شود. پس می‌توان فرض کرد که مدهای مرتبه بالاتر به امیدانس موجبری خود ختم شده‌اند [۲]

$$Z_{n0} = \frac{V_n}{I_n} = j 120\pi \frac{b}{a/n} \frac{1}{\sqrt{(n\lambda/2a)^2 - 1}} \quad (16)$$

با فرایندی شبیه به آنچه که در روش CI تک مد استفاده می‌شود، GSM مدار بدست می‌آید که حاوی اثر مدهای مرتبه بالاتر نیز هست.

که در آن $[Y_I]$ ماتریس ادمیتانس ناحیه I است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[Y_I] = [H_I]^{-1} [U_I] \quad (9)$$

ماتریس $[Y_I]$ را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$[Y_I] = \begin{bmatrix} [Y_I^{p,p}] & [Y_I^{p,q}] & [Y_I^{p,Post}] \\ [Y_I^{q,p}] & [Y_I^{q,q}] & [Y_I^{q,Post}] \\ [Y_I^{Post,p}] & [Y_I^{Post,q}] & [Y_I^{Post,Post}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

اندازه زیر ماتریسهای $[Y_I]$ بستگی به تعداد زیردهانه‌ها روی دهانه‌های موجبری و پیرامون تیرک دی الکتریک دارد. در نهایت و با استفاده از این زیر ماتریسها، روابط نهائی ولتاژ-جریان بدست می‌آیند:

$$(I^p) = \left\{ [Y_I^{p,p}] - [C^p][A][Y_I^{Post,p}] \right\} (V^p) + \left\{ [Y_I^{p,q}] - [C^p][A][Y_I^{Post,q}] \right\} (V^q)$$

$$(I^q) = \left\{ [Y_I^{q,p}] - [C^q][A][Y_I^{Post,p}] \right\} (V^p) + \left\{ [Y_I^{q,q}] - [C^q][A][Y_I^{Post,q}] \right\} (V^q) \quad (11)$$

که در آن :

$$[C^p] = [Y_I^{p,Post}] [Z^{Post}] ; [C^q] = [Y_I^{q,Post}] [Z^{Post}]$$

$$[A] = \{ [E] + [C^{Post}] \}^{-1} \quad (12)$$

$$[E] = \text{unit matrix} ; [C^{Post}] = [Y_I^{Post,Post}] [Z^{Post}]$$

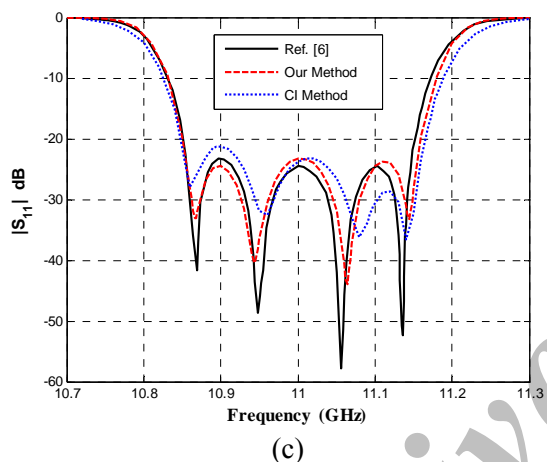
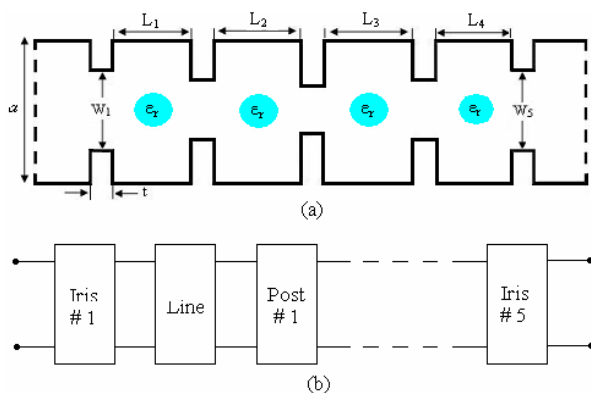
با استفاده از معادله (۱۱)، یافتن سایر مشخصات مداری نظیر ماتریس امیدانس یا ماتریس پراکندگی آسان خواهد بود.

۳- روش انتگرال کانتور مالتی مد (MCI)

کاربرد روش CI در تحلیل مدارهای موجبری بزرگ نیازمند زیردهانه‌های زیادی است. این باعث افزایش اندازه ماتریسها و در نتیجه زمان اجرای کامپیوتری می‌شود. علاوه بر این امکان وجود تکنیک‌های ماتریسها را افزایش می‌دهد.

در این موارد، معمولاً مدار را به بلوکهای سازنده پشت سرهم تقسیم کرده و هر بلوک را بطور مجزا تحلیل می‌نمائیم. GSM کل مدار با زنجیره‌سازی ماتریس پراکندگی این بلوکها بدست می‌آید. اما

قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.



شکل (۴) فیلتر میانگذر در موجبر مستطیلی WR-75 با تیرکهای دی الکتریک ($\epsilon_r=24$)

(a) شکل و ابعاد مدار (برحسب میلیمتر)

$$t=2, W_1=W_5=13.37, W_2=W_4=6.286, W_3=6.1$$

$$L_1=L_4=6.98, L_2=L_3=8.28, r_1=r_4=2.111, r_2=r_3=2.172$$

(b) بلوکهای سازنده مدار

(c) اندازه پارامتر S_{11} فیلتر

۵- جمع بندی

روش CI برای تحلیل مدارات موجبری با دی الکتریک ناهمگن تعمیم داده شد. روش انتگرال کانتور مالتی مد (MCI) که اثر مدهای مرتبه بالاتر TE_{n0} را در نظر می گیرد و همچنین یک روش هیبرید جدید، مرکب از روش MCI و تکنیک تطبیق مد، برای تحلیل مدارهای موجبری صفحه H- شامل تیرکهای دی الکتریک معرفی شد. اعتبار و دقت روش هیبرید را با مقایسه ای که بین نتایج آن و نتایج گزارش شده در مقالات انجام شد، ارزیابی کردیم.

واضح است که روش MCI نیازمند حافظه کامپیوتری زیادی برای تحلیل ساختارهای پیچیده است. برای کاهش هزینه های محاسباتی، روش MCI را با تکنیک تطبیق مد ترکیب کرده و یک روش هیبرید کارآمدتر بدست می آوریم. اصول کار بر مبنای قسمت بندی مدار به بلوکهای کلیدی سازنده می باشد. سپس بلوکهای حاوی ناپوستگیهای با اشکال نامنظم یا شرایط مرزی پیچیده را با روش MCI تحلیل کرده و سایر بلوکها را با تکنیک تطبیق مد تحلیل می نمائیم. در نهایت GSM کل مدار با زنجیره سازی این بلوکها بدست می آید.

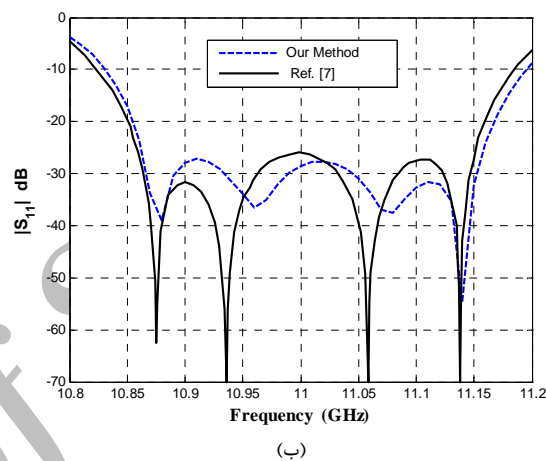
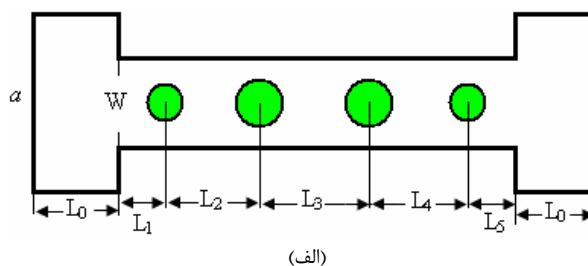
۴- نتایج شبیه سازی شده

در اولین مثال، یک فیلتر میانگذر موجبری با تزویج مستقیم بین تیرکهای دی الکتریک تحلیل شده است. ما نتایج شبیه سازی را با نتایج گزارش شده در [۶] مقایسه می کنیم. شکل (۴-ا) ساختار فیلتر مورد نظر را نشان می دهد. برای تحلیل مدار با روش CI، مرز هر تیرک را به ۱۸۰ زیردهانه تقسیم کرده و تعداد کل زیردهانه ها را ۹۴۰ انتخاب می کنیم. مدار را با نرم افزار MATLAB روی یک کامپیوتر P4 با CPU 2.4 GHz Celeron تحلیل کردیم. مدت زمان تحلیل برای هر فرکانس نمونه ۳۶ ثانیه شد. سپس همین فیلتر را با روش هیبرید مورد نظرمان تحلیل کردیم. برای اینکار ابتدا مدار را به بلوکهای سازنده، همانند شکل (۴-ب)، تقسیم می کنیم. بلوکهای حاوی تیرک دی الکتریک را با روش MCI و بلوکهای حاوی دیافراگم را با تکنیک تطبیق مد تحلیل می نمائیم. نتایج شبیه سازیها در شکل (۴-ج) ترسیم شده است. ملاحظه می شود که روش هیبرید نتایج دقیقتری ارائه می دهد. مزایای دیگر روش هیبرید در مقایسه با روش CI ناشی از کوچکتر شدن اندازه ماتریسها است. تعداد زیردهانه ها در بلوکهای حاوی تیرک که با روش MCI تحلیل می شوند ۲۲۰ می باشد. این کوچک شدن موجب استفاده کمتر از حافظه شده و سرعت محاسبات را ۵ بار بیشتر می کند. همچنین ماتریسهای با شرایط بهتری ایجاد می شوند به قسمی که عدد شرطی متقابل^{۱۱} از مرتبه 10^{-4} به مرتبه 10^{-3} بهبود می یابد. این باعث کاهش بروز تکینگی در ماتریسها می شود.

در مثال دوم، یک فیلتر میانگذر موجبری صفحه H- مد میرا^{۱۱} حاوی رزوناتورهای دی الکتریک^{۱۲} (DR) تحلیل شده است. شکل (۵-الف) ساختار مدار را نشان می دهد. ارتفاع کل مدار ۹/۵۲۵ میلیمتر و عرض موجبرهای ورودی و خروجی ۱۹/۰۵ میلیمتر می باشد (استاندارد WR-75). شبیه به مثال اول، مدار را به بلوکهای سازنده تقسیم می کنیم. بلوکهای حاوی DR با روش MCI تحلیل شده و بلوکهای حاوی پله های موجبری با تکنیک تطبیق مد تحلیل می شوند. نتایج روش ما در مقایسه با نتایج گزارش شده در مرجع [۷]، در شکل (۵-ب) ترسیم شده اند. ملاحظه می شود که تطابق

[۶] C. Bachiller, H. Esteban, V.E. Boria, J.V. Morro, L.J. Rogla, M. Taroncher, and A. Belenguer, "Efficient CAD tool of direct-coupled-cavities filters with dielectric resonators," 2005 IEEE AP-S, vol. 1B, pp. 578-581.

[۷] C. Bachiller, H. Esteban, V. E. Boria, J. V. Morro, M. Taroncher, and B. Gimeno, "CAD of evanescent mode waveguide filters with circular dielectric resonators" 2006 IEEE AP-S, pp. 1567-1570.



شکل (۵) فیلتر میانگذر موجبری نوع مد میرا شونده با رزوناتورهای دی الکتریک ($\epsilon_r=24$)

(الف) شکل و ابعاد مدار (برحسب میلیمتر)

$a=19.05$, $W=8$, $L_1=L_5=2.4179$, $L_2=L_4=10.182$, $L_3=10.9919$

شعاع رزوناتورهای دی الکتریک: $r_1=r_4=0.777$, $r_2=r_3=2.169$

(ب) اندازه پارامتر S_{11} فیلتر

۷- پی نوشتها

- ۱- Multimode Contour Integral
- ۲- Post
- ۳- Multi Media
- ۴- Mode Matching
- ۵- Segmentation
- ۶- Generalized Scattering Matrix
- ۷- Wave Ports
- ۸- Evanescent
- ۹- Iris
- ۱۰- Reciprocal Condition Number
- ۱۱- H-plane Evanescent Mode Waveguide Filter
- ۱۲- Dielectric Resonator

۶- مراجع

- [۱] T. Okoshi, Planar "Circuits for Microwaves and Lightwaves". Springer-Verlag, 1985.
- [۲] T. Okoshi, Planar "Circuits for Microwaves and Lightwaves". Springer-Verlag, 1985.
- [۳] T. Okoshi and S. Kitazawa, "Computer analysis of short boundary planar circuits" IEEE Trans. MTT-23, no. 3, March 1975.
- [۴] T. Itoh, Ed., "Numerical Techniques for Microwave and Millimeter - Wave Passive Structures". Wiley, 1989.

[۵] علی هاشمی، علی بنائی، "تعمیم روش انتگرال کانتور برای احتساب مدهای مرتبه بالاتر در تحلیل ناپیوستگیهای موجبری"، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران ICEE2007، اردیبهشت ۱۳۸۶ (در حال چاپ).