

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

محاسبه حرکت ورودی به فونداسیون در اثر اندرکنش سختی محور یکی از مسائل چالش برانگیز در مبحث اندرکنش خاک-سازه می باشد که با دشواری های محاسباتی همراه است. جهت فائق آمدن بر این دشواری ها، رویکردهای تقریبی در گذشته ارائه شده است که مبنای روابط آیین نامه های طراحی و ارزیابی قرار گرفته است. روش میانگین گیری یکی از روش های تقریبی مرسوم برای محاسبه مؤلفه جابه جایی افقی و چرخشی وارد به پی است که مورد استفاده مهندسان طراح سازه می باشد. در گذشته تقریب قابل قبول این روش در برآورد حرکت ورودی پی های دارای تماس کامل با محیط اطراف مورد تأیید محققین قرار گرفته است. لیکن صحت این رویکرد در حالت تماس ناکامل فونداسیون با خاک اطراف تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که در بسیاری از رویکردهای اجرای سازه ها، عدم تماس دیواره های فونداسیون با محیط اطراف اجتناب ناپذیر است. در تحقیق حاضر، میزان دقت این روش در برآورد حرکت ورودی به پی های عمیقی که دیواره هایش با خاک اطراف تماس کامل ندارد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که نه تنها روش مذکور تقریبی نزدیک ۳۰ درصد در پیش بینی اندازه مؤلفه افقی حرکت ورودی به فونداسیون دارد بلکه در برخی حالات مؤلفه های چرخشی ورودی تا ۱۰۰ درصد خطا وجود دارد و این مؤلفه ها به کلی نادیده انگاشته می شود.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، اندرکنش سختی محور، حرکت میدان آزاد زمین، سطح تماس ناکامل.

بررسی دقت روش میانگین گیری در تخمین تحریک ورودی به پی با در نظر گرفتن اثر تماس ناکامل در دیواره ها با خاک اطراف

مسعود طاهری

دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

حسین جهانخواه (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، H.jahankhah@iiees.ac.ir

پوران فلاح زاده فراشاهی

دانش آموخته دکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

استفاده از روش میانگین گیری برای محاسبه تحریک ورودی به پی با استفاده از بردار حرکت سطح زمین و ترکشنی که در پی ایجاد می شود را ارائه داد. از آنجایی که محاسبه تنش های وارد به پی به صورت دقیق بسیار پیچیده است در تحقیق دیگری از همین محقق [۲] معادلات را بر اساس روش رابطه تقریبی با حل ساده شده برای حل اندرکنش سختی محور ارائه داد. همچنین معادلات بر اساس فرمولاسیون گفته شده به وسیله لوکو [۳] می باشد که فقط امپدانس و حرکت میدان آزاد را در سطح در نقطه مرجع (مرکز پی) می خواهد، توسعه یافته است. همچنین، کوریموتو و ایگوچی [۴] و کوریموتو و سکی [۵] با استفاده از روش های تخمین مرسوم، روش هایی را برای محاسبه حرکت

بررسی و مطالعه رفتار ساختمان ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه بسیار مهم است. ارزیابی اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ دینامیکی ساختمان ها به طور مناسب، نیازمند محاسبه و برآورد امپدانس پی و حرکت ورودی پی می باشد. متأسفانه از آنجایی که دشواری محاسبه و ارزیابی مقادیر فیزیکی پایه ای اندرکنش خاک-سازه برای طراحان سازه وقت گیر و پیچیده خواهد بود لذا بسط و توسعه روش های ارزیابی ساده شده برای محاسبه امپدانس ها و حرکت های ورودی پی ضروری می باشد. روش میانگین گیری یکی از روش های تقریبی مهم مرسوم برای محاسبه مؤلفه جابه جایی افقی و چرخشی وارد به پی است. به عنوان پیشگام در این تحقیق، ایگوچی [۱] رابطه ای با

حرکت فونداسیون تحت میدان موج غیر همبسته استفاده شده است که بر اساس روابط ارائه شده به وسیله اسکانلان [۱۴] می‌باشد و تغییری در استفاده از این روابط اعمال نشده است.

میتا و لوکو [۱۵] در مقاله‌ای با روش ترکیبی المان مرزی و المان محدود به بررسی تماس ناکامل دیواره‌ها یک پی استوانه‌ای پرداختند. آنها در امپدانس و حرکت ورودی پی فقط مؤلفه پیچش را بررسی کردند و مؤلفه‌های دیگر حرکتی و امپدانس‌های افقی و چرخش مورد بررسی قرار نگرفت. آنها حالات تماسی ناکامل منظم ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد را بررسی کردند.

جهانخواه و فلاحزاده [۱۶] به بررسی اثر حرکت ورودی پی برای حالات تماسی مختلف که به صورت منظم می‌باشد همانند مطالعه میتا و لوکو [۱۵] پرداختند با این تفاوت که مؤلفه‌های حرکتی اصلی مانند مؤلفه افقی و چرخش را هم مورد بررسی قرار دادند و این کار را برای حالات مختلف عمق به نصف عرض پی انجام دادند. بررسی آنها در حالت دو بعدی و برای پی نواری می‌باشد. آنها یک مؤلفه خالص هم تعریف کردند که ترکیبی از مؤلفه افقی و چرخش می‌باشد و اثرات تماس ناکامل منظم را برای آن بررسی کردند. آنها نشان دادند عدم اتکالی کامل دیواره پی مدفون به خاک اطراف در بازه‌هایی از فرکانس تحریک β_0 می‌تواند منجر به تقویت تحریک مؤثر ورودی شود. در تحقیقی دیگر، جهانخواه و طاهری [۱۷] به بررسی اثر تماس ناکامل دیواره‌های پی مدفون مربعی با خاک اطراف پرداختند. این اولین تحقیق در حوزه تماس ناکامل بود که به صورت سه بعدی انجام گرفته است. آنها نشان دادند فرض تماس ناکامل نامنظم توانایی فعال کردن هر شش درجه آزادی حرکتی یک پی صلب را دارد و برخلاف حالت تماس کامل فقط دو مؤلفه حرکت ورودی پی تولید نشده و گاهی هر شش مؤلفه حرکتی ورودی پی برای یک تحریک برشی افقی با انتشار قائم برای پی می‌توان متصور بود.

اتفاقی که در واقع می‌افتد این است که با توجه به عدم تقارن موجود در سطوح تماسی، تنش‌های نامتقارن در پی ایجاد شده

ورودی پی گزارش کردند. روش تقریبی به وسیله ون و فوکووا [۶] برای فونداسیون ساختمان‌های با مجاور توسعه یافت. مری و همکاران [۷] دو روش ساده را برای محاسبه حرکات ورودی پی پیشنهاد کردند. در روش اول با استفاده از حداقل کردن خطای مجموع مربعات، الگوریتمی ارائه شد که فقط با استفاده از مشخصات هندسی پی، امپدانس و حرکت ورودی پی را محاسبه می‌کرد. در روش دوم با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی امپدانس و نیروهای محرک ورودی، حرکت ورودی به پی را محاسبه می‌کند.

یکی از عوامل مؤثر بر حرکت ورودی پی که کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است، ارتفاع لبه آزاد پی و سطوح تماسی پی با خاک پیرامون می‌باشد. در تمام معادلات ارائه شده توسط محققینی که در زمینه روش‌های میانگین‌گیری و برآورد تخمینی امپدانس و حرکت ورودی پی فعالیت کرده‌اند این عامل در نظر گرفته نشده است و فرض موجود در معادلات این روش، تماس کامل دیواره‌های پی با خاک اطراف می‌باشد [۱-۴].

برای اولین بار تاسولاس [۸] مفهوم لبه آزاد پی را بسط داد که این مفهوم بعدها با نام تماس ناکامل توسط محققین دیگر مورد بررسی قرار گرفت. روش مورد استفاده در این تحقیق، یک روش تقریبی بر اساس المان محدود و محیط نیمه‌گسسته برای خاک لایه‌ای بود. مدل ارائه شده به وسیله این محقق برای سطح تماس ۵۰ درصدی بوده است. او به محاسبه امپدانس، مؤلفه‌های افقی، دورانی، قائم و مؤلفه‌های پیچشی حرکت ورودی پی برای یک پی استوانه‌ای که بر روی خاک همگن و لایه‌ای پرداخت. در تحقیقی از فوکوزاوا [۹] که برای پی با حالت‌های تماسی مختلف برای یک راکتور اتمی مورد بررسی انجام گرفت، نشان داد بیشترین شتاب و برش پایه از بین چهار حالت تماسی فرض شده، مربوط به حالت بدون تماس دیواره‌ای (صفر درصد تماس) می‌باشد.

در آیین‌نامه بارگذاری سازه آمریکا ویرایش سال ۲۰۱۶ [۱۰] و همچنین ویرایش سال ۲۰۲۲ [۱۱] هم‌اکنون از روابط ساده شده ولتسوس [۱۲-۱۳] برای محاسبه امپدانس و میانگین‌گیری

شتاب‌هایی در سازه می‌شود که در هیچ کدام از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای این سطح از نیاز لرزه‌ای دیده نشده است. با توجه به موارد مطرح شده در این بخش که نشان می‌دهد شکل گرفتن تماس ناکامل در دیواره‌های پی باعث افزایشی شدن حرکت ورودی پی در فرکانس‌های بالا خواهد شد از این‌رو بررسی دقت و صحت استفاده از روابط روش میانگین‌گیری با در نظر گرفتن تماس ناکامل دیواره‌های پی با خاک اطراف احساس می‌شود.

۲- معادلات روش میانگین‌گیری

روش میانگین‌گیری یکی از روش‌های تقریبی مهم و مرسوم برای محاسبه مؤلفه افقی و دورانی وارد به پی است. به‌عنوان پیشگام در این زمینه، ایگوچی [۱] با روش تقریبی میانگین‌گیری، معادله‌ای را برای محاسبه حرکت ورودی پی بر اساس بردار جابه‌جایی حرکت سطح زمین و ترکشن وارد بر سطح پی ارائه کرده است (معادله ۱).

$$\{U^*\} = [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} dS - [K]^{-1} \times \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau^f(\bar{X})\} dS, \bar{X} \in S \quad (1)$$

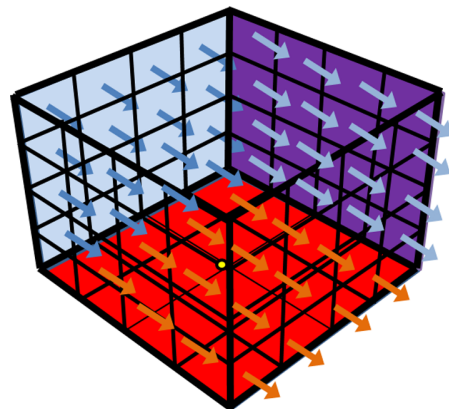
اما محاسبه تنش‌های دقیق وارد بر پی در محیط حفاری شده پیچیده بوده و این رابطه در تحقیقات بعدی ساده‌سازی گردید. در سال ۱۹۸۶، لوکو [۳] رابطه‌ای برای محاسبه حرکت ورودی پی ارائه داد:

$$\{U^*\} = [K]^{-1} \int_S [\tau_n^R(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} dS - [K]^{-1} \times \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} dS, \bar{X} \in S \quad (2)$$

در ادامه در سال ۲۰۰۱ در پژوهشی دیگر از ایگوچی [۱۸] با استفاده از روابط معادل، رابطه لوکو (معادله ۲) را به رابطه معادلی تبدیل کرد که فقط نیاز به امپدانس و حرکت سطح آزاد زمین در نقاط کنترلی دارد (معادله ۳).

$$\{U^*\} = [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} d - \omega^2 [K]^{-1} \times \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dS, \bar{X} \in S, X \in V \quad (3)$$

که برآیند این تنش‌ها حول نقطه مرجع باعث فعال شدن سایر مؤلفه‌های حرکتی پی می‌شود. به‌طور مثال پی موجود در شکل (۱) را فرض کنید که در دو دیواره عمود بر هم که با رنگ بنفش و آبی آسمانی مشخص شده‌اند (سمت دورتر) دارای تماس با خاک پشت خود می‌باشد و دو دیواره عمود بر هم که بی‌رنگ می‌باشند (سمت نزدیک‌تر) بدون تماس دیواره‌ای می‌باشد. در قسمت کف پی نیز که با رنگ قرمز مشخص شده است تماس با خاک زیر کامل می‌باشد. در این سطوح ترکشن‌هایی که در بر روی این سطوح تحت تحریک موج برشی افقی با انتشار قائم ایجاد شده است با پیکان‌های رنگی مشخص شده است. اگر لنگر حاصل از این ترکشن‌ها را نسبت به نقطه مرجع (نقطه زرد) که مرکز پی می‌باشد بگیریم علاوه بر دو مؤلفه افقی و دورانی به علت وجود لنگر حاصل از دیواره سمت راست تصویر در پی پیچش نیز ایجاد می‌شود.



شکل (۱): شکل شماتیک پی با سطح تماس ناکامل و تنش‌های ایجاد شده در اثر تحریک SH با انتشار قائم.

علاوه بر این، آنها نشان دادند تابع تبدیل مؤلفه افقی حرکت ورودی پی یک سازه که بر روی خاک سخت قرار دارد بر خلاف آنچه در دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای اشاره شده است، در فرکانس‌های بالا کاهش نیافته و این عامل باعث می‌شود مؤلفه افقی حرکت ورودی پی را افزایشی کند. آنها با معرفی مؤلفه افقی ترکیبی اثرات مؤلفه دورانی را برای پی‌های با تماس ناکامل در نظر گرفتند و نشان دادند برای سازه‌های کوتاه که سختی جانبی بالایی دارند، تماس ناکامل باعث به وجود آمدن

محور است. این جابه‌جایی‌ها و چرخش‌ها مطابق روابط (۸) الی (۱۳) محاسبه می‌شوند.

$$\Delta_x = \frac{1}{A} \int_A u_g(x, y) dA \quad (۸)$$

$$\Delta_y = \frac{1}{A} \int_A v_g(x, y) dA \quad (۹)$$

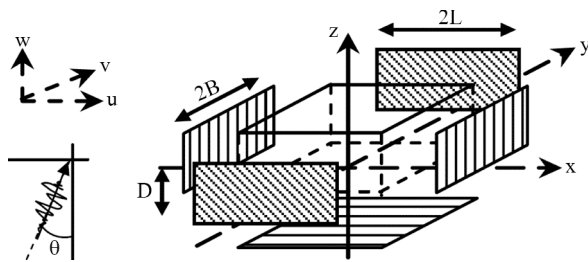
$$\Delta_z = \frac{1}{A} \int_A w_g(x, y) dA \quad (۱۰)$$

$$\theta_x = \frac{1}{I_x} \int_A z \cdot u_g(x, y) dA \quad (۱۱)$$

$$\theta_y = \frac{1}{I_y} \int_A x \cdot v_g(x, y) dA \quad (۱۲)$$

$$\theta_z = \frac{1}{I_z} \int_A y \cdot w_g(x, y) dA \quad (۱۳)$$

که برای هر سطح باید به‌دست آید.



شکل (۲): مختصات و ابعاد پی مدفون بررسی شده توسط مری [۱۹].

در مرجع [۱۹] با ساده کردن رابطه (۷)، روابط (۱۴) الی (۲۵) ارائه شد که فرمولاسیون روش حداقل کردن مجموع مربعات خطا به همراه ثابت‌های ارائه شده برای محاسبه مؤلفه‌های حرکت ورودی پی می‌باشد.

$$C_0 = \frac{A}{\sum \int dS_i} \quad (۱۴)$$

$$C_1 = \frac{\sum \int z dS_i}{D \cdot \sum \int dS_i} \quad (۱۵)$$

$$C_2 = \frac{I_x}{\sum \int (y^2 + z^2) dS_i - \frac{(\sum \int z dS_i)^2}{\sum \int dS_i}} \quad (۱۶)$$

$$C_3 = \frac{I_y}{\sum \int (x^2 + z^2) dS_i - \frac{(\sum \int z dS_i)^2}{\sum \int dS_i}} \quad (۱۷)$$

در معادلات بالا U^* حرکت ورودی پی، ماتریس A مربوط به هندسه پی، u^f حرکت میدان آزاد زمین، ماتریس K سختی دینامیکی پی، بردار τ^f تنش در سطح آزاد زمین و ρ دانسیته خاک است و H نیز بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$[H] = \int_S [A(\bar{X})]^T [A(\bar{X})] dS \quad (۴)$$

در روش ساده شده مری و همکاران [۷] دو روش برای محاسبه حرکت ورودی پی ارائه شده است. در روش اول که میانگین‌گیری وزنی است، با استفاده از امیدانس و نیروی وارد بر پی، حرکت ورودی را محاسبه می‌کند:

$$\begin{Bmatrix} \Delta_x^* \\ \Phi_y^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F_H \\ F_R \end{Bmatrix} \quad (۵)$$

در معادله ذکر شده Δ_x^* مؤلفه افقی حرکت ورودی پی و Φ_y^* مؤلفه دورانی حرکت ورودی پی می‌باشد. K_{HH} سختی دینامیکی افقی می‌باشد که از تغییر مکان پی در جهت x به‌اندازه واحد به دست می‌آید. K_{RR} سختی دینامیکی چرخشی پی می‌باشد که از دوران واحد پی حول محور y به دست می‌آید. مؤلفه‌های K_{RH} و K_{HR} که با یکدیگر برابر می‌باشند و همان سختی دورانی پی ناشی از تغییر مکان واحد در جهت x یا سختی افقی پی ناشی از دوران حول محور y می‌باشد.

در روش دوم با استفاده از حداقل کردن خطای مجموع مربعات، الگوریتمی ارائه شد که مطابق شکل (۲) فقط با استفاده از مشخصات هندسی پی و امیدانس، حرکت ورودی به پی را محاسبه می‌کرد. در این روش اگر حرکت میدان آزاد (FEM) را با رابطه (۶) تعریف کنیم:

$$FEM = (u_g(x, y), v_g(x, y), w_g(x, y)) e^{i\omega t} \quad (۶)$$

پارامترهای حرکتی میدان آزاد زمین در سه (x, y, z) به ترتیب (u_g, v_g, w_g) هستند، و اگر حرکت ورودی پی برای یک پی صلب (FIM) به‌صورت زیر باشد:

$$FIM = (\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) e^{i\omega t} \quad (۷)$$

که شامل سه جابه‌جایی انتقالی $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ در راستای محورهای x, y, z و سه چرخش $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ حول این سه

۳- مدل‌سازی

در این مقاله از نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی ریاضی به روش عددی استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر روش المان محدود است و در زمینه مسائل ژئوتکنیکی با ارائه مدل‌های رفتاری مناسب مقبولیت زیادی دارد. آباکوس قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیر خطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار به‌طور اتوماتیک میزان نمو بار و رواداری‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به‌ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسئله را تعیین کند.

دقیق و اقتصادی بودن مدل، دو پارامتر همیشه در تقابل هستند که در مدل‌سازی عددی رکن اصلی را بازی می‌کنند. پیدا کردن بهترین حالت وقوع این دو همیشه ذهن محققان را به خود درگیر کرده است. از طرفی برای دقیق بودن مدل ابعاد المان بسیار تأثیرگذار می‌باشد. علاوه بر این نوع تحریک ورودی، نوع حل گر و پارامترهای بدون بعد نیز بر دقت مدل اثرگذار است.

۳-۱- مرزهای ساده با استفاده از سرعت سیر امواج

با توجه به ضعف موجود در استفاده از مرزهای جاذب انرژی، در این مقاله سعی شد با استفاده از مفهوم پایه‌ای مدت‌زمان سیر امواج برشی و لحظه تولید امواج بازگشتی از مرزها و زمان رسیدن این امواج به پی، ابعاد محیط خاک به قدری در نظر گرفته شود که پی بتواند نوسان خود را انجام داده و تا قبل از رسیدن امواج بازگشتی از مرزها از حرکت باز ایستد [۱۷] و در ادامه از لحظه‌ای که امواج بازگشتی ناخواسته در تاریخچه پاسخ فونداسیون ظاهر می‌شوند می‌توان این بخش از رکورد پاسخ را حذف نمود. پس باید فاصله‌ای مناسب بین فونداسیون و لبه‌های مدل در نظر گرفته شود تا تداخل میان پاسخ و امواج ناخواسته بازگشتی ایجاد نشود. با چنین رویکردی دیگر استفاده از مرزهای جاذب انرژی ضرورت ندارد و تنها کافی است تغییر مکان مرزها همخوان با حرکت میدان آزاد باشد.

$$C_4 = \frac{I_x + I_y}{\sum \int (x^2 + y^2) dS_i} \quad (18)$$

در روابط فوق، S_i سطح هر یک از وجوه پی می‌باشد، C_0 نسبت سطح کف پی به کل سطوح جانبی پی، C_1 مرکز شکل در عمق و C_2 ، C_3 و C_4 نسبت‌های ممان اینرسی هندسی تمام وجوه جانبی پی می‌باشد. I_x و I_y ممان اینرسی پی در دو جهت افقی می‌باشد. D عمیق دفن پی و A سطح مقطع کف پی می‌باشد. با به دست آمدن این ثابت‌ها مؤلفه‌های تغییر مکانی پی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta_x = \frac{C_0}{A} \sum \int u dS_i - C_1 D \Phi_y \quad (19)$$

$$\Delta_y = \frac{C_0}{A} \sum \int v dS_i + C_1 D \Phi_x \quad (20)$$

$$\Delta_z = \frac{C_0}{A} \sum \int w dS_i \quad (21)$$

و همچنین برای مؤلفه‌های دورانی پی بر اساس ثابت‌های گفته شده در بالا می‌توان این حرکت‌ها را محاسبه نمود:

$$\Phi_x = \frac{C_2}{I_x} \sum \int \{yw - (z - C_1 D)v\} dS_i \quad (22)$$

$$\Phi_y = \frac{C_3}{I_y} \sum \int \{(z - C_1 D)u - xw\} dS_i \quad (23)$$

$$\Phi_z = \frac{C_4}{I_x + I_y} \sum \int \{xv - yu\} dS_i \quad (24)$$

که Δ_x ، Δ_y و Δ_z مؤلفه‌های تغییر مکانی در هر جهت هستند و Φ_x ، Φ_y و Φ_z نیز مؤلفه‌های دورانی حول محورهای مربوطه می‌باشند که با فرض موج برشی افقی (SH)، حرکت میدان آزاد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$u(y, z) = U_0 \cos\left(\frac{\omega \cos \theta}{V_s}(z - D)\right) * e^{\left(-i \frac{\omega \sin \theta}{V_s}\right)} \quad (25)$$

که در آن U_0 تغییر مکان سطح زمین، θ زاویه انتشار موج برشی افقی و V_s سرعت موج برشی در خاک می‌باشد. البته لازم به توضیح است که در دو جهت دیگر حرکتی وجود ندارد و $v(x, z) = w(x, y) = 0$ می‌باشد.

۳-۲- حداکثر ابعاد المان‌ها و شکل المان‌ها

آنالیز حساسیت، این پارامتر به صورت بهینه تعیین شد، به طوری که کمترین خطا بین پاسخ و جواب دقیق وجود داشته باشد. بدین منظور پس از تحلیل چند مدل با ابعاد المان متفاوت و مقایسه میزان تغییر در پاسخ‌ها آنها بعد المان‌ها تعیین شد. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده مقدار بعد مش یک‌شانزدهم طول موج در نظر گرفته شد که این مقدار با نتایج تحقیق انجام شده توسط بازان [۲۲] مشابه می‌باشد که برای حالت ماتریس جرم متمرکز برای رسیدن به دقت بالا ابعاد المان‌ها از یک‌شانزدهم طول موج کمتر باشد. از آنجایی که نرم‌افزار آباکوس برای المان‌ها خطی مرتبه اول ماتریس جرم متمرکز را در معادلات وارد می‌کند بنابراین با توجه به انتخاب المان‌ها خطی مرتبه اول در این پژوهش لازم است این محدودیت رعایت شود.

شکل المان‌بندی باید به گونه‌ای باشد که با هندسه و فیزیک مسئله سازگار باشد. در پژوهش پیش رو از المان‌بندی مربعی استفاده شده است. علاوه بر شکل المان‌ها، ابعاد المان‌ها نیز در دقت محاسبات مدل‌های عددی بسیار تأثیرگذار است. به صورت کلی با کوچک‌تر شدن ابعاد المان‌ها در مدل‌های عددی دقت بیشتری نسبت به ابعاد المان‌های بزرگ‌تر حاصل خواهد شد؛ اما از طرفی با ریز نمودن ابعاد المان‌ها مدت‌زمان تحلیل افزایش پیدا کرده و همچنین ممکن است محدودیت‌های سخت‌افزاری باعث پرهزینه شدن تحلیل گردد. از این رو لازم است بعدی را پیدا کرد که بهینه باشد به طوری که با کاهش بیشتر بعد تغییر ناچیزی در پاسخ‌ها ایجاد شده و پاسخ‌های به دست آمده مورد قبول باشد.

۳-۳- محیط خاکی مدل شده در نرم‌افزار

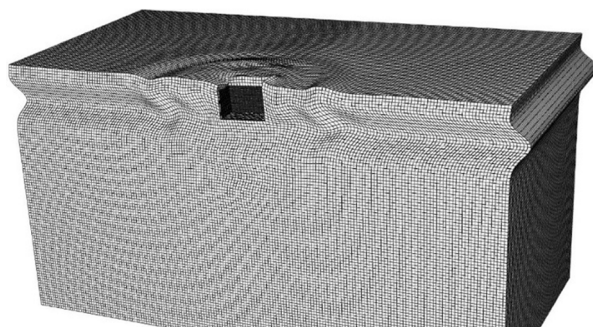
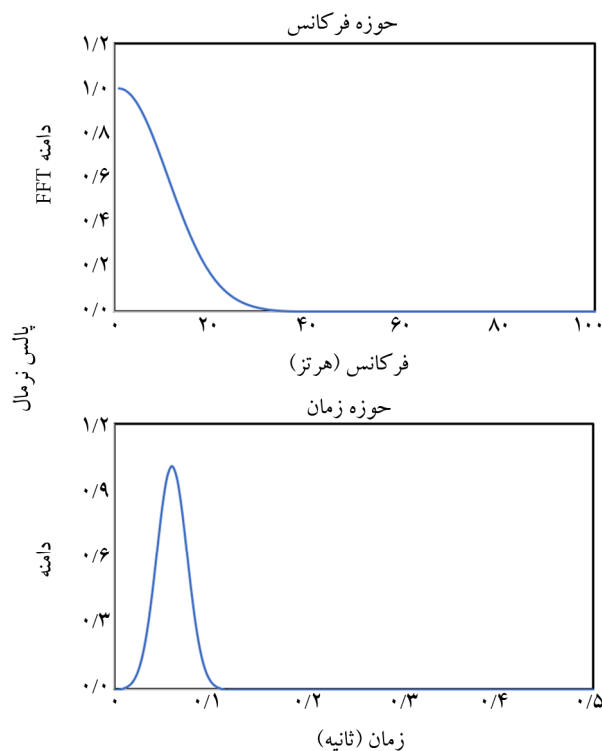
در این مقاله مرزها ساده در نظر گرفته شده است و به علت مفهوم به کار گرفته شده در مورد مدت‌زمان سیر موج و از حرکت باز ایستادن پی قبل از رسیدن موج طولی نیازی به تعریف مرزهای جاذب ویسکوز و مرزهای جاذب ویسکوالاستیک نبود؛ اما به منظور مدل‌سازی صحیح گسترش موج برشی حرکت میدان آزاد که انتظار می‌رود میدان تنش با کاتوره‌های افقی ایجاد نماید، طرفین مدل با استفاده از قیود چند نقطه‌ای (MPC) از نوع مفصلی (Pin) به یکدیگر وابسته شده‌اند. عدم استفاده از این قید سبب ثبت پاسخ‌های نامناسب در سطح مدل در موقع رسیدن موج برشی می‌شود. تحلیل استفاده شده از نوع تحلیل صریح (Dynamic Explicit) می‌باشد که با گام‌های حل برابر با 0.001 ثانیه فرض شده است و با فرض تغییر شکل‌های کوچک انجام می‌پذیرد.

۳-۴- تحریک ورودی

انتخاب تحریک ورودی و نحوه اعمال آن به مدل المان محدود، یکی از مهم‌ترین مسائل در تحلیل دینامیکی مدل‌ها است. البته هدف نهایی در مدل‌سازی عددی برای بررسی

ابعاد المان‌ها در آنالیزهای دینامیکی بسیار مهم‌تر از تحلیل‌های استاتیکی است. کوهلمیر [۲۰] در سال ۱۹۶۹ اثر ابعاد المان‌ها را در تحلیل‌های دینامیکی بررسی نمود. وی با بررسی انتشار یک بعدی موج از طریق میله با دو مصالح متفاوت دریافت که پاسخ منطقی زمانی حاصل می‌شود که نسبت بعد بزرگ‌ترین مش به طول موج کندترین موج منتشره در محیط (موج با پایین‌ترین سرعت) در حدود یک‌ششم باشد. در ادامه کوهلمیر و لایمر [۲۱] در سال ۱۹۷۳ دقت جابه‌جایی حاصل از یک پالس هارمونیک با فرض انتشار یک بعدی موج در مدل المان محدودی با بعد المان‌های مختلف را بررسی نمودند. در این پژوهش نشان داده شده است که پالس با فرکانس بالا تنها در مدل‌هایی با ابعاد مش کوچک قابل بررسی است. همچنین نشان داده شده است که بزرگ‌ترین ابعاد المان‌ها باید از یک‌چهارم کوچک‌ترین طول موج منتشره در محیط کوچک‌تر باشد. بر مبنای این مطالعات استفاده از بعد المان در حدود یک‌دهم الی یک‌هشتم برابر کوچک‌ترین طول موج منتشره پاسخ‌های قابل اطمینانی را حاصل می‌نماید. با توجه به بعد المان‌ها می‌توان ناحیه فرکانسی که ابعاد مش انتخابی توانایی عملکرد مناسب را دارند، حاصل نمود. به منظور حصول اطمینان از کفایت ابعاد المان‌ها با انجام

محور قائم جابه‌جایی بوده و محور افقی در حوزه زمان با ثانیه مشخص می‌شود. پارامتر محدوده فرکانسی قابل اعتماد نیز باید با باند فرکانسی تحریک مطابق شود. به‌طور مثال اگر مدلی با سرعت موج برشی ۱۰۰ متر بر ثانیه و بعد المان مدل شده ۰/۲۵ متر که برای امواج با طول موج بیش از ۴ متر عملکرد مناسبی داشته را فرض کنیم، این طول موج برابر با فرکانس حداکثر ۲۵ هرتز می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، رکوردهای ورودی دارای محتوای فرکانسی حداقل تا ۲۵ هرتز می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن بعد المان‌های انتخابی در این تحلیل است. همچنین در صورت تغییر در مشخصات خاک می‌توان ناحیه فرکانسی مناسب برای بعد المان‌ها را افزایش داد.



شکل (۳): تحریک اعمال شده به مدل.

اندرکنش خاک - سازه بررسی سیستم تحت تحریک یک زلزله واقعی می‌باشد؛ اما از آنجایی که مدت زمان اعمال زلزله برای تحلیل مدل المان محدود با بضاعت سخت‌افزاری موجود بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است ترجیح داده می‌شود از یک تحریک مصنوعی کوتاه‌مدت استفاده شود، به‌طوری‌که در کوتاه‌ترین زمان ممکن بتوان محدوده گسترده و کاملی از فرکانس‌ها را به مدل اعمال کرد و از پاسخ‌های به‌دست آمده توابع تبدیل اندرکنش سختی محور محاسبه گردد. این تحریک می‌تواند به صورت‌های مختلف شتاب، سرعت، جابه‌جایی و یا نیرو اعمال شود. برای اعمال تحریک به مدل تحریک از قسمت کف مدل انتشار می‌یابد که در این حالت تقید باید در جهات غیر از جهت تحریک، انجام پذیرد؛ زیرا مرز جاذب قرار گرفته در این قسمت نیمی از دامنه تحریک ورودی را جذب می‌نماید. با این نوع مرز در نظر گرفته شده انواع موجک با شکل تابع توزیع نرمال (پالس نرمال)، موج شبه‌سینوسی و موجک ریکر با توجه به محدودیت زمانی برای تحلیل بسیار مناسب هستند. شکل انواع تحریک پیشنهادی و قابل استفاده در شکل (۳) دیده می‌شود. باند فرکانسی این امواج باید در محدوده فرکانسی قابل انتشار توسط مدل المان محدود استفاده شده قرار داشته باشد. باید توجه داشت که طول مدت زمان پاسخ مؤثر برابر ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است؛ زیرا این دامنه زمانی می‌تواند گام‌های فرکانسی ۰/۰۱ هرتز را برای رصد تابع انتقال در فضای فرکانسی فراهم کند. باید توجه داشت که بازه‌های فرکانسی تابع انتقال تنها وابسته به مدت زمان رکورد در فضای زمان است. پس از آنجایی که در این مطالعه پس از اتمام پاسخ فونداسیون، قسمت مربوط به امواج برگشتی حذف می‌شود، مدت زمان باقی مانده تا زمان ۱۰۰ ثانیه با مقادیر صفر تکمیل می‌شود تا مدت رکورد برای برداشت گام فرکانسی مناسب به‌روز شود.

تحریک اعمال شده به مدل در شرایط مختلف بارگذاری اعم از جابه‌جایی و یا نیرو دارای دیمانسیون متفاوتی بوده و با توجه به نوع تحریک دیمانسیون می‌پذیرد. برای مثال چنانچه جابه‌جایی به‌عنوان عامل محرک مدل استفاده شود، دیمانسیون

فرکانس ترسیم شده، استفاده می‌شود که با توجه به ثابت بودن سرعت موج برشی و بعد پی در هر مدل، مقدار این پارامتر تنها متأثر از فرکانس تحریک است.

جدول (۱): مقادیر منظور شده برای پارامترهای بدون بعد.

پارامتری بعد	مقدار
d/D	۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و var
D/B	۰/۶۶، ۱/۳۳، ۱/۵

۴- صحت‌سنجی نتایج

در بخش صحت‌سنجی به بررسی توابع انتقال سختی محور در حوزه فرکانس پرداخته شده است. این مقایسه و ارزیابی با نتایج موجود در ادبیات فنی که به‌عنوان حل دقیق شناخته می‌شوند انجام پذیرفت. با استفاده از حل المان مرزی یک پی سه‌بعدی با عمق‌های دفن متفاوت که بر روی محیط همگن الاستیک واقع شده‌اند که به‌صورت نمودار یا جدول در مقالات آمده است، صحت‌سنجی مدل انجام می‌پذیرد. قابل ذکر است که در جدول (۲) مشخصات و ویژگی‌های خاک و مدل که جهت ارزیابی به کار رفته، ارائه شده است. البته از آنجایی که نتایج به‌صورت بدون بعد ارائه می‌شوند، دیمانسیون پارامترها تأثیری در جامعیت نتایج نهایی ندارد. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است مقادیر D و B عرض و عمق فونداسیون را مشخص می‌کنند که با توجه به نسبت عمق دفن انتخابی، D/B، تعیین می‌شوند.

شکل (۴) مقایسه توابع نرمال شده حرکت ورودی پی شامل دو مؤلفه افقی و دورانی به حرکت میدان آزاد برای چهار پی مدفون با سطح تماس کامل و عمق دفن‌های متفاوت را در فضای فرکانسی نشان می‌دهد. در این شکل، محور قائم مؤلفه‌های افقی نرمال شده به حرکت میدان آزاد زمین با نماد (u_1 / u_{ff}) و مؤلفه‌های دورانی نرمال شده با نماد $(\varphi_2 * B / u_{ff})$ نشان داده شده‌اند و محور افقی پارامتر فرکانسی بدون بعد (a_0) نشان می‌دهد.

جدول (۲): مشخصات مدل.

نوع المان	بعد مش (متر)	مدول برشی خاک (نیوتن بر سانتی‌متر مکعب)	تراکم خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	عرض فونداسیون (متر)	عمق فونداسیون (متر)
C3D8R	۰/۲۵	G = ۱۶۵۰	$\rho = ۱/۶۵$	۲B	D

پس از ورود یک موج برشی با انتشار قائم به مدل خاک در حالت میدان آزاد با توجه به اصول انتشار موج یک‌بعدی، موجب دو برابر شدن دامنه موج می‌شود. این موج با اختلاف فاز صفر نسبت به تحریک ورودی به داخل محیط برمی‌گردد. با فرض سرعت موج برشی برابر ۱۰۰ متر بر ثانیه و عمق بستر برابر با ۶۰ متر، باعث ثبت پاسخ در سطح با اختلاف زمانی ۰/۶ ثانیه نسبت به کف می‌شود. در ادامه با برخورد موج بازگشتی به کف مدل به علت بسته بودن کف موج بازگشتی که دو برابر شده بود با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه به داخل محیط برمی‌گردد.

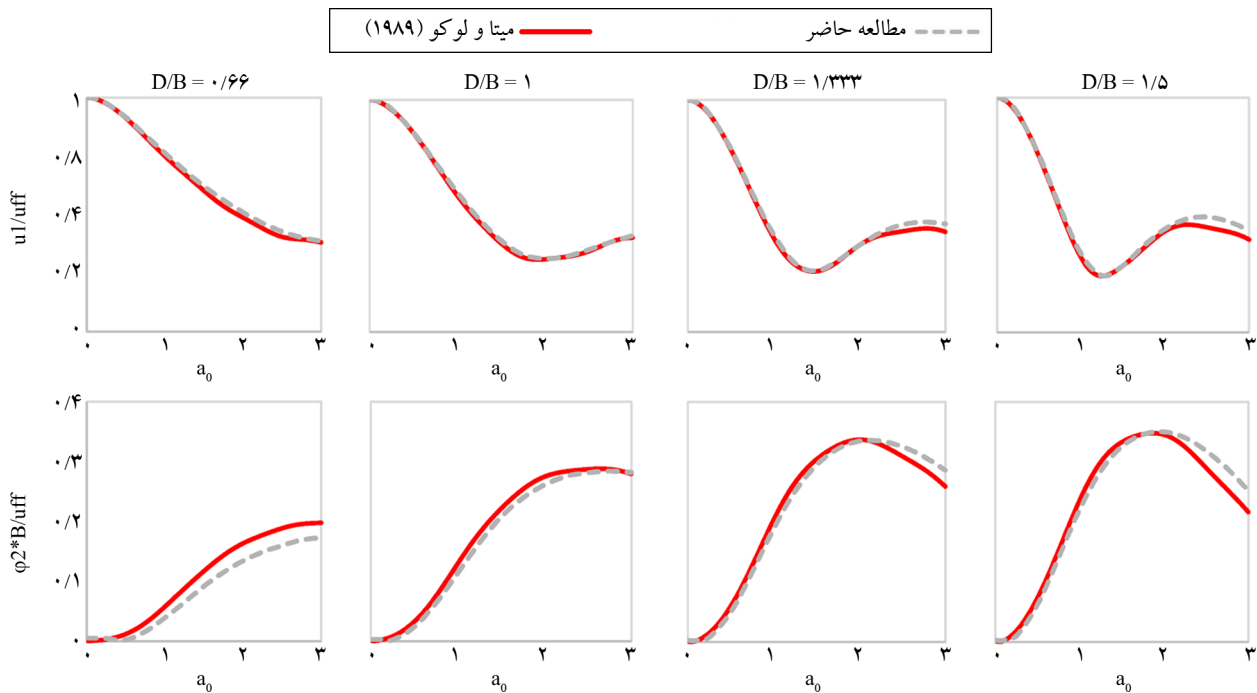
۳-۵- پارامترهای بدون بعد

از آنجایی که در تعریف اندرکنش سختی محور اشاره می‌شود پاسخ پی به‌صورت بدون جرم می‌باشد پس پاسخ سیستم‌های خاک-سازه برای بررسی اندرکنش سختی محور تنها وابسته به ابعاد پی، مشخصات خاک و مشخصات تحریک شامل نوع موج و زاویه تابش می‌باشد. در ادامه مشخصات دینامیکی فونداسیون که البته به‌صورت پارامترهای بدون بعد است، بررسی می‌شوند. با توجه به ابعاد هندسی و پارامترهای مشخصه سیستم، نتایج در حوزه فرکانس بر حسب پارامترهای بدون بعد سطح تماس دیواره پی با خاک اطراف (D/d) در حالت‌های منظم و نامنظم (var) به تفکیک آورده خواهد شد. در جدول (۱) مقادیر در نظر گرفته شده برای این پارامترها آورده شده است.

تمام نتایج در حوزه فرکانس در مقابل پارامتر بدون بعد فرکانس تحریک (a_0) که در رابطه (۱۲-۴) آمده، نشان داده خواهند شد. در این رابطه ω فرکانس تحریک، B نصف عرض پی و Vs سرعت موج برشی محیط خاکی است.

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad (۲۶)$$

از این پارامتر جهت نمایش نمودارهایی که در حوزه فرکانس



شکل (۴): مقایسه نتایج مدل‌سازی این تحقیق با مرجع مینا [۲۳] برای حالت تماس کامل ($d/D = 1$), مؤلفه افقی حرکت ورودی پی (u_1) مؤلفه دورانی حرکت ورودی پی (ϕ_2) که به میدان آزاد نرمال شده.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، نتایج خروجی برای حرکت ورودی پی، نزدیکی قابل‌قبولی با نتایج مینا و لوکو [۲۳] و روش المان مرزی استفاده شده توسط آنها دارد. از آنجایی که با افزایش عمق دفن پی تعداد المان‌های تعریف‌کننده پی بیشتر می‌شود مطابقت مؤلفه دورانی پی با نتایج رویکرد المان مرزی بهتر می‌شود. پس یک عامل تعیین‌کننده دیگر در بعد المان‌ها این پارامتر می‌باشد که باعث شد در انتخاب ابعاد مذکور حتی از مقدار یک‌دهم طول موج فراتر رفته و مقدار یک‌شانزدهم طول موج انتخاب شود. پارامتر $d/D = 1$ سطح تماس کامل دیواره پی با خاک اطراف را نشان می‌دهد.

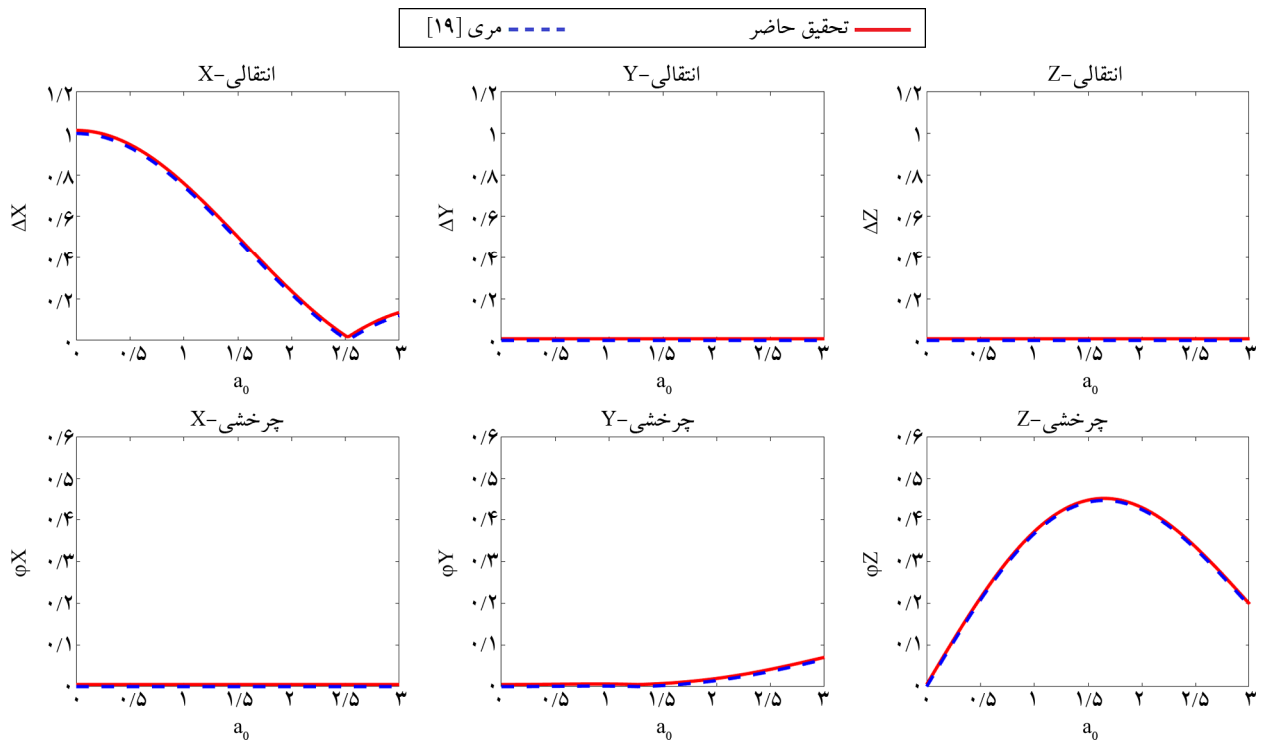
در توضیحاتی که از این پس در متن ارائه می‌شود در صورتی که مقدار این پارامتر بی‌بعد برابر یک عدد ثابت کمتر از واحد نشان داده شود منظور تماس ناکامل منظم و در صورتی که با نماد var همراه باشد نشان‌دهنده‌ی تماس ناکامل نامنظم می‌باشد. نتایج ارائه شده در شکل (۴) برای یک پی به عرض ۸ متر ($B=8$) که بر روی خاک با سرعت موج برشی $V_s = 100$ متر بر ثانیه، چگالی $1/65$ و ضریب پواسون $0/33$ مستقر شده است که نشان داده شد مدل پیشنهادی با مشخصات ارائه شده توانایی تولید نتایج حرکت ورودی پی را به نحو مناسبی داراست و می‌توان در ادامه و در انجام تحلیل‌ها از آن استفاده کرد.

در ادامه فرمولاسیون ارائه شده در مرجع [۱۹] با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB) جهت حل روش میانگین‌گیری پیاده‌سازی و با نتایج مرجع [۱۹] مطابقت داده شد. در شکل‌های (۵) تا (۹) مطابقت روابط پیاده‌سازی شده با نتایج مرجع مذکور نشان داده شده است. نمودارهای با رنگ قرمز مربوط به این تحقیق و نمودارهایی که با خط چین آبی رنگ ترسیم شده‌اند برگرفته از مرجع مورد استفاده می‌باشد.

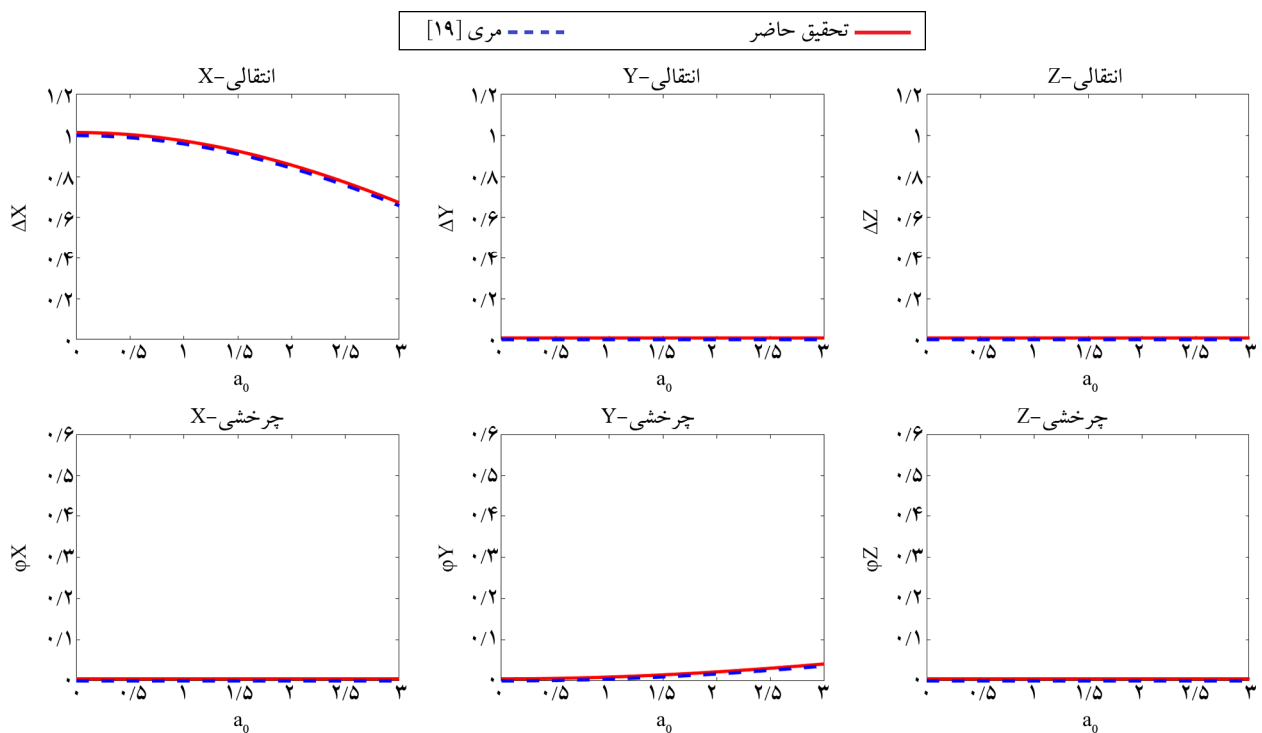
شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب برای سیستم‌های با مشخصات ($B/L = 1, d/D = 1, \text{teta} = 60$) و ($B/L = 1, d/D = 0.33, \text{teta} = 0$)، همچنین شکل‌های (۷) تا (۹) به ترتیب مربوط به سیستم‌هایی با مشخصات ($B/L = 1, d/D = 1, \text{teta} = 0$), ($B/L = 1, d/D = 1, \text{teta} = 30$) و ($B/L = 1/78, d/D = 1, \text{teta} = 0$) می‌باشند. teta زاویه تابش موج است.

برگرفته از مرجع مورد استفاده می‌باشد.

سال دهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲



شکل (۵): بررسی صحت کد نوشته با نتایج مقاله [۱۹] برای $\delta = 60^\circ$, $D/B = 1$, $B/L = 1$.

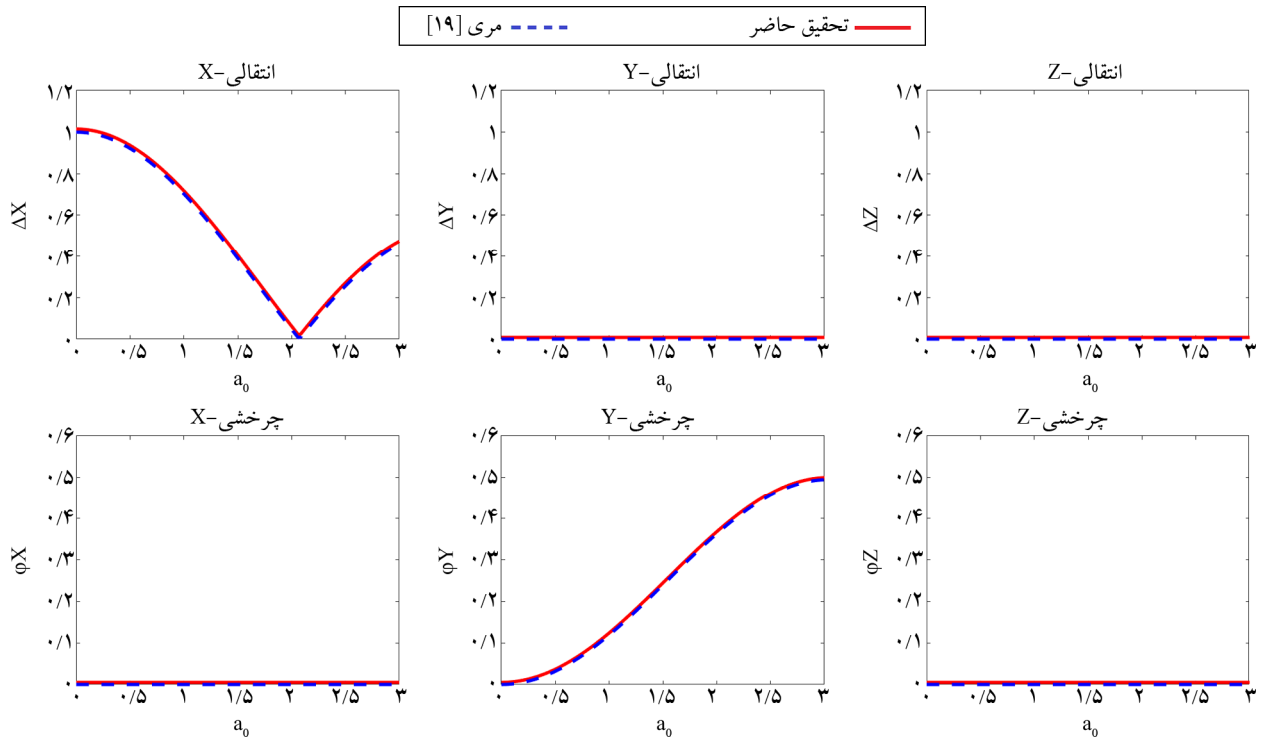


شکل (۶): بررسی صحت کد نوشته با نتایج مقاله [۱۹] برای $\delta = 0^\circ$, $D/B = 0.333$, $B/L = 1$.

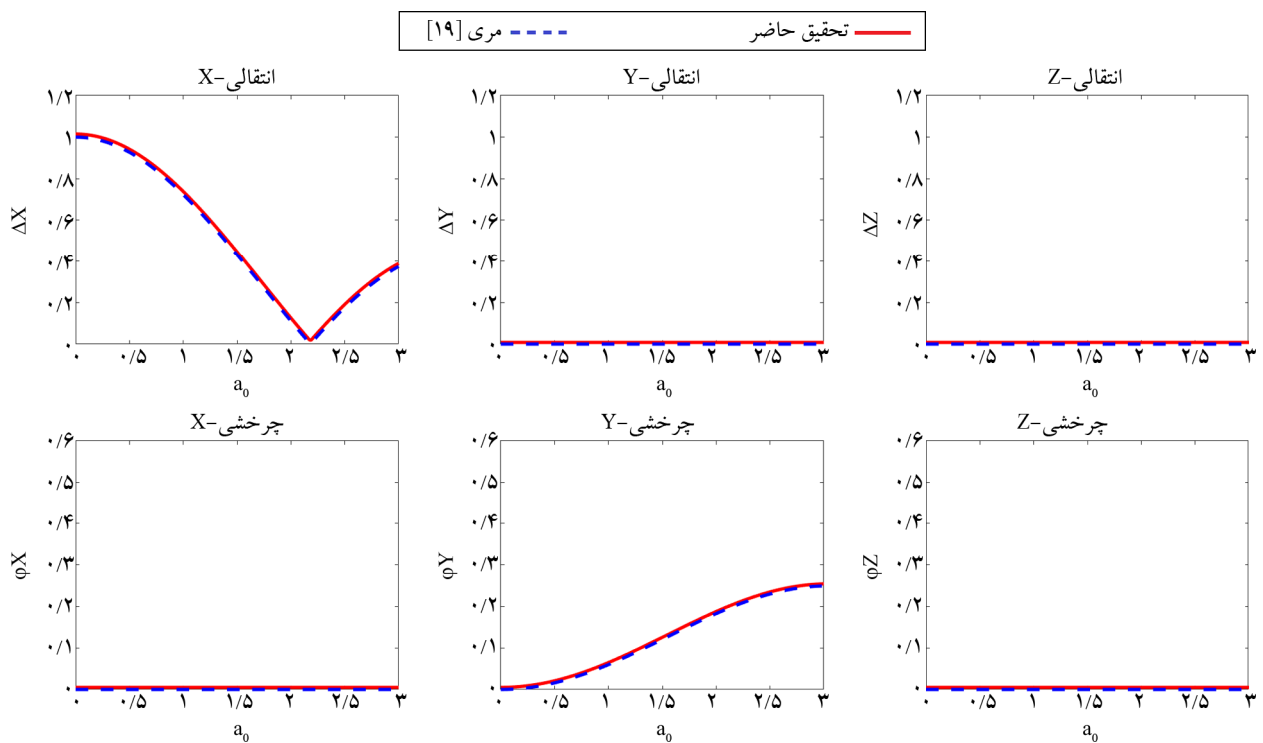
دیواره‌ها نوشته شده است و با توجه به مقوله تماس ناکامل که موضوع این تحقیق است، حدود انتگرال گیری به گونه‌ای متغیر تعریف گردید تا بتواند حالات دارای تماس ناکامل را نیز تحت

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از کد نوشته شده با نتایج موجود در مرجع مطابقت کاملی را نشان می‌دهد. در ادامه از آنجایی که این فرمولاسیون برای حالت تماس کامل

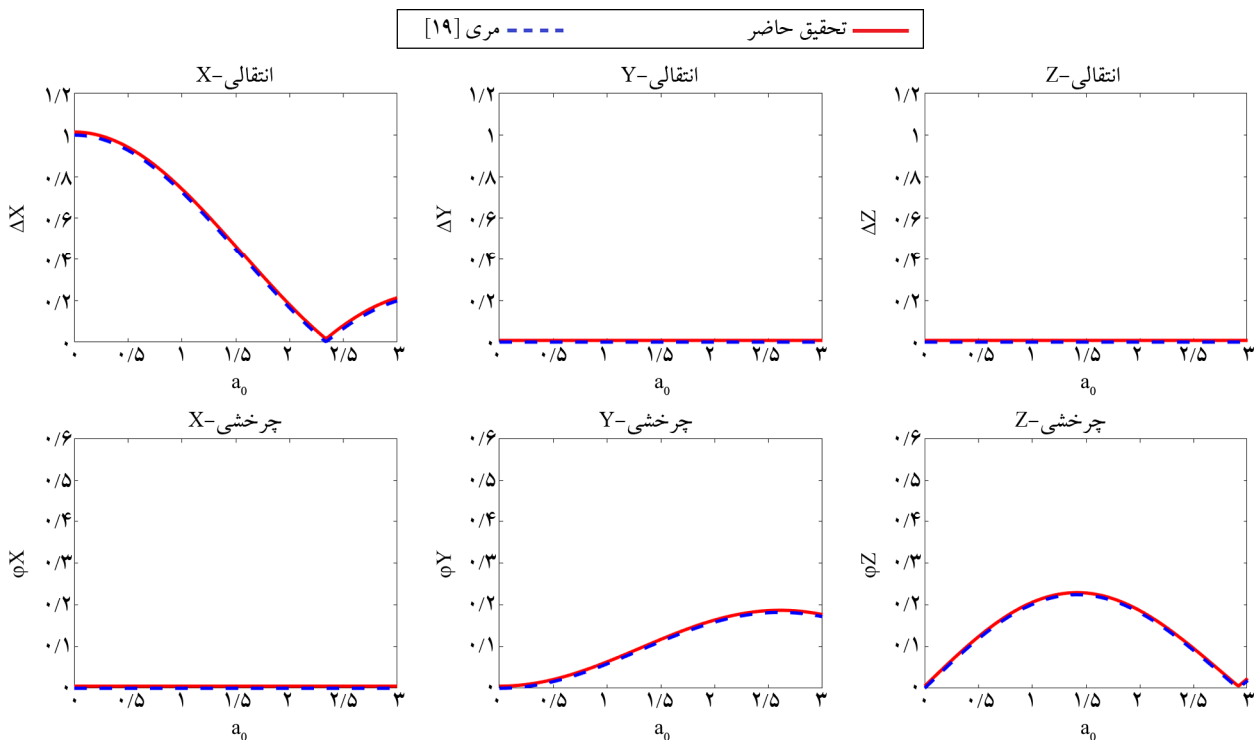
پوشش قرار دهد. برای این منظور برای چهار وجه دیواره‌ای درصد تماس متغیر معرفی گردید تا بتوان با تغییر در آن کارایی روش میانگین‌گیری را برای بررسی مدل‌های دارای تماس ناکامل با محیط اطراف مورد ارزیابی قرار داد. لازم به یادآوری است فرض اساسی در حل تقریبی امپدانس و حرکت ورودی پی با روش میانگین‌گیری قرارگیری یک پی صلب واقع بستر الاستیک با رفتار خطی می‌باشد.



شکل (۷): بررسی صحت کد نوشته با نتایج مقاله [۱۹] برای $B/L = 0.64$ ، $D/B = 1$ ، $\theta = 0$



شکل (۸): بررسی صحت کد نوشته با نتایج مقاله [۱۹] برای $B/L = 1.78$ ، $D/B = 1$ ، $\theta = 0$



شکل (۹): بررسی صحت کد نوشته با نتایج مقاله [۱۹] برای $teta = 30^\circ$ ، $D/B = 1$ ، $B/L = 1$

۵- نتایج

از آنجایی که با فرض وجود اندرکنش خاک-سازه برای یک پی صلب در حالت سه بعدی می توان شش درجه آزادی را متصور شد در این بخش، توانمندی روش میانگین گیری در برآورد حرکت ورودی به هر یک از این شش مؤلفه مورد بحث قرار می گیرد. این بررسی مبتنی بر این واقعیت است که مؤلفه های تغییر مکانی و مؤلفه های دورانی حول هر یک از محورهای مختصاتی تحت شرایط مختلف مانند ماهیت موج مهاجم به پی، دارا بودن عمق دفن و نیز زاویه تابش موج امکان فعال شدن دارند.

در شکل (۱۱) نتایج مقایسه ای مربوط به حالت نسبت عمق دفن $1/5$ با فرض تماس کامل دیواره ها با خاک اطراف ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود روش میانگین گیری تقریب نسبتاً قابل قبولی در این حالت با نتایج تحلیل المان محدود داشته اما در مؤلفه دورانی مقادیر پیشنهادی این روش در برخی از فرکانس ها تا حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر دقیق است.

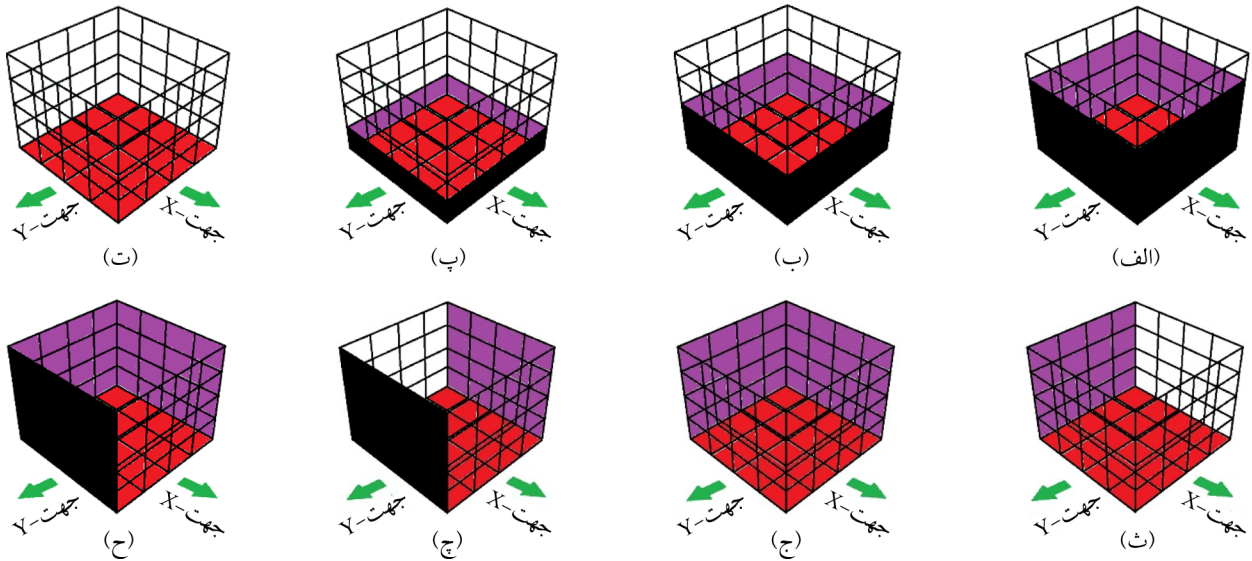
در ادامه و پس از بررسی حالت تماس کامل به بررسی حالت های ذکر شده برای تماس ناکامل می پردازیم. همان طور

برای بررسی دقت روش میانگین گیری در گذشته مطالعاتی انجام پذیرفته و طی مرور زمان سعی بر این بوده با انجام اصلاحاتی به نتایج دقیق حل المان مرزی نزدیک شوند. تمامی تلاش های فوق با فرض تماس کامل فونداسیون با محیط اطراف انجام پذیرفته است. در این بخش از تحقیق، دقت روش تقریبی میانگین گیری در مقایسه با روش المان محدود در حالتی که فونداسیون تماس ناکاملی با محیط اطراف دارد مورد بررسی قرار می گیرد.

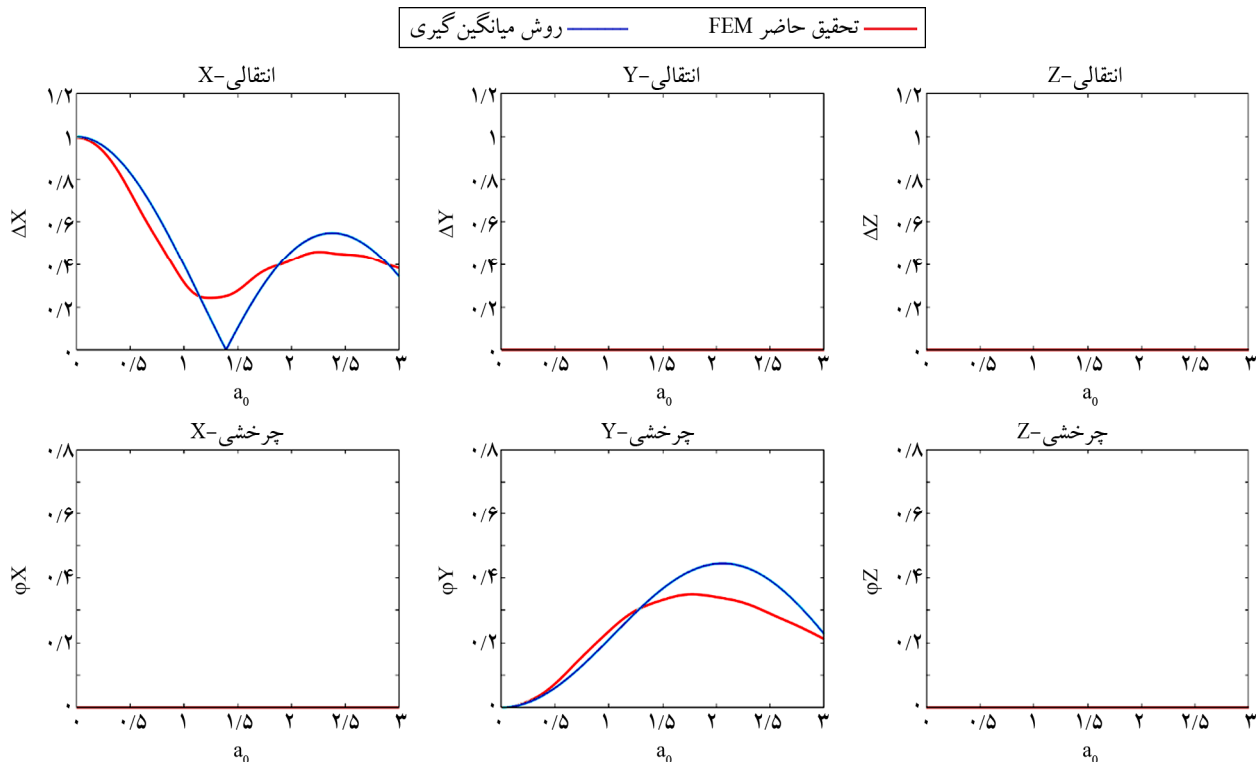
در این قسمت با استفاده از مدل المان محدود صحت سنجی شده، هشت حالت مختلف تماسی دیواره های پی با خاک اطراف انتخاب شد. چهار مدل از این هشت مدل، تماس ناکامل منظم به ترتیب حالت بدون تماس دیواره ای، ۲۵ درصد تماس، ۵۰ درصد تماس، ۷۵ درصد تماس و حالت بوده و چهار مدل دیگر، نمونه هایی از تماس ناکامل نامنظم را در برمی گیرند. در شکل (۱۰) نمای شماتیک این هشت مدل آورده شده است. علاوه برای این هشت مدل نتایج مدل دارای تماس کامل نیز به عنوان پیش درآمدی بر سایر نتایج ارائه خواهد شد.

پذیرفته است. در مورد مؤلفه افقی نیز در قسمت فرکانس‌های بالا مقدار بیشینه با تقریب چشمگیری محاسبه می‌شود که این برای سازه‌هایی که فرکانس طبیعی آنها بالاست (سازه‌های سخت و کوتاه) مانند سازه‌ی راکتور اتمی می‌تواند اثرگذار باشد.

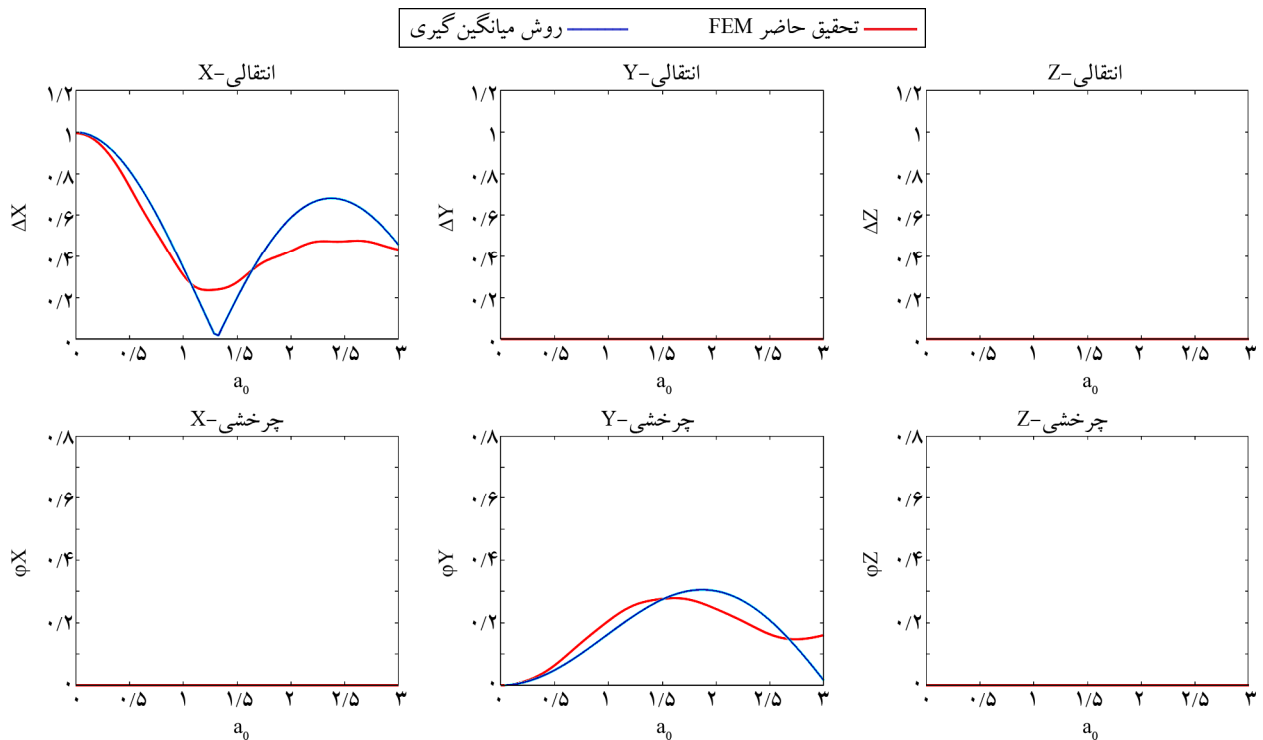
که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود با کم کردن سطح تماس از حالت کامل به ۷۵ درصد، روش میانگین‌گیری تقریب نسبتاً قابل قبولی از رفتار نمودار برای هر دو مؤلفه ارائه می‌دهد. هر چند که پیش‌بینی صحیحی از فرکانس رخداد بیشینه در مؤلفه دورانی به دست نمی‌دهد، اما در محاسبه مقدار آن به‌درستی پیش‌بینی انجام



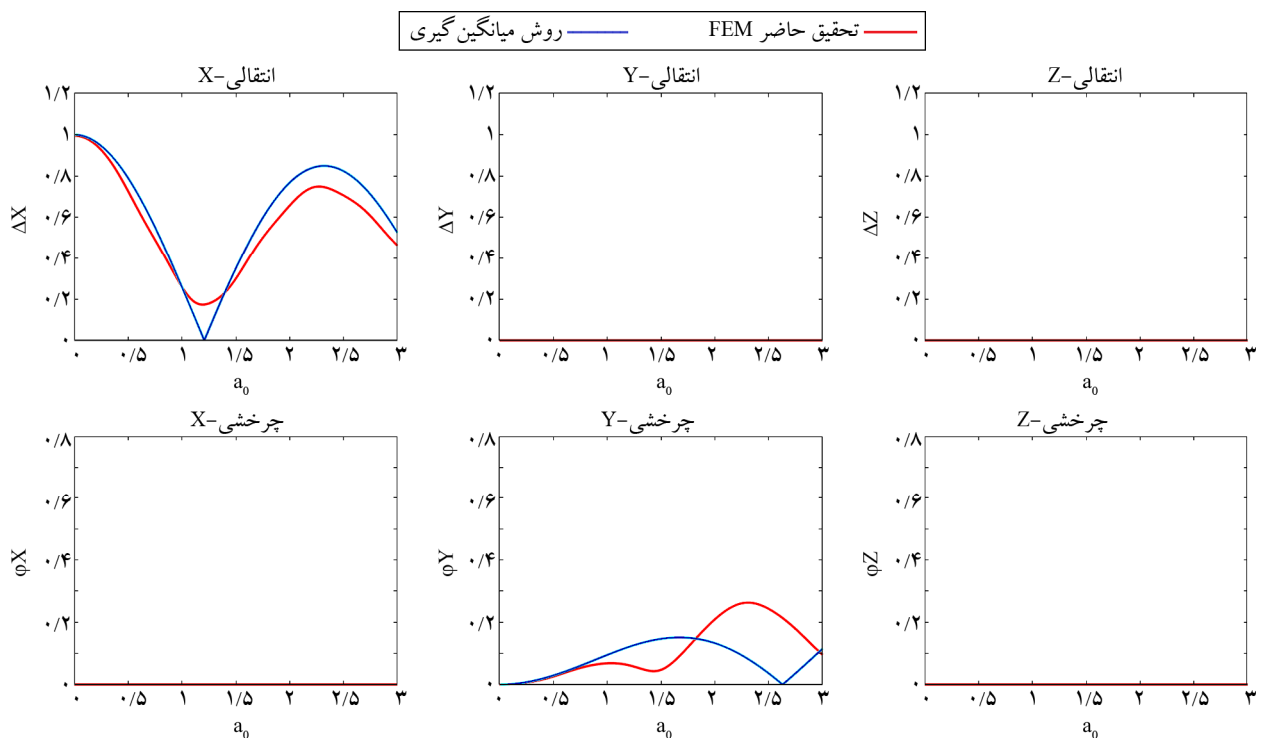
شکل (۱۰): مدل‌های شمانیک هشت مدل مورد مطالعه.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج روش میانگین‌گیری و تحلیل المان محدود برای تماس کامل $d/D = 1, D/B = 1/5$.



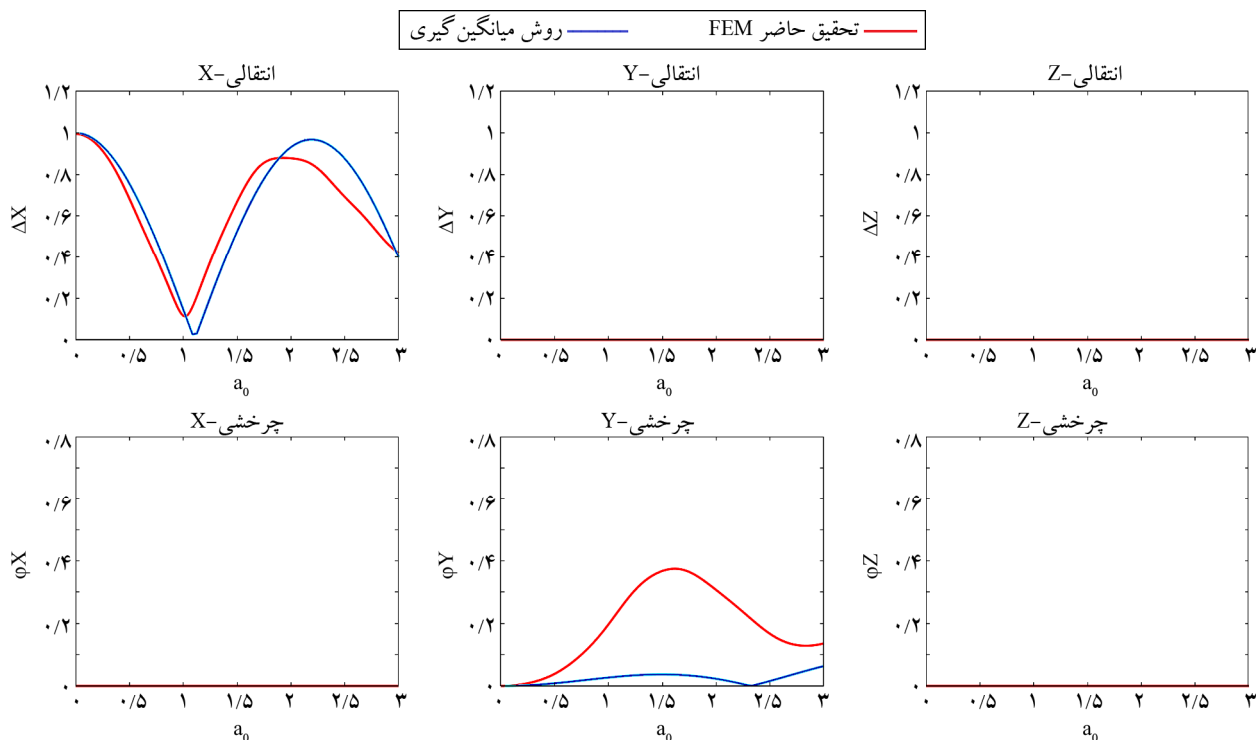
شکل (۱۲): مقایسه نتایج روش میانگین گیری و تحلیل المانها محدود برای تماس ناکامل منظم ۷۵ درصد (شکل ۱۰-الف)، $d/D=0/75$ ، $D/B=1/5$



شکل (۱۳): مقایسه نتایج روش میانگین گیری و تحلیل المانها محدود برای تماس ناکامل منظم ۵۰ درصد (شکل ۱۰-ب)، $d/D=0$ ، $D/B=1/5$

مقادیر به درستی برآورد نشده است؛ به گونه‌ای که در فرکانسی که بیشینه دوران اتفاق افتاده است روش میانگین گیری کمترین مقدار دوران را گزارش می‌کند.

مطابق شکل (۱۳)، در حالت تماسی ناکامل منظم ۵۰ درصدی هر چقدر مقادیر مؤلفه افقی به درستی و با روند منطبق محاسبه می‌شود برعکس برای مؤلفه دورانی روند و



شکل (۱۴): مقایسه نتایج روش میانگین‌گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای تماس ناکامل منظم ۲۵ درصد (شکل ۱۰-پ) $D/B=1/5$ ، $D=2/5$.

منظور کردن حرکت میدان آزاد در محاسبات دانست که حرکت افقی یکسانی را در تراز کف وارد انتگرال محاسباتی می‌نماید. در نتیجه در میانگین‌گیری هیچ‌گونه دورانی ایجاد نمی‌گردد. از طرفی مؤلفه افقی نیز دارای به هم ریختگی فرکانسی است به طوری که با یک عدم انطباق بیشینه به میزان $0/3$ در فرکانس بی‌بعد برای این پی مقادیر کمینه و بیشینه را جلوتر نشان می‌دهد.

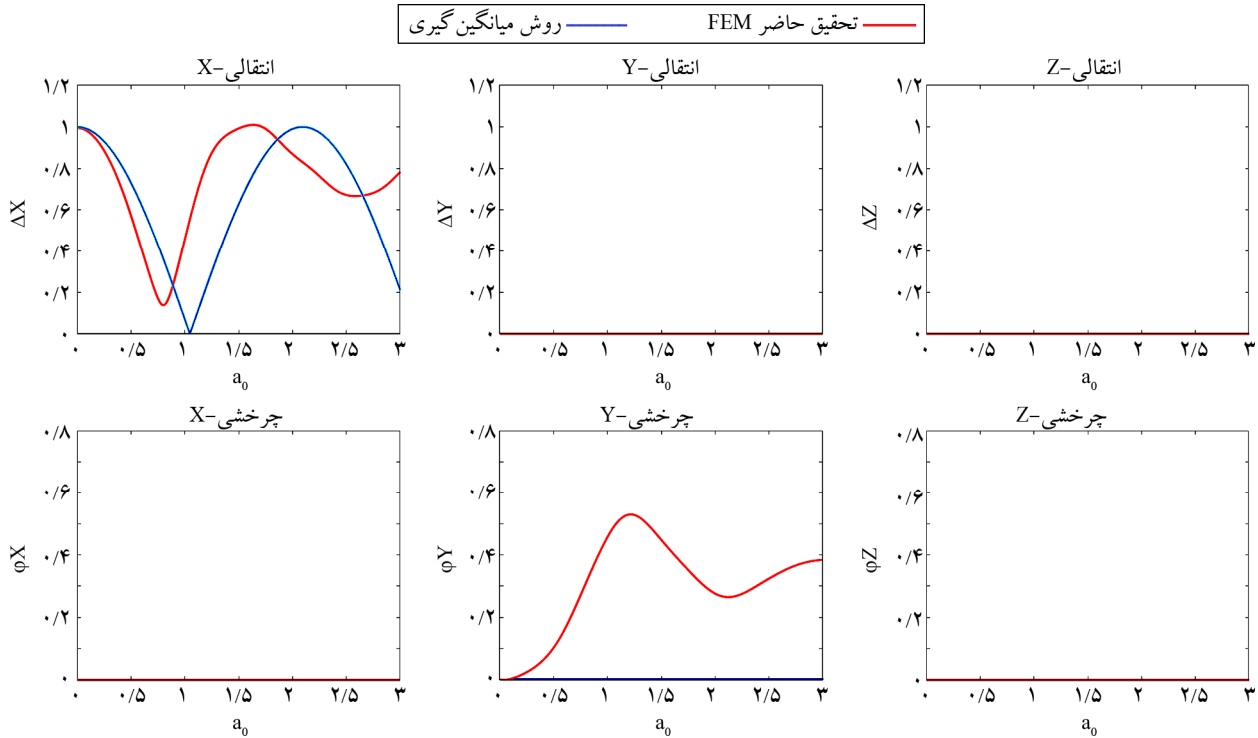
در مدل‌های تماس ناقص نامنظم عدم تطابق بیشتری وجود دارد. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود نتایج برای مدل (ح) از شکل (۱۰) آورده شده است که به جای اینکه مؤلفه تغییر مکان قائم پی در محاسبات ظاهر شود مؤلفه پیچشی نمودار می‌شود.

همان‌طور که در شکل شماتیک تماسی مدل یک مشاهده می‌شود مدل نسبت به محور X دارای سختی متقارن می‌باشد و انتظار می‌رود تحت حرکت میدان آزاد انتخاب شده، حرکت پیچشی در فونداسیون به وجود نیاید. از طرفی به علت عدم وجود یکی از وجه‌ها در صفحه X و Z این سازه نسبت به محور

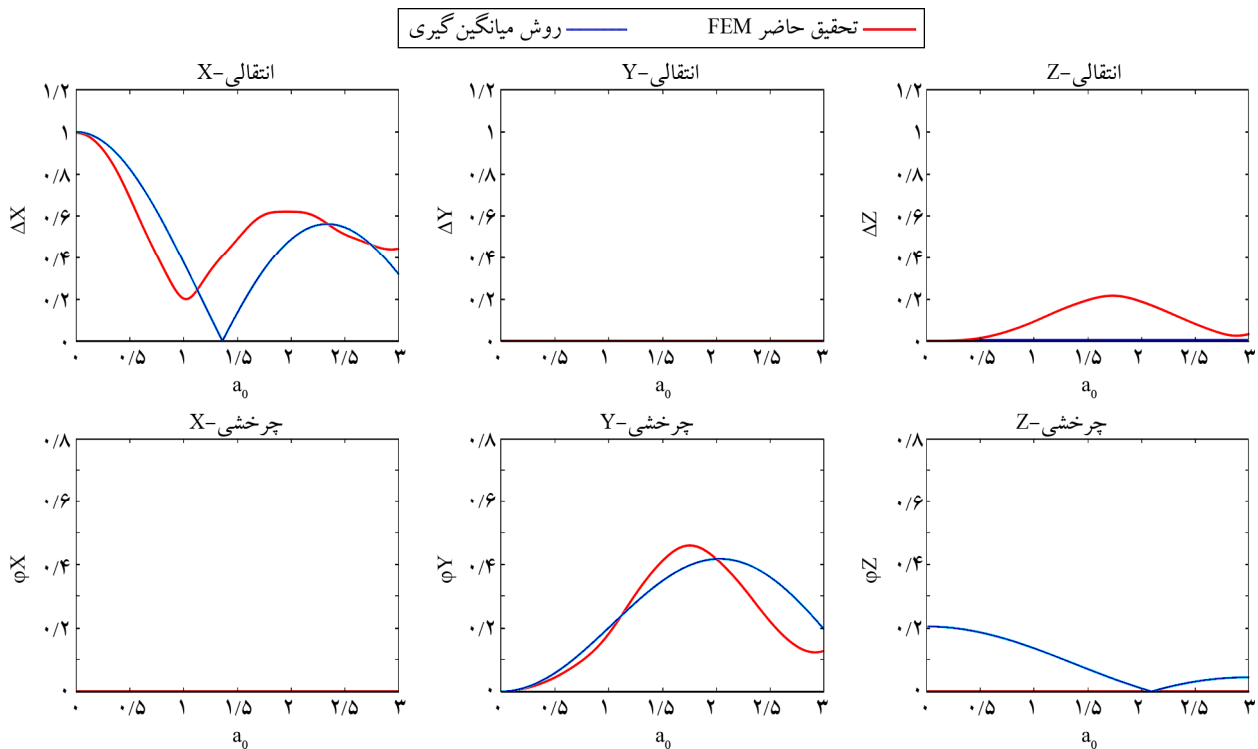
در شکل (۱۴) در حالت تماسی ۲۵ درصد، کماکان مؤلفه تغییر مکان افقی به خوبی مطابقت دارد و با اختلاف کم فرکانسی مقادیر کمینه و بیشینه را نشان می‌دهد. در طرف دیگر قضیه این مؤلفه دورانی است که مقادیرش به صفر نزدیک شده و دارای اختلاف فاحشی با نتایج واقعی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با شروع از حالت تماس کامل و کم کردن سطح تماس روش میانگین‌گیری در محاسبه مؤلفه دورانی ضعف جدی دارد و مقادیر این مؤلفه با کم شدن سطح تماس به صفر نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به روابط و ضرایب معرفی شده، با کم شدن سطح تماس دیواره پی مدفون با خاک اطراف، مقدار C_1 به سمت یک نزدیک‌تر می‌شود و به طبع آن مؤلفه دورانی را به صفر نزدیک‌تر می‌کند.

ضعف روش میانگین‌گیری خود را در حالت تماس صفر به صورت کاملاً محسوس نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) ملاحظه می‌شود رویکرد میانگین‌گیری توان تشخیص مؤلفه دورانی را در این حالت نداشته و فقط مؤلفه تغییر مکان افقی را لحاظ می‌کند. می‌توان دلیل اصلی این مسئله را

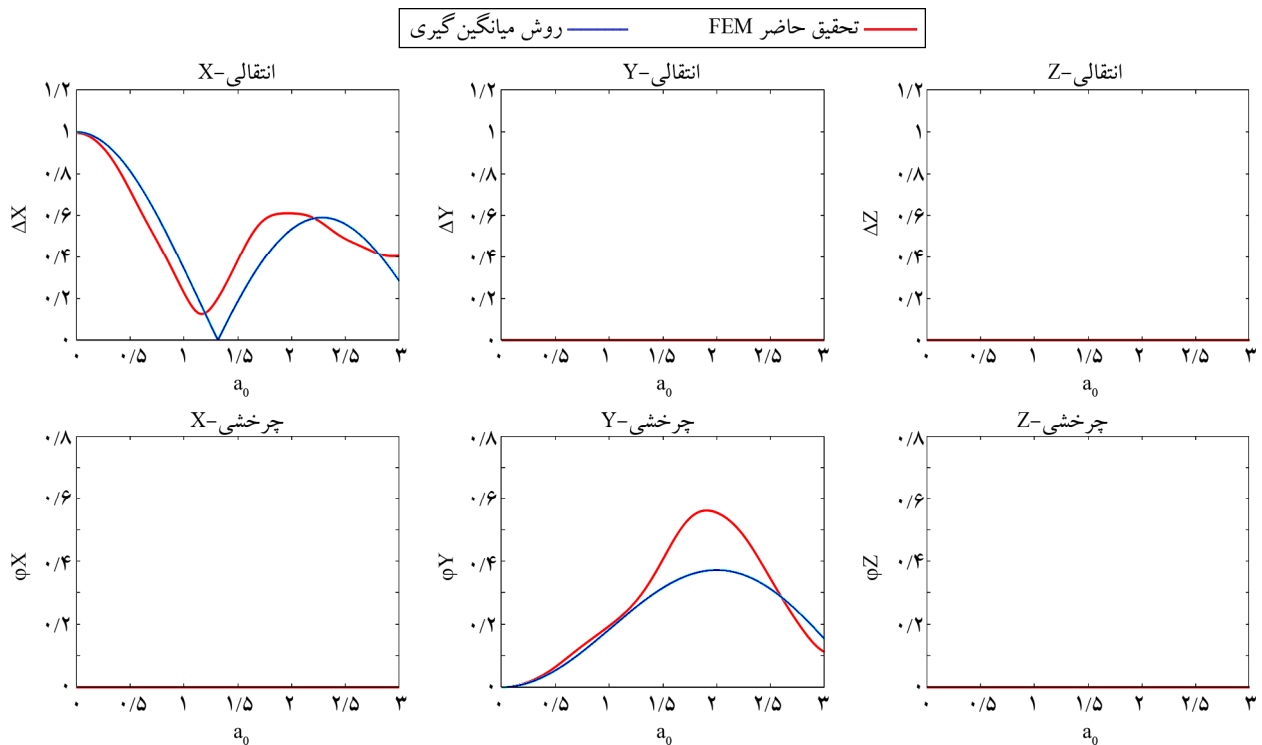
Z دارای ترکش‌هایی است که ایجاد مؤلفه حرکتی قائم می‌کند. مؤلفه افقی به مقدار 0.3 فرکانس بی‌بعد موجود می‌باشد. این در ادامه باز همان اختلاف فرکانسی در وقوع بیشینه و کمینه اختلاف ناحیه فرکانسی در مؤلفه دورانی نیز وجود دارد.



شکل (۱۵): مقایسه نتایج روش میانگین‌گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای حالت تماس بدون دیواره‌ها (شکل ۱۰-ت) $d/D = 0, D/B = 1/5$.



شکل (۱۶): مقایسه نتایج روش میانگین‌گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای حالت تماس ناکامل نامنظم (شکل ۱۰-ح) $d/D = \text{var}, D/B = 1/5$.



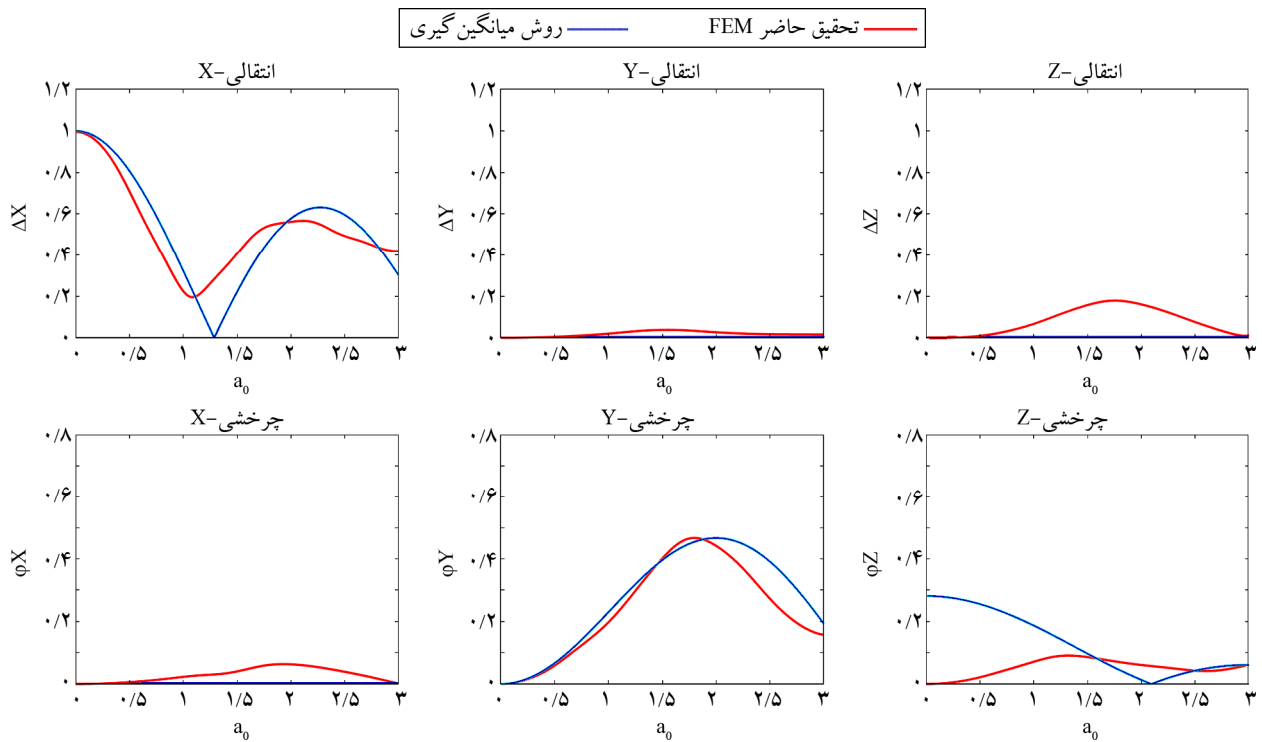
شکل (۱۷): مقایسه نتایج روش میانگین‌گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای حالت تماس ناکامل نامنظم (شکل ۱۰-ج) $d/D = \text{var}$, $D/B = 1/5$.

عدم وجود تقارن در هر سه محور، شش مؤلفه حرکتی ورودی به پی فعال می‌شود. اختلاف فرکانسی محل رخداد بیشینه‌ها در مؤلفه افقی همچنان مشاهده می‌شود؛ اما ذکر این نکته ضروری است که برای مؤلفه پیچشی حول محور قائم، چون از جنس دوران می‌باشد انتظار می‌رود در فرکانس صفر یعنی همان حالت استاتیکی، نمودار از صفر یا نزدیک به صفر آغاز شود و سپس با افزایش فرکانس و شروع حرکت پی، پیچش شروع به افزایش کند. این در حالی است که پیش‌بینی رویکرد میانگین‌گیری از مؤلفه دورانی روندی کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد. در سه مؤلفه جابه‌جایی در راستای محورهای Y و Z و نیز دوران حول محور X رویکرد میانگین‌گیری هیچ‌گونه دامنه حرکتی را پیش‌بینی نمی‌کند که صحیح نیست.

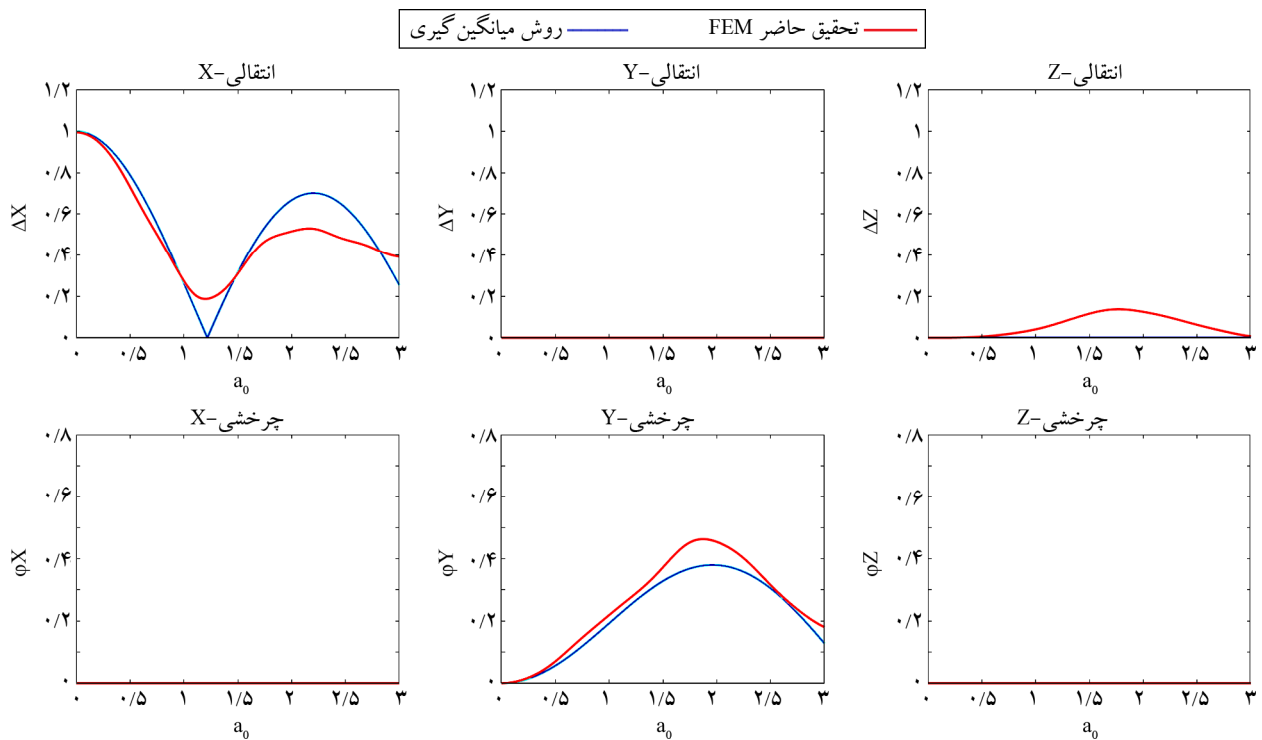
در شکل (۱۹) که مربوط به مدل (ث) از شکل (۱۰) می‌باشد به علت تقارن بودن مدل نسبت به محور X نمی‌توان مؤلفه پیچشی برای سازه متصور شد و از طرفی به علت نامتقارن بودن نسبت به محور Z مؤلفه تغییر مکان قائم فعال می‌شود. در این حالت در روش میانگین‌گیری، مقادیر مؤلفه افقی در فرکانس‌های بالا با ۴۰ درصد تفاوت محاسبه می‌شود.

در شکل (۱۷) نتایج مدل (ج) از شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت حذف وجه موجود در صفحه X، Z که در مدل یک وجود داشت و نیز تقارن شدن پی در هر دو محور X و Z دیگر مؤلفه تغییر مکان قائم ایجاد نشده و در نتیجه روش تقریبی توانسته است مؤلفه‌ها را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند؛ اما کماکان اختلاف فرکانس رخداد بیشینه در نتایج مؤلفه افقی موجود می‌باشد. در مؤلفه دورانی این اختلاف فرکانسی مشاهده نمی‌شود ولی مقادیر با ۳۰ درصد اختلاف محاسبه شده است که این می‌تواند در سازه‌های بلند و لاغر، اثر بسیار زیادی بگذارد. مطابق یافته‌های فوق می‌توان مشاهده کرد به علت عدم تقارن موجود در مدل یک نسبت به مدل دو، پیش‌بینی اتفاق افتادن مؤلفه‌های حرکت ورودی پی برای روش میانگین‌گیری در مدل اول دارای نقص جدی‌تری است. این موضوع در مدل سوم بیشتر خود را نشان داده و به فعال شدن تمام مؤلفه‌های حرکتی متصور برای پی صلب، منجر می‌شود.

در شکل (۱۸) که نتایج مدل (ج) از شکل (۱۰) را نشان می‌دهد و در بالا به آن اشاره شد بیشترین عدم تطابق مشاهده می‌شود. به علت



شکل (۱۸): مقایسه نتایج روش میانگین گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای حالت تماس ناکامل نامنظم (شکل ۱۰-ج) $d/D = \text{var}$, $D/B = 1/5$



شکل (۱۹): مقایسه نتایج روش میانگین گیری و تحلیل المان‌ها محدود برای حالت تماس ناکامل نامنظم (شکل ۱۰-ث) $d/D = \text{var}$, $D/B = 1/5$

این است که در مؤلفه افقی، در یک فرکانس میانی، برخلاف نتایج دقیق، مقدار صفر به خود می‌گیرد که می‌تواند گمراه کننده باشد. در حقیقت در نقاط مذکور نتایج دقیق یک کمینه موضعی

همچنین رویکرد میانگین گیری در این حالت توان پیش‌بینی مؤلفه قائم ایجاد شده را ندارد؛ اما یکی از اشکالات اساسی این روش که تمام حالات اعم از تماس کامل و ناکامل وجود دارد

تماسی ۲۵ درصد، مؤلفه تغییر مکان افقی به‌خوبی توسط روش میانگین‌گیری برآورد می‌شود لیکن در مؤلفه دورانی مقادیر به صفر نزدیک شده و دارای اختلاف فاحشی با نتایج واقعی می‌باشد. ضعف روش میانگین‌گیری خود را در حالت تماس صفر به‌صورت کاملاً محتوایی نشان می‌دهد و مؤلفه دورانی حول محور y به کلی حذف می‌شود. عدم توانایی روش میانگین‌گیری در تشخیص وجود یک مؤلفه که بسیار بحرانی‌تر از تقریب در محاسبه آن است، برای حالت‌های تماسی ناکامل نامنظم ممکن است به‌صورت کنترل نشده‌ای به کرات رخ دهد که نمونه‌هایی از این تقریب‌ها در قالب چند مثال در تحقیق حاضر بررسی شده است. در نهایت می‌توان بیان داشت استفاده از روش میانگین‌گیری در برآورد حرکت ورودی به فونداسیون‌های دارای تماس ناکامل با محیط اطراف با تقریب بسیار همراه بوده و می‌تواند به‌صورت غیر محافظه‌کارانه‌ای تحریک‌های ورودی و نیازهای لرزه‌ای را تحت‌الشعاع خود قرار دهد.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از بنیاد ملی علم ایران برای پشتیبانی از تحقیق حاضر تحت قرارداد به شماره ۹۶۰۱۷۳۶۳ ابراز تقدیر و تشکر می‌نماید.

مراجع

1. Iguchi, M. (1982) An approximate analysis of input motions for rigid embedded foundations. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 315, 61-75.
2. Iguchi, M. (1984) Earthquake response of embedded foundation to SH and SV wave. *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco (CA), 1082-1088.
3. Luco, J.E. (1986) On the relation between radiation and scattering problems for foundations embedded in an elastic half-space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(2), 97-101.
4. Kurimoto, O. and Iguchi, M. (1995) Evaluation of foundation input motions based on observed

را نشان می‌دهند که در رویکرد میانگین‌گیری مقدار صفر به آن نسبت داده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش میانگین‌گیری توانایی درستی در تعیین مؤلفه‌های فعال‌شده در پی را ندارد. مشاهده می‌شود فرمولاسیون جدیدی برای اینکه توانایی پیاده‌سازی مفهوم تماس ناقص را داشته باشد نیاز است. ریشه این نقص آن است که تحقیقات انجام شده و معادلات ارائه شده برای پی‌های مدفون با تماس کامل دیواره‌ای صورت پذیرفته است و اثرات اندرکنش سختی محور با چنین فرضی محاسبه شده‌اند؛ اما تحقیق حاضر برای اولین بار به بررسی اثر تماس ناکامل و ضعف روش میانگین‌گیری برای تخمین امپدانس و حرکت ورودی پی در حالت سه‌بعدی پرداخت.

۶- جمع‌بندی

در این تحقیق توانمندی روش میانگین‌گیری، برای تخمین حرکت ورودی به فونداسیون‌ها با فرض امکان وجود تماس ناکامل میان فونداسیون و محیط اطراف در حالت سه‌بعدی، مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج حاصل، در حالتی که تماس دیواره‌ها با خاک کامل باشد حداکثر خطای برآورد در مؤلفه افقی ۳۰ درصد و در مؤلفه چرخش این مقدار ۲۰ درصد می‌باشد. با این وجود روش میانگین‌گیری توانسته روند نمودارها را در این حالت به‌درستی تخمین بزند و تقریب نسبتاً قابل قبولی داشته باشد. وقتی حالت تماسی از حالت کامل به ۷۵ درصد سطح دیواره‌ها کاهش می‌یابد، روش میانگین‌گیری کماکان نتایج نسبتاً قابل قبولی از رفتار نمودار برای هر دو مؤلفه ارائه می‌دهد. برای مؤلفه دورانی حداکثر خطا به ۱۵ درصد کاهش یافته است که خطای کمتری نسبت به حالت تماس کامل است، اما فرکانس رخداد حداکثر دوران درست تشخیص داده نشده است. برای مؤلفه افقی در این حالت نیز خطا ۳۰ درصد می‌باشد. در ادامه با کم کردن سطح تماس و رسیدن به حالت تماسی ناکامل منظم ۵۰ درصدی مقادیر مؤلفه افقی به‌درستی و با روند درست منطبق می‌باشد اما در تخمین مؤلفه دورانی تفاوت‌ها چشمگیرتر شده است. در حالت

- Structural Dynamics*, 4(4), 379-388.
15. Mita, A. and Luco, J.E. (1987) Dynamic response of embedded: A Hybrid Approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **63**, 233-259.
 16. Jahankhah, H. and Fallahzadeh Farashahi, P. (2017) The effect of foundation embedment on net horizontal foundation input motion: the case of strip foundation with incomplete contact to nearby medium. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **96**, 35-48.
 17. Jahankhah, H. and Taheri, M. (2021) Incomplete soil-foundation contact and foundation input motion: From numerical analysis to field evidence. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
 18. Iguchi, M. (2001) On effective input motions: Observations and simulation analyses. *The 2nd UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, Tsukuba, Japan.
 19. Mori, M., Fukuwa, N., Tobita, J., and Suzuki, T. (2012) Simplified evaluation methods for impedance and foundation input motion of embedded foundation. *Proc. of the 15th World Conf. on Earthquake Engineering*, Lisbon.
 20. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problem. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **99**(SM5), 421-427.
 21. Kausel, E., Whitman, R.V., Morray, J.P., and Elsabb, F. (1978) Effects of horizontally travelling waves in soil-structure interaction. *Nucl. Eng. Des.*, **48**, 377-92.
 22. Bazant, Z.P. (1978) Spurious reflection of elastic waves in nonuniform finite element grids. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **16**(1), 91-100.
 23. Mita, A. and Luco, J.E. (1989) Impedance functions and input motions for embedded square foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**(4), 491-503.
 - seismic waves. *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ*, 472, 67-74.
 5. Kurimoto, O. and Seki, T. (1995) A simple method for evaluating dynamic characteristics of partially embedded foundation. *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ*, 486, 19-26.
 6. Wen, X. and Fukuwa, N. (2006) The effects of adjacent building on soil-structure interaction. *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ*, No.600, 97-105 (in Japanese).
 7. Mori, M., et al. (2008) Effects of side and base elements of embedded spread foundations on dynamic soil-structure interaction and conventional estimation methods for soil springs by composing the impedance of each element. *Journal of Structural and Construction Engineering. Transactions of AIJ*, 626, 535-542 (in Japanese).
 8. Tassoulas, J.L. (1981) *Elements for the Numerical Analysis of Wave Motion in Layered Media (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)*.
 9. Fukuzawa, R., Chiba, O., and Tohdo, M. (1985) Seismic response analysis of BWR buildings with embedded foundation.
 10. American Society of Civil Engineers (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures*. American Society of Civil Engineers.
 11. American Society of Civil Engineers (2022) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures*. American Society of Civil Engineers.
 12. Veletsos, A.S. and Prasad, A.M. (1989) Seismic interaction of structures and soils. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **115**(4), 935-956.
 13. Veletsos, A.S. and Prasad, A.M., and Wu, W.H. (1997) Transfer functions for rigid rectangular foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, 5-17.
 14. Scanlan, R.H. (1976) Seismic wave effects on soil-structure interaction. *Earthquake Engineering and*

Investigating the Accuracy of the Averaging Method in Estimating the Input Excitation to the Foundation by Considering the Effect of Incomplete Contact between the Walls and the Surrounding Soil

Masoud Taheri¹, Hossain Jahankhah^{2*} and Pouran Fallahzadeh Farashahi³

1. Ph.D. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: H.jahankhah@iiees.ac.ir
3. Ph.D., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Calculating the input motion to the foundation as a result of kinematic interaction is one of the challenging issues in the topic of soil-structure interaction, which is accompanied by computational difficulties. In order to overcome these difficulties, approximate approaches have been presented in the past, which are based on the relations of design and evaluation regulations. The averaging method is one of the conventional approximate methods for calculating the horizontal and rotational displacement component of the foundation, which is used by structural design engineers. In the past, the acceptable approximation of this method in estimating the input motions imposed on foundations, having full contact with the surrounding environment, has been approved by researchers. However, the accuracy of this approach in the case of incomplete contact of the foundation with the surrounding soil has not been investigated so far. However, for many approaches in the construction sequences of structures, the lack of contact between the foundation walls and the surrounding environment is inevitable. In this research, the capability of the averaging method to estimate the input motion to the foundations, assuming the possibility of incomplete contact between the foundation and the surrounding environment in three-dimensional mode, has been investigated. According to the results, in the case that the contact of the walls with the soil is complete, the maximum estimation error in the horizontal component reaches 30% and in the rotation component, this value is about 20%. Nevertheless, the averaging method has been able to correctly predict the trend of the graphs in the same case and resulted in a relatively acceptable approximation. When the contact state is reduced from the full state to 75% of the wall surface, the averaging method still provides reasonable results for both components. In the rotational component, the maximum estimated error is 15%, which is a lower error than the full contact state, but the frequency at which the maximum rotation occurs has not been detected correctly. For the horizontal component in this case, the error is 30%. Further, by reducing the contact surface and reaching a regular incomplete contact state of 50%, the values of the horizontal component are almost predicted correctly both in ordinate and trend. However the differences have become more significant in the estimation of the rotational component. In the contact state of 25%, the horizontal displacement component is well estimated by the averaging method, but in the rotational component, the values are close to zero, which show a significant difference with the actual results. The weakness of the averaging method intensifies in the case of zero wall contact and the rotational component about the y axis is completely vanished. The inability of the averaging method to detect the existence of a component, maybe more critical for imperfect irregular contact modes and may occur many times in an uncontrolled manner. Examples of such wrong approximations are presented in this research. Finally, it can be stated that using the averaging method in estimating the input motion to foundations with incomplete contact with the surrounding environment can be associated with large errors and can unconservatively overshadow the seismic design and evaluation procedures.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Kinematic Interaction, Free Field Motion, Incomplete Contact