

اعمال تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی در محیط‌های همسان و ناهمسان با استفاده از گره ترکیبی در روش ماتریس خط انتقال

زهره اطلس باف^۱، کیوان فرورقی^{۲*}

۱- فارغ‌التحصیل دوره دکتری مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

keyvan_f@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۳)

چکیده - در این مقاله دو گره دوبعدی جدید - که محیط‌های همسان^۱ و ناهمسان را مدل می‌کنند - ارائه می‌شود. با استفاده از این دو گره می‌توان همزمان، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی^۲ و ضریب گذردهی الکتریکی^۳ را در محیط‌های ناهمسان، مدل کرد. از طرفی در روش ماتریس خط انتقال^۴ (TLM) دو بعدی معمولی، هنگامی که ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (یا دوگان آن ضریب گذردهی الکتریکی نسبی) کوچکتر از یک باشد، استاب مدل کننده آن دارای امپدانس (ادمیتانس) مشخصه منفی می‌شود که این موجب ناپایداری مسأله می‌شود. در حالی که با استفاده از دو گره ارائه شده، این معضل حل می‌شود. پس از بررسی مزایا و معایب گره‌های جدید - که به ترتیب گره حاوی استاب و گره ترکیبی نامیده می‌شوند - گره دو بعدی ترکیبی به عنوان گره‌ای که تغییرات همزمان ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی در محیط‌های همسان و ناهمسان را در روش TLM مدل می‌کند، معرفی می‌شود.

کلید واژگان: گره حاوی استاب، گره ترکیبی، همسان، ناهمسان، روش ماتریس خط انتقال.

۱- مقدمه

در آن زمان [۲-۴]، در این روش از مش کارتیزین، خطوط انتقال برای شبیه‌سازی انتشار دو بعدی توابع ضربه استفاده شده است. چند سال بعد، روش TLM توسط جانز و اخترزاده^۵ [۵-۸] گسترش یافت و روشهایی برای مسائل سه بعدی حاوی دی‌الکتریک و تلفات ارائه شد. سپس هافر^۶ و سایر محققان [۹-۱۲] مفاهیمی مانند گره‌های ساده، تکنیکهای تصحیح خطا، قرار دادن مرزها بر روی

در قرن هفدهم مدل موجی هویگنس برای توجیه خواص نور ارائه شد. در فرکانسهای میکروویو، در مسائل انتشار و پراکندگی، امواج الکترومغناطیسی خاصیت موجی نشان می‌دهند. بنابراین مدل ارائه شده توسط هویگنس می‌تواند پایه‌ای برای روش عمومی حل مسائل انتشار و پراکندگی امواج میکروویو باشد. بر این اساس در سال ۱۹۷۱، جانز و بارل^۷ [۱] روشی عددی را برای حل مسائل پراکندگی دو بعدی ارائه دادند. علی‌رغم روشهای شبیه‌سازی موجود

1. Isotropic
2. Permeability
3. Permittivity
4. Transmission Line Matrix Method
5. Johns & Beurle
6. Johns & Akhtarzad
7. Hofer

آنجا که کار با گره‌های دو بعدی به مراتب سریعتر از گره‌های سه بعدی است، به منظور رفع معضلات گره دو بعدی معمولی، روشهایی برای توسعه گره دو بعدی، بر اساس تغییر امیدانس مشخصه خطوط ارتباطی گره و ایجاد گره ترکیبی ارائه شده است.

در این مقاله مدلی عمومی برای پارامترهای اساسی (μ, ϵ) در روش TLM به دست می‌آید. سپس بر اساس آن، دو گره در TLM دو بعدی به نامهای گره حاوی استاب و گره ترکیبی ارائه می‌شود که مزایا و معایب این دو گره بررسی و نتایج عددی حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در نهایت گره دو بعدی ترکیبی به عنوان گره‌ای که تغییرات همزمان ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی را در محیط‌های همسان و ناهمسان در روش TLM مدل می‌کند، معرفی می‌شود.

۲- مدل عمومی پارامترهای اساسی در روش TLM

در روش عددی ماتریس خط انتقال، محیط توسط خطوط انتقال شبیه‌سازی و خطوط انتقال توسط امیدانس و ادمیتانس مشخصه خود، مشخص می‌شوند. برای به دست آوردن مدل مناسب لازم است ابتدا رابطه‌ای بین پارامترهای اساسی محیط و ادمیتانس مشخصه خطوط مدل کننده به دست آید. بنابراین در این قسمت مدلی عمومی برای ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در روش TLM ارائه می‌شود. در این مدل محیط توسط مکعب مستطیلی با ابعاد دلخواه Δx و Δy و Δz که بسیار کوچک هستند، مش بندی می‌شود و آنها حاوی موادی است با گذردهی $\bar{\epsilon}$ و نفوذپذیری مغناطیسی $\bar{\mu}$ که تنسورهای قطری هستند و محیط ناهمسان^۵ متقارن را مدل می‌کنند. با به کار بردن تعریف عمومی ظرفیت در مکعب مستطیل:

گره‌ها، مرزهای متحرک، تصحیح خطای ناشی از لبه‌ها و گوشه‌ها و محاسبه پاسخ فرکانسی، تحریک پیوسته و غیره را به آن روش افزودند.

روش TLM دو بعدی، روش مناسبی برای حل مسائل دوبعدی است، زیرا در محاسبه میدان‌های ساختارهایی با هندسه نامنظم بسیار مؤثر بوده و حجم محاسبات کمتر و زمان کوتاه‌تر می‌شود.

در روش TLM معمولی با استفاده از گره موازی می‌توان تغییرات گذردهی نسبی (ϵ_r) در محیط همسان (یعنی $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_r$) را توسط استاب گذردهی نسبی مدل کرد و باید مقدار آن بزرگتر از یک باشد تا امیدانس مشخصه استاب مربوطه منفی نشود. علاوه بر مورد ذکر شده، با استفاده از اصل دوگانی، فقط تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی را در محیط همسان می‌توان مدل کرد و در اینجا نیز مقدار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی باید بزرگتر یا مساوی یک باشد.

در سال ۱۹۸۱ [۱۳]، المختار^۱ روشی را ارائه داد که در آن ضرایب گذردهی نسبی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی توأمأ اعمال می‌شدند اما این روش فقط محیط‌های همسان را مدل می‌کرد و محیط‌های ناهمسان را نمی‌توانست مدل نماید.

مشکل دیگر در حل مسائل با روش مرسوم TLM دو بعدی، این است که محیط‌هایی با ϵ_r و μ_r کوچکتر از یک را (که معمولاً در مسائل EMC^۲ و EMI^۳ [۱۴] مورد توجه هستند) نمی‌توان با این روش بررسی کرد، زیرا ادمیتانسها یا امیدانسهای مشخصه خطوط یا استابهای مربوط به آنها منفی شده و ممکن است موجب ناپایداری مسأله بشوند.

البته مشکلات مذکور در گره‌های سه بعدی مانند گره سه بعدی متقارن^۴ (SCN) [۱۵-۱۷] حل شده است. اما از

1. Al-Mukhtar
2. Electromagnetic compatibility
3. Electromagnetic
4. Symmetrical Condense Node

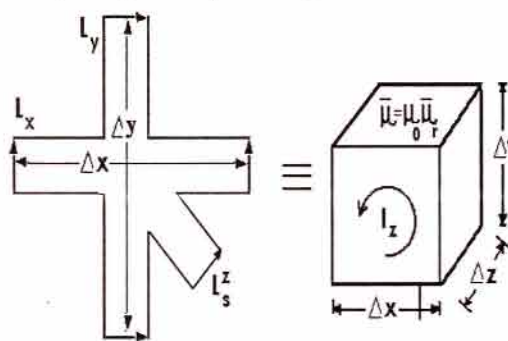
5. Constitutive Parameter
6. Anisotropic

ظرفیت استاب مدار باز (C_o^y) است؛ بنابراین:

$$C_i^y = C_x \Delta x + C_z \Delta z + C_o^y \quad (۸)$$

اندوکتانس کلی در امتداد محور Z سلول مش، در شکل ۲ نشان داده شده است. اندوکتانس مجموع در امتداد محور Z، L_i^z [۱۷]، از حاصل جمع اندوکتانس‌های گسترده در امتداد Z (L_x, L_y)، خطوط انتقالی با طولهای Δx و Δy و اندوکتانس استاب اتصال کوتاه (L_{sc}^z) به دست می‌آید:

$$L_i^z = L_x \Delta x + L_y \Delta y + L_{sc}^z \quad (۵)$$



شکل ۲ مدل کردن اندوکتانس در جهت Z

به‌همین ترتیب روابط مشابهی برای سایر جهت‌ها به دست می‌آید.

در روش حوزه زمانی TLM، باید همزمانی در مش در نظر گرفته شود یا به بیان دیگر پالسها باید به طور همزمان بعد از تأخیر زمانی یا گام زمانی Δt ، به وسط گره برسند.

شرط همزمانی در خط انتقالی در امتداد محور X با ظرفیت C_x و اندوکتانس L_x به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t = \Delta x \sqrt{C_x L_x} \quad (۶)$$

با بکار بردن رویه‌های فوق ظرفیت کلی، اندوکتانس کلی و شرط همزمانی، در سایر جهت‌ها را می‌توان به دست آورد. روابط کلی برای کلیه جهت‌ها به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$C_i \Delta i + C_j \Delta j + C_o^k = \epsilon_k \frac{\Delta i \Delta j}{\Delta k} \quad (۷-الف)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\int \epsilon E \cdot ds}{\int E \cdot dl} \quad (۱)$$

و با استفاده از تعریف عمومی اندوکتانس:

$$L = \frac{\phi}{I} = \frac{\int \mu H \cdot ds}{\oint H \cdot dl} \quad (۲)$$

ظرفیت‌های کلی و اندوکتانس‌های کلی محیط در مکعب مستطیل مفروض در سه جهت اصلی به دست می‌آیند:

$$C_i = \epsilon \Delta \quad (۳-الف)$$

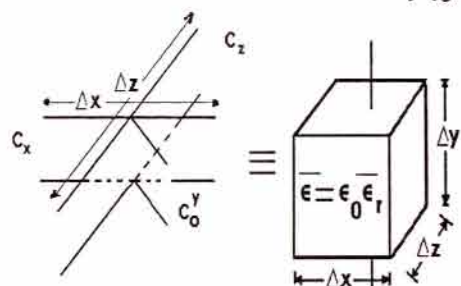
$$L_i = \mu \Delta \quad (۳-ب)$$

که بردارهای C_i و L_i و Δ عبارتند از:

$$C_i = \begin{bmatrix} C_i^x \\ C_i^y \\ C_i^z \end{bmatrix}, \quad L_i = \begin{bmatrix} L_i^x \\ L_i^y \\ L_i^z \end{bmatrix}, \quad \Delta = \begin{bmatrix} \Delta y \Delta z \\ \Delta x \Delta z \\ \Delta x \Delta y \end{bmatrix}$$

بردارهای C_i و L_i ، ظرفیت‌ها و اندوکتانس‌های کلی محیط محدود بوده و در روش TLM توسط خطوط ارتباطی و استابهای گره مدل می‌شوند. به معادلات (۳-الف) و (۳-ب) که فقط براساس پارامترهای اساسی و سلول مش به دست آمده‌اند، مدل عمومی پارامترهای اساسی گفته می‌شود.

ظرفیت کلی در امتداد محور Y سلول مش، در شکل ۱ نشان داده شده است. ظرفیت مجموع در امتداد محور Y، C_i^y [۱۷]، حاصل جمع ظرفیت‌های گسترده در امتداد محور Y



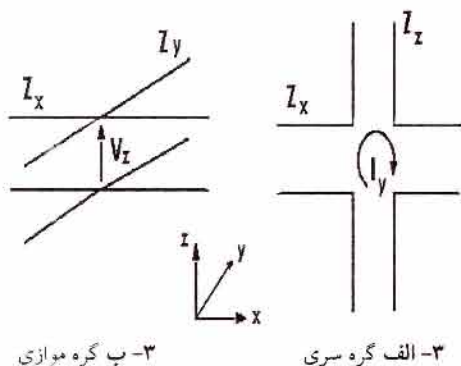
شکل ۱ مدل کردن ظرفیت در جهت Y به‌وسیله خطوط انتقال

(C_x, C_z) خطوط انتقالی بطولهای Δx و Δz و

گره موازی کندوکتانس موازی G به منظور مدلسازی هدایت الکتریکی σ_e و در گره سری R برای مدلسازی هدایت مغناطیسی σ_m به کار می رود.

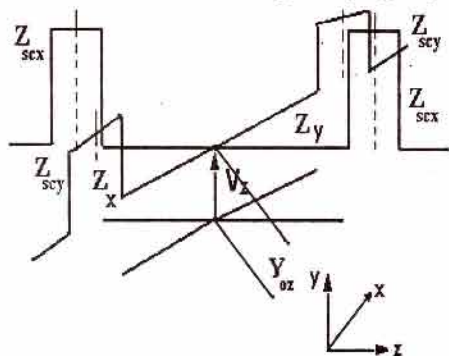
۴- گره دو بعدی در محیط ناهمسان

در مدل معمولی TLM دو بعدی گره‌ها سری و موازی هستند (شکل ۳). روابطی که در این قسمت به دست می‌آید بر اساس گره موازی TLM دو بعدی است. با توجه به دوگانی که بین گره موازی و گره سری TLM وجود دارد، تحلیل مشابهی را می‌توان برای مدل سری آن به کار برد.



شکل ۳ گره TLM دو بعدی

گره موازی شکل ۳ را در نظر بگیرید. در حالت کلی سه استاب می‌توانند به آن گره وصل شوند: یک استاب مدار باز که ظرفیت را در امتداد محور Z مدل می‌کند، در وسط گره قرار می‌گیرد و دو استاب اتصال کوتاه که اندوکتانس‌ها را در امتدادهای X, Y مدل می‌کند و بین دو گره قرار می‌گیرد (شکل ۴).



شکل ۴ مدل عمومی گره TLM دو بعدی

$$L_i \Delta i + L_j \Delta j + L_{sc}^k = \mu_k \frac{\Delta i \Delta j}{\Delta k} \quad (7-b)$$

$$\Delta t = \Delta i \sqrt{C_i L_i} \quad (7-c)$$

که در آن $i, j, k \in \{x, y, z\}$ و $i \neq j$ است.

معادلات فوق را می‌توان بر حسب امپدانس و ادمیتانس مشخصه خطوط ارتباطی و استابها به دست آورد. ادمیتانس و امپدانس در امتداد i ($i \in \{x, y, z\}$) عبارتند از:

$$Z_i = \frac{L_i \Delta i}{\Delta t} \quad (8-a)$$

$$Y_i = \frac{C_i \Delta i}{\Delta t} \quad (8-b)$$

که در روابط فوق $i \in \{x, y, z\}$ است.

زمان مؤثر برای حرکت در طول استاب $\frac{\Delta t}{2}$ است، بنابراین با توجه به معادلات (۷) و (۸) داریم:

$$Y_i + Y_j + \frac{Y_{ok}}{2} = \epsilon_k \frac{\Delta i \Delta j}{\Delta k \Delta t} \quad (9-a)$$

$$Z_i + Z_j + \frac{Z_{sc}}{2} = \mu_k \frac{\Delta i \Delta j}{\Delta k \Delta t} \quad (9-b)$$

که $i, j, k \in \{x, y, z\}$ و $i \neq j$ است.

معادلات (۹-الف) و (۹-ب) هم شرط همزمانی مدل فیزیکی را به جا می‌آورند و هم بر اساس ظرفیت‌ها و اندوکتانس‌های داده شده در معادلات (۷-الف) و (۷-ب) هستند. این معادلات مستقیماً بر حسب امپدانس مشخصه خط - که کمیت‌های مشخص کننده پراکندگی و انتشار در مش TLM هستند - عمل می‌کنند. دو دسته معادلات (۷) و (۹) هم‌ارزند و می‌توانند برای محاسبه پارامترهای TLM در حوزه زمان به کار روند.

۳- مدلسازی تلفات

در روش TLM تلفات را با قرار دادن استابهای تلفدار در نقاط پراکندگی می‌توان مدل کرد. استابهای تلفدار ممکن است طول نامحدود داشته باشند یا به بار تطبیقی، یعنی استاب منطبق مختوم باشند. استابهای منطبق برای مدل کردن تلفات الکتریکی و تلفات مغناطیسی مناسبند. در

داشته باشد و باید به گونه‌ای انتخاب شود که بزرگترین گام زمانی - به شرط مثبت بودن پارامترهای گره موازی - به دست آید. مشکل اصلی این گره، پراکندگی است که بین دو گره به علت حضور استابهای اتصال کوتاه به وجود می‌آید. اشکال دیگر، پراکندگی در صفحه واسط بین دو محیط با مواد یا مش‌بندی متفاوت است.

۴-۲- گره ترکیبی دو بعدی

با صرف‌نظر کردن از استابهای اتصال کوتاه بین دو گره موازی مدل عمومی (۱۰) به گره جدیدی می‌توان دست یافت (شکل ۵). در این گره ترکیبی از دو شرط $Z_{scx} = Z_{scy} = 0$ استفاده می‌شود. با استفاده از دو شرط جدید پاسخ معادلات (۱۰) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Y_x = \frac{Y_0}{\Delta z} \frac{c \Delta t \Delta y}{\mu_{ry} \Delta x} \quad (۱۳-الف)$$

$$Y_y = \frac{Y_0}{\Delta z} \frac{c \Delta t \Delta x}{\mu_{ry} \Delta y} \quad (۱۳-ب)$$

$$Y_{oz} = \frac{2Y_0}{\Delta z} \left[\frac{\epsilon_{rz} \Delta y \Delta x}{c \Delta t} - c \Delta t \left(\frac{\Delta y}{\mu_{ry} \Delta x} + \frac{\Delta x}{\mu_{rx} \Delta y} \right) \right] \quad (۱۳-ج)$$

باید توجه داشت که در مدل ترکیبی Δz ، هیچگونه نقشی در پراکندگی ایفا نمی‌کند، زیرا کلیه ادمیتانسها در گره را می‌توان به $\frac{Y_0}{\Delta z}$ نرمالیزه کرد.

به ازای مقدار نامنفی ادمیتانس استاب مدار باز، بزرگترین گام زمانی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_{rz}}{\frac{1}{\sqrt{(\Delta x)^2 \mu_{ry}} + \frac{1}{\sqrt{(\Delta y)^2 \mu_{rx}}}}} \quad (۱۴)$$

۵- محاسبه ماتریس پراکندگی

در TLM دو بعدی، پراکندگی در گره را بسادگی با استفاده از مدار معادل تونن^۱ می‌توان به دست آورد. برای مثال گره موازی با خطوط انتقالی با ادمیتانسهای مشخصه

معادلات به دست آمده (۹) برای گره موازی دو بعدی به صورت زیر است:

$$Y_x + Y_y + \frac{Y_{oz}}{2} = \epsilon_z \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z \Delta t} \quad (۱۰-الف)$$

$$Z_x + \frac{Z_{scy}}{2} = \mu_y \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y \Delta t} \quad (۱۰-ب)$$

$$Z_y + \frac{Z_{scx}}{2} = \mu_x \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z \Delta t} \quad (۱۰-ج)$$

از طرفی چون $Y_x = \frac{1}{Z_x}$ و $Y_y = \frac{1}{Z_y}$ مجهولات معادلات عبارتند از: Z_x و Z_y و Y_{oz} ، Z_{scy} ، Z_{scx} معادلات (۱۰) را می‌توان با دو نوع گره، گره حاوی استابها و گره ترکیبی، مدل کرد و مجهولات معادلات را در هر مدل گره به دست آورد. دو گره مذکور به طور جداگانه بررسی و مزایا و معایب آنها ذکر می‌شود.

۴-۱- گره حاوی استابها

در این نوع گره از شرط یکسان بودن امپدانس مشخصه خطوط ارتباطی گره موازی TLM [۸] استفاده می‌شود، شرط ذکر شده به صورت زیر است:

$$Z_x = Z_y = Z_0 \sqrt{2} = \sqrt{\frac{2\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (۱۱)$$

پس از قرار دادن رابطه فوق در معادلات (۱۰)، پارامترهای استابها به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Y_{oz} = 2Y_0 \left(\frac{\epsilon_{rz} \Delta y \Delta x}{c \Delta t \Delta z} - \sqrt{2} \right) \quad (۱۲-الف)$$

$$Z_{scy} = 2Z_0 \left(\frac{\mu_{ry} \Delta z \Delta x}{c \Delta t \Delta y} - \sqrt{2} \right) \quad (۱۲-ب)$$

$$Z_{scx} = 2Z_0 \left(\frac{\mu_{rx} \Delta y \Delta z}{c \Delta t \Delta x} - \sqrt{2} \right) \quad (۱۲-ج)$$

در روابط فوق c سرعت نور در فضای آزاد است و بزرگترین گام زمانی با در نظر گرفتن مثبت بودن ادمیتانس و امپدانس مشخصه‌های فوق، محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که در روابط مذکور، بعد سوم فضای محدود به سلول مکعبی (در اینجا Δz)، در به دست آوردن پارامترهای فوق دخالت دارد. Δz می‌تواند هر مقداری

1. Thevenin Equivalent

$$S = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} A & e & f & e & g \\ f & B & f & e & g \\ f & e & A & e & g \\ f & e & f & B & g \\ f & e & f & e & C \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در رابطه فوق داریم:

$$e = 2Y_x \quad f = 2Y_y \quad g = 2Y_{oz}$$

$$D = 1/[2Y_x + 2Y_y + Y_{oz} + G_{oz}]$$

$$A = -[2Y_x + Y_{oz} + G_{oz}]$$

$$B = -[2Y_y + Y_{oz} + G_{oz}]$$

$$C = -[2Y_x + 2Y_y - Y_{oz} + G_{oz}]$$

مؤلفه E_z میدان الکتریکی بر حسب V_z از رابطه

زیر به دست می آید:

$$E_z = -\frac{V_z}{\Delta z} \quad (17)$$

پراکندگی دیگری که در این نوع گره به وجود می آید، هنگامی است که امپدانس خطوط دو گره مجاور تغییر کنید. در این حالت پراکندگی به صورت ساده انعکاس و عبور پالس بین دو خط است. اگر امپدانس مشخصه خطی که پالس در آن منتشر می شود برابر Z_i باشد و به خطی با امپدانس مشخصه Z_j برخورد کنید، ضریب انعکاسی در محل اتصال دو خط، عبارتست از:

$$\rho_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_j + Z_i} \quad (18)$$

و ضریب عبور مربوط به آن به صورت زیر است:

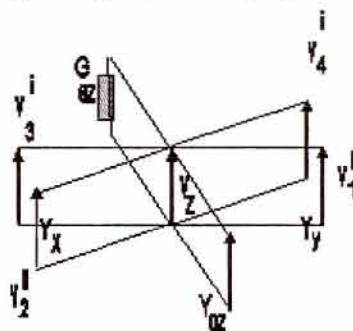
$$T_{ij} = 1 - \rho_{ij} \quad (19)$$

در حالت کلی دو پالس وجود دارد، یکی در خط i و دیگری در خط j و ماتریس پراکندگی زیر در محل اتصال حاصل می شود:

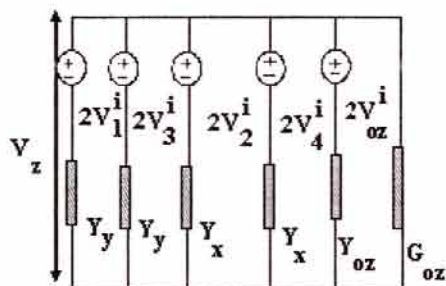
$$\begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix}^r = \begin{bmatrix} \rho_{ij} & T_{ij} \\ T_{ij} & -\rho_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix}^i \quad (20)$$

در این حالت نیز مرزها را در وسط گره ها قرار می دهند تا شرط همزمانی برقرار شود.

متفاوت و استاب مدار باز با ادمیتانس مشخصه Y_{oz} و استاب منطبق تلف الکتریکی را - که توسط کندوکنانس موازی G_{oz} مدل می شود - در نظر بگیرید (شکل ۵).



۵- الف گره موازی TLM دو بعدی



۶- ب مدار معادل تونن

شکل ۵ گره ترکیبی TLM دو بعدی

به علت اتصال فیزیکی خطوط انتقال، ولتاژ کل v در هر خط انتقال در وسط گره، برابر با v_z است. از طرفی ولتاژ کلی در خط، مجموع ولتاژ برخوردی و انعکاسی است، $v^r = v_z - v^i$ ، لذا ولتاژ کل به صورت زیر است:

$$v_z = 2 \frac{Y_x v_2^i + Y_x v_4^i + Y_y v_3^i + Y_y v_1^i + Y_{oz} v_{oz}^i}{2Y_x + 2Y_y + Y_{oz} + G_{oz}} \quad (15)$$

با استفاده از معادله $v^r = v_z - v^i$ و رابطه فوق، ولتاژهای انعکاسی در خطوط را می توان به دست آورد. ماتریس پراکندگی این نوع گره به صورت زیر است:

۶- نتایج

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از به کارگیری گره‌های TLM دوبعدی ارائه شده در این مقاله، کاوتی (Cavity) به مساحت $1m^2$ - که توسط مشی با 10×10 گره مشخص شده - در نظر گرفته شده است. ماده پرکننده محیط، گذردهی نسبی برابر با یک و ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی برابر با یک دارد. در این حالت سه فرکانس قطع اول موجبر برای دو مدل گره ارائه شده در این مقاله به دست آمده و با مقادیر تحلیلی مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده درجه صحت خوبی دارد.

با توجه به نتایج جدول می‌توان به این نکته پی برد که دو گره جدید درجه صحت خوبی دارند و فرکانسهای تشدید به دست آمده از مش با گره ترکیبی، دقت بیشتری نسبت به نتایج حاصل از مش با گره حاوی استاب دارند. به طور کلی گره ترکیبی در TLM دو بعدی، مزایای سادگی و دقت بالاتر نسبت به گره دو بعدی حاوی استاب دارد و با اعمال تغییراتی جزئی در برنامه TLM دو بعدی عمومی برنامه آن را می‌توان به دست آورد.

نتایج دیگر، سه فرکانس قطع اول مودهای TM و TE در موجبر مستطیلی WR(28) است. با فرض اینکه موجبر از هادی کامل ساخته شده و از ماده‌ای با ضریب گذردهی الکتریکی نسبی $4/5$ پر شده باشد، سطح مقطع موجبر را توسط 20×10 سلول، مش‌بندی و سه فرکانس

قطع اول مودهای TE و TM را به دست آورده‌ایم. در جدولهای ۲ و ۳ نتایج درج شده و با مقادیر حل تحلیلی و مقادیر به دست آمده از روش TLM دو بعدی مرسوم، مقایسه و مقدار خطای آنها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج از دقت خوبی برخوردار است.

هایبرید کوپلر شاخه‌ای (BLC) شکل ۶ که بر روی میکروستریبی با مشخصات $\epsilon_r = 6/6$ و $0/05 \text{ s/m}$ است، توسط دو روش TLM دو بعدی قدیمی و جدید با اعمال تحریک گوسین با میانگین $16 \Delta t$ و انحراف معیار $4 \Delta t$ ، تحلیل و مقادیر دامنه و فاز پارامترهای S_{11} و S_{12} دو روش در شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه شده است. از بررسی نتایج می‌توان دریافت که روش جدید دقت خوبی دارد.

اتصال T شکل ۹ را که با استفاده از موجبر WR(28) ساخته شده در نظر بگیرید. این ساختمان توسط دو روش TLM دو بعدی قدیمی و جدید با اعمال تحریک سینوسی با فرکانس $30GHz$ ، تحلیل و مقادیر دامنه و فاز پارامترهای S_{11} و S_{12} دو روش در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه شده است. از بررسی نتایج می‌توان دریافت که روش جدید دقت خوبی دارد.

جدول ۱ بررسی نتایج حاصل از بکار بردن دو گره پیشنهادی برای فرکانس تشدید

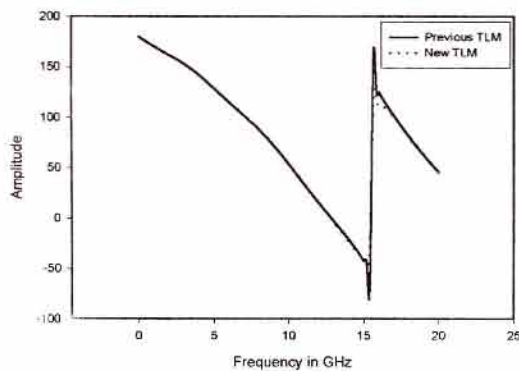
	تعداد گامهای زمانی	TE_{10} (MHz)		TE_{20} (MHz)		TE_{30} (MHz)	
		با استاب	ترکیبی	با استاب	ترکیبی	با استاب	ترکیبی
حل تحلیلی	-	۱۵۰		۳۰۰		۴۵۰	
$\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$	۱۰۰۰	۱۴۹/۹۲		۲۹۹/۸۵		۴۴۹/۴۵	
$\epsilon_r = .5, \mu_r = .5$	۲۰۰۰	۱۵۰/۳۱	۱۵۰/۱	۳۰۱/۳	۳۰۰/۲	۴۵۱/۵	۴۵۰/۳
$\epsilon_r = .1, \mu_r = .1$	۱۰۰۰۰	۱۵۱/۵	۱۵۰/۱۱	۳۰۱/۳	۳۰۰/۲۳	۴۶۰/۶	۴۵۱
$\epsilon_r = .05, \mu_r = .05$	۲۰۰۰۰	۱۵۱/۵	۱۵۰/۱۳	۳۰۱/۳	۳۰۰/۲۳	۴۶۲	۴۵۲

جدول ۲ مقایسه نتایج مود TM گره دو بعدی جدید و قدیمی

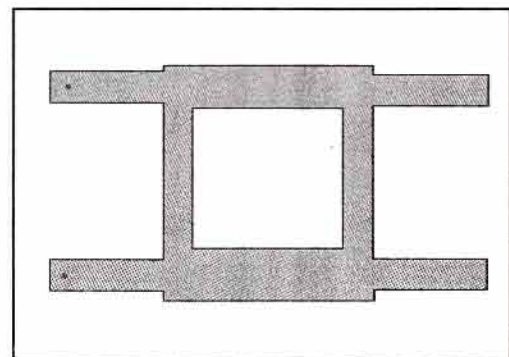
	حل تحلیلی	روش قدیمی	روش جدید	خطای روش قدیمی	خطای روش جدید
Modes	f_c / GHz	f_c / GHz	f_c / GHz	برحسب درصد	برحسب درصد
$TM_{10} (\text{MHz})$	۲۲/۲۱۶۶	۲۲/۲	۲۲/۲۲	-۰/۰۷۵	۰/۰۰۱۵
$TM_{20} (\text{MHz})$	۲۸/۱۰۱۸	۲۸/۰	۲۸/۱۱	-۰/۳۶	۰/۰۲۹
$TM_{30} (\text{MHz})$	۳۵/۸۲۳۲	۳۵/۷	۳۵/۸۲	-۰/۳۴	-۰/۰۰۹

جدول ۳ مقایسه نتایج مود TE گره دو بعدی جدید و قدیمی

	حل تحلیلی	روش قدیمی	روش جدید	خطای روش قدیمی	خطای روش جدید
Modes	f_c / GHz	f_c / GHz	f_c / GHz	برحسب درصد	برحسب درصد
$TE_{10} (\text{MHz})$	۹/۹۳۵۶	۹/۹۳	۹/۹۳۶	-۰/۰۵۶	۰/۰۰۴
$TE_{20} (\text{MHz})$	۱۹/۸۷۱۲	۱۹/۸۸	۱۹/۸۸	۰/۰۴۴	-۰/۰۰۶
$TE_{30} (\text{MHz})$	۲۲/۲۱۶۶	۲۲/۲۰	۲۲/۲۰	-۰/۰۷۵	-۰/۰۰۳

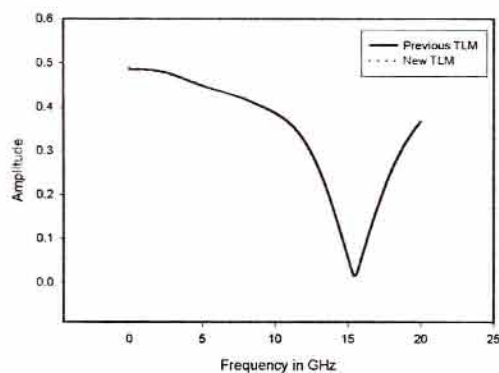


شکل ۷- ب مقایسه فازهای پارامتر S_{11} حاصل از دو روش

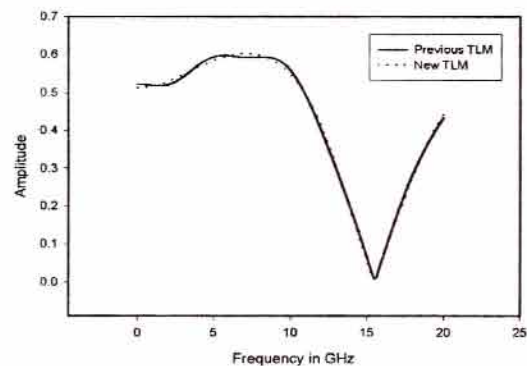


شکل ۶ هابیرید کوپلر شاخه‌ای (BLC) بر روی میکروستریبی با

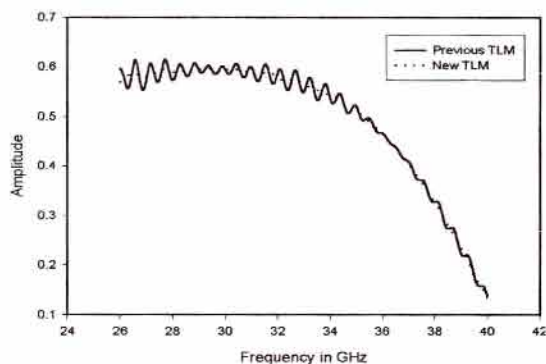
مشخصات $\sigma = 0/05 \text{ s/m}$ و $\epsilon_r = 6/6$



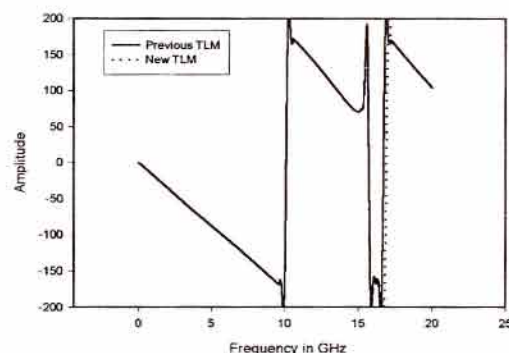
شکل ۸- الف مقایسه دامنه‌های پارامتر S_{21} حاصل از دو روش



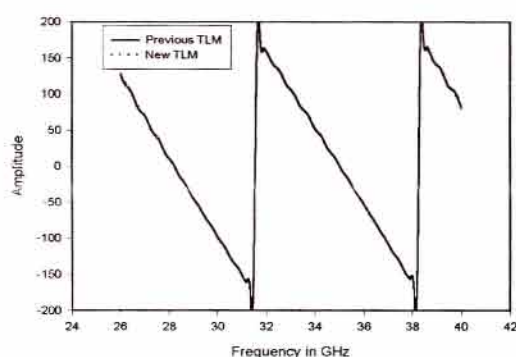
شکل ۷- الف مقایسه دامنه‌های پارامتر S_{11} حاصل از دو روش



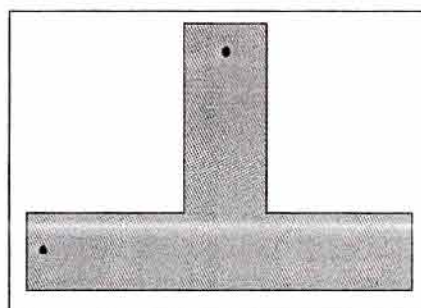
شکل ۱۱- الف مقایسه دامنه‌های پارامتر S_{21} حاصل از دو روش



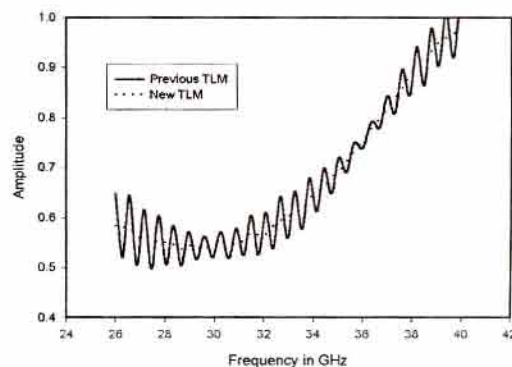
شکل ۸- ب مقایسه فازهای پارامتر S_{21} حاصل از دو روش



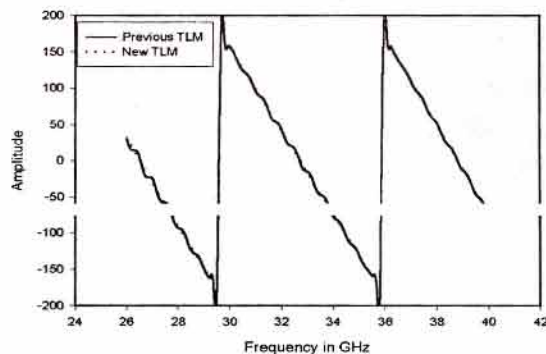
شکل ۱۱- ب مقایسه فازهای پارامتر S_{21} حاصل از دو روش



شکل ۹ اتصال T که با استفاده از موجبر WR(28) ساخته شده



شکل ۱۰- الف مقایسه دامنه‌های پارامتر S_{11} حاصل از دو روش



شکل ۱۰- ب مقایسه فازهای پارامتر S_{11} حاصل از دو روش

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو گره جدید حاوی استاب و ترکیبی برای روش TLM دو بعدی معرفی شد. بزرگترین حسن دو گره جدید این است که با آنها می‌توان همزمان، ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی را مدل کرد و مسائل مربوط به محیط‌های مغناطیسی دارای ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی کوچکتر از یک را - بدون نگرانی از ناپایداری - حل کرد. همانطور که نشان داده شده دو گره جدید دقت خوبی دارند. با توجه به اینکه گره ترکیبی دقت بالاتری دارد و براحتی می‌توان از آن استفاده کرد، گره مزبور به عنوان گره‌ای که تغییرات همزمان ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی را در محیط‌های همسان و ناهمسان در روش TLM مدل می‌کند، معرفی می‌شود.

۸- منابع

- 41, No. 11, November 1993.
- [10] Chen, Z.; Hoefer, W.J.R.; "A New Finite-Difference Time-Domain Formulation and its Equivalent with the TLM Symmetrical Condense Node"; IEEE Trans. MTT; Vol. 39, No. 12, Decem. 1991; pp. 2160-2169.
- [11] Chen, Z.; "A New Boundary Description in Two-Dimensional TLM Models of Microwave Circuits"; IEEE Trans. MTT; Vol. 39, No. 3, March 1991; pp. 377-382.
- [12] Eswarapa, C.; Hoefer, W.J.R.; "Wideband Absorbing Boundary Condition Using Third-Order Boundary Operators for Time Domain TLM Analysis"; IEEE MTT; 1993; pp. 10-12.
- [13] Al-Mukhtar, D.A.; "Transmission Line Matrix Method with Irregular Graded Space"; IEE Proc.; Vol. 128, No. 6, December 1981.
- [14] Krumpholz, M.; "A Gneralized Method for the Calculation of TLM Dispersion Relations"; IN Proc. 23rd EMC; Sept. 1993; pp.288-290.
- [15] Z, Chen; W.J.R.Hoefer; "A New Finite-Difference Time-Domain Formulation and Its Equivalent with the TLM Symmetrical Condense Node"; IEEE Trans. MTT; Vol. 39, No. 12, Decem. 1991; pp. 2160-2169.
- [16] U. Muller; W.J.R. Hoefer; "The Implementation of Smoothy Moving Boundaries in 2D and 3D TLM Simulations"; IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.; Albuquerque, NM, Jun 1-5, 1992.
- [17] Trenkic, Vlidia; Hoefer, W.J.R.; "Optimization of TLM Schemes Based on the General Symmetrical Condensed node"; IEEE Trans. Antenna and Propag.; Vol. 45, No. 3, Mar 1997.
- [1] Itoh, Tatsu; "Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures"; Ch. 8, pp. 496-592.
- [2] Johns, P.B.; Beurle, R.L.; "Numerical Solution of 2-Dimensional Scattering Problems Using a Transmission-Line Matrix", Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 118, No. 9, Sept. 1971; pp. 1203-1208.
- [3] Whinnery, J.R., Ramo, S.; "A New Approach to the Solution of Height Frequency Field Problems"; Proc. IRE; Vol. 32, June 1944; pp. 360-367.
- [4] Whinnery, J.R.; Concordia, C.; "Network Analyzer Studies of Electromagnetic Cavity Resonators"; Proc. IRE; Vol. 32, May 1944; pp. 284-288.
- [5] Akhtarzad, S.; Johns, P.B.; "TLM Analysis of the Dispersion Characteristics of Micro-Strip Lines on Magnetic Substrates Using Three Dimensional Resonators"; Electron. Lett.; Vol. 10, No. 25/26, Dec. 12, 1974; pp. 535-537.
- [6] Akhtarzad, S.; Johns, P.B.; "Generalized Elements for TLM Method of Numerical Analysis"; Proc. Inst. Elec. Eng.; Vol. 122, No. 12, Dec. 1965; pp. 1349-1352.
- [7] Akhtarzad, S.; Johns, P.B.; "Numerical Solution of Lossy Waveguides: TLM Computer Program"; Electronic Letters; Vol. 122, No. 12, Dec. 1975; pp. 1349-1352.
- [8] Johns, P.B.; "The Solution of Inhomogeneous Waveguide Problems Using a Transmission-Line Matrix"; IEEE Trans. MTT; Vol. 22, No. 3, March 1974.
- [9] Chen, Z.; Hoefer, W.J.R.; "Absorbing and Connecting Boundary Conditions for the TLM Method"; IEEE Trans. MTT; Vol.