



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

**مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه آهن
با استفاده از تحلیل مدل اجزای محدودی آن**

حامد رمضانی اومالی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

بهمن ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه عمران

**مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه‌آهن
با استفاده از تحلیل مدل اجزای محدودی آن**

دانشجو: حامد رمضانی اومالی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره: ۹۲ / ۱۳۷

تاریخ: ۹۲، ۱۲، ۱۰

ویرایش:

باسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حامد رمضانی اومالی رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان مکان یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه آهن با استفاده از مدل اجزای محدودی آن که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ قبول (با درجه: <u>بسیار خوب</u> امتیاز: ۱۸.۵)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر علی کیهانی	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی عجمی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر ایمان آقایان	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تشکر و قدردانی

« مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ »

اکنون که با لطف و عنایت پروردگار متعال، نگارش این پایان نامه به اتمام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا از همه کسانی که در تمامی مراحل تهیه این پروژه، راهنمایی و مساعدت نمودند، تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد راهنما، جناب آقای دکتر کیهانی به خاطر راهنمایی‌ها و تذکرات به موقع و عنایتی که در پیشرفت کار داشته‌اند و همچنین از مطالعه متن این پایان نامه بی‌نهایت سپاسگزارم. همچنین از سرکار خانم مهندس عسکری به خاطر اطلاعاتی که در مورد پل راه‌آهن در اختیار بنده قرار دادند کمال تشکر را دارم و نیز از جناب آقای دکتر ایپک‌چی و جناب آقای مهندس قارونی به جهت اطلاعات ارزشمندی که در مورد نرم‌افزار انسیس به بنده ارائه کردند، سپاسگزاری می‌کنم.

از پدر و مادرم که در تمام طول عمرم، اینجانب را مورد عنایت خود قرار داده و زندگی خود را مدیون این عزیزان هستم، به خاطر حمایت‌های بی‌دریغ خود در امر این پروژه، تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم. در انتها بر خود لازم می‌دانم که از همسرم، به خاطر محیط آرامی که جهت مطالعه برایم فراهم نمود و در دوران تحصیل همواره مشوقم بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

از کلیه همکاران و دوستانی که در جهت تدوین و تحقیق این پایان نامه همکاری نموده‌اند، تقدیر و تشکر می‌گردد و برای این عزیزان توفیق روزافزون آرزومندم.

تعهد نامه

اینجانب حامد رمضانی اومالی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران و معماری دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه‌آهن با استفاده از تحلیل مدل اجزای محدودی آن، تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجودات زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۲/۱۲/۱۸

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زیرساخت‌های عمرانی، توانایی فعالیت برای یک جامعه فراهم می‌کنند. سازه باید نیازهای ایمنی، دوام، سرویس‌پذیری و پایداری را برای عملکرد دراز مدت برآورده کند. این سازه‌ها به ناچار تحت تاثیر استفاده بیش از حد، افزایش طول عمر مصالح و غیره قرار دارند. در اثر این اندرکنش‌ها، توانایی آن‌ها برای مقاومت در برابر حوادث طبیعی و غیرطبیعی کاهش خواهد یافت. تکنولوژی نظارت بر سلامتی سازه‌ها، راهی برای ارزیابی ایمنی و دوام سازه در طول عمر آن، برای تضمین سرویس‌پذیری و پایداری فراهم می‌کند.

یکی از زیرساخت‌های مهم که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، پل‌ها هستند. به خاطر پیامدهای اقتصادی، این سازه‌های عمرانی علی‌رغم فرسودگی، همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، توانایی نظارت بر سلامتی این سازه‌ها مهم می‌باشد. با این حال، به علت وجود محدودیت در هزینه سیستم سنسورها و پردازش داده، فقط تعداد کمی از سنسورها در سیستم نظارت بر سلامتی قابل استفاده خواهد بود. به منظور شناسایی هرچه بهتر ویژگی‌های سازه، مکان‌یابی بهینه سنسورها، عملی اجتناب‌ناپذیر در طراحی سیستم نظارت بر سلامتی می‌باشد.

هدف از انجام این پروژه تعیین محل‌های بهینه سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه‌آهن می‌باشد. روش‌های موجود مکان‌یابی سنسورها بدون در نظر گرفتن تغییرات ویژگی‌های سازه، محل سنسورها را تعیین می‌کنند. با توجه به این نکته که در اثر حرکت قطار بر روی پل ویژگی‌های سازه تغییر می‌کنند، روش‌هایی برای تعیین مکان سنسورها ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که یکی از روش‌های ارائه شده برای مکان‌یابی سنسورها، از روش‌های موجود بهتر عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: نظارت بر سلامتی سازه‌ها، روش اجزای محدود، سنسور، پل راه‌آهن

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ۳
- ۱-۲- بیان مسئله و اهداف پروژه ۴

فصل دوم - مروری بر کارهای گذشته

- ۱-۲- مروری بر کارهای گذشته ۱۱
- ۲-۲- ارزیابی روش‌های مکان‌یابی سنسورها ۲۱
- ۱-۲-۲- معیار MAC ۲۱
- ۲-۲-۲- معیار RMS ۲۲
- ۳-۲-۲- معیار SVDR ۲۲
- ۴-۲-۲- دترمینان ماتریس اطلاعات فشر ۲۳

فصل سوم - توسعه‌های پیشنهادی

- ۱-۳- بیان روش کلاسیک EI ۲۷
- ۲-۳- توسعه‌های پیشنهادی ۳۰
- ۱-۲-۳- روش EI-SI ۳۳
- ۲-۲-۳- روش EI-AI ۳۴
- ۳-۲-۳- روش EI-I ۳۵
- ۴-۲-۳- روش EI-SVD ۳۶

فصل چهارم - شبیه‌سازی عددی

- ۱-۴- مقدمه ۴۱
- ۲-۴-خرپای دوبعدی ۴۱
- ۱-۲-۴- روش EI-SI ۴۴

۴۴	 EI-AI روش ۲-۲-۴
۴۴	 EI-I روش ۳-۲-۴
۴۴	 EI-SVD روش ۴-۲-۴
۴۵	 مقایسه روش‌های پیشنهادی ۳-۴
۴۹	 بحث و نتیجه‌گیری ۴-۴
۵۰	 پل راه‌آهن ۵-۴
۵۰	 مشخصات پل ۱-۵-۴
۵۳	 مدل اجزای محدود پل ۲-۵-۴
۵۵	 نتایج ۳-۵-۴

فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶۳	 نتیجه‌گیری ۱-۵
۶۶	 پیشنهادات ۲-۵
۶۷	 پیوست الف - نمودارهای تغییر مکان گره‌های خرپای دوبعدی
۸۷	 پیوست ب - مقاطع به کار رفته در ساخت پل باقرآباد
۹۳	 پیوست ج - کد برنامه متلب برای روش EI
۹۷	 منابع

فهرست اشکال و تصاویر

- شکل (۱-۴) سازه خرابایی ۴۱
- تصویر (۲-۴) عکس هوایی از پل راه‌آهن باقرآباد ۵۱
- تصویر (۳-۴) تصویری از پل باقرآباد ۵۲
- تصویر (۴-۴) تصویر دیگری از پل ۵۲
- شکل (۵-۴) مدل ایجاد شده پل در نرم‌افزار انسیس ۵۴
- شکل (۶-۴) فاصله محورها در لکوموتیو GT26CW ۵۴
- شکل (ب-۱) نمای شرقی و غربی پل ۸۹
- شکل (ب-۲) نمای سقف پل ۸۹
- شکل (ب-۳) نمای کف پل ۸۹
- شکل (ب-۴) مقاطع استفاده شده در ساخت پل ۹۰

فهرست جداول

جدول (۱-۴) ماتریس‌های E^i و φ_e^i	۴۳
جدول (۲-۴) محل بهینه سنسورها با روش‌های مختلف	۴۵
جدول (۳-۴) حداکثر خطای اندازه‌گیری تغییر مکان گره‌ها با روش‌های مختلف	۴۸
جدول (۴-۴) مقایسه روش‌های پیشنهادی با معیارهای مختلف	۴۸
جدول (۵-۴) ماتریس‌های E^i و φ_e^i برای ۲۹ مرحله تحلیل	۵۶
جدول (۶-۴) ماتریس‌های E_u برای روش‌های مختلف	۵۸
جدول (۷-۴) مقایسه روش‌های مکان‌یابی با معیارهای مختلف	۵۸

فهرست نمودارها

- نمودار (۴-۱) تغییر مکان واقعی گره ۷ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۴۷
- نمودار (الف-۱) تغییر مکان واقعی گره ۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۶۹
- نمودار (الف-۲) تغییر مکان واقعی گره ۳ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۰
- نمودار (الف-۳) تغییر مکان واقعی گره ۴ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۱
- نمودار (الف-۴) تغییر مکان واقعی گره ۵ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۲
- نمودار (الف-۵) تغییر مکان واقعی گره ۹ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۳
- نمودار (الف-۶) تغییر مکان واقعی گره ۱۰ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۴
- نمودار (الف-۷) تغییر مکان واقعی گره ۱۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۵
- نمودار (الف-۸) تغییر مکان واقعی گره ۱۳ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۶
- نمودار (الف-۹) تغییر مکان واقعی گره ۱۴ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۷
- نمودار (الف-۱۰) تغییر مکان واقعی گره ۱۵ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۸
- نمودار (الف-۱۱) تغییر مکان واقعی گره ۱۶ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۷۹
- نمودار (الف-۱۲) تغییر مکان واقعی گره ۱۷ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۰
- نمودار (الف-۱۳) تغییر مکان واقعی گره ۱۸ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۱
- نمودار (الف-۱۴) تغییر مکان واقعی گره ۱۹ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۲
- نمودار (الف-۱۵) تغییر مکان واقعی گره ۲۰ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۳
- نمودار (الف-۱۶) تغییر مکان واقعی گره ۲۱ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۴
- نمودار (الف-۱۷) تغییر مکان واقعی گره ۲۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

زیرساخت‌های عمرانی^۱، توانایی فعالیت برای جامعه فراهم می‌کنند و شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، کارخانه‌ها، نیروگاه‌ها، تاسیسات نفتی ساحلی، سازه‌های میراث فرهنگی، بندرها، سازه‌های خاکی و غیره می‌باشند. [۱]

امروزه با توسعه سریع دانش و تکنولوژی، ابرسازه‌های^۲ مهندسی و زیرساخت‌های مهم زیادی ساخته شده‌اند. این سازه‌ها، معمولاً طراحی پیچیده‌ای دارند و تحت تاثیر استفاده بیش از حد، افزایش طول عمر مصالح، بلاهای طبیعی و غیره قرار دارند. در اثر این اندرکنش‌ها، توانایی آن‌ها برای مقاومت در برابر حوادث کاهش خواهد یافت. بنابراین، نظارت تغییرات وضعیت سازه، برای تشخیص موقعیت و میزان تخریب احتمالی بسیار مهم است. [۲]

سازه باید نیازهای ایمنی، دوام، سرویس پذیری و پایداری را برای عملکرد دراز مدت برآورده کند. در طول مدت خدمت، سازه وقتی که تحت تاثیر بلاهای طبیعی یا حوادث دیگر قرار می‌گیرد، ممکن است به آرامی دچار زوال شود، یا به شدت آسیب ببیند و یا حتی کاملاً تخریب شود. تکنولوژی نظارت بر سلامتی سازه‌ها (SHM^۳)، راهی برای ارزیابی ایمنی و دوام سازه در طول عمر آن، برای تضمین سرویس پذیری و پایداری فراهم می‌کند. [۳]

نظارت بر سلامتی سازه‌ها، شامل اندازه‌گیری‌های درجا، پیوسته یا دوره‌ای و تحلیل پارامترهای کلیدی سازه‌ای و محیطی سازه‌ی در حال استفاده، به منظور هشدار حالات غیرعادی محتمل یا حوادث در مراحل اولیه و همچنین ارائه اطلاعات، جهت نگهداری و بازسازی سازه، توسط لی^۴ و همکارانش تعریف شده است. [۴]

۱- civil infrastructures

۲- mega structures

۳- Structural Health Monitoring

۴- Li

سیستم SHM شامل سنسورها، دستگاه‌های اکتساب داده^۱ و ارسال پیام، پایگاه داده^۲ برای مدیریت موثر داده‌ها و تشخیص سلامتی (شامل پردازش داده^۳، داده کاوی^۴، ردیابی آسیب، به‌روز رسانی مدل و ارزیابی ایمنی) می‌باشد. توسعه‌های مهم در زمینه SHM از ساخت و سازهای عمده، مثل سدهای عظیم، پل‌های کابلی بلند، تاسیسات فرآورده‌های نفتی گازی فرا ساحلی، نشست گرفته است.

از اهداف نظارت بر سلامتی سازه‌ها می‌توان موارد زیر را برشمرد: [۵]

۱. اصلاح سازه موجود
۲. نظارت در طول تخریب سازه
۳. نظارت سازه‌های تحت فرسایش مصالح
۴. ارزیابی یکپارچگی سازه بعد از زلزله
۵. کاهش در ساخت و افزایش در نیازهای نگهداری
۶. بازخورد برای طراحی اصلاح شده در آینده بر اساس تجربه بدست آمده از نظارت سازه موجود

۱-۲- بیان مسئله و اهداف پروژه

بسیاری از زیرساخت‌های عمرانی در حال نزدیک شدن به طول عمر مفید اولیه طراحی خود می‌باشند و یا از آن تجاوز کرده‌اند. یکی از این زیرساخت‌های مهم، پل‌ها هستند. به خاطر پیامدهای اقتصادی، این سازه‌های عمرانی علی‌رغم فرسودگی و افزایش صدمات مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، توانایی نظارت سلامتی این سازه‌ها به صورت روزافزون مهم می‌باشد.

نظارت بر سلامتی سازه، روشی موثر برای اطمینان از ایمنی سازه فراهم می‌آورد. با این حال، به علت وجود محدودیت در هزینه سیستم سنسورها و پردازش داده، فقط تعداد کمی از سنسورها در

۱- data acquisition

۲- database

۳- data processing

۴- data mining

سیستم نظارت بر سلامتی (HMS)^۱ قابل استفاده خواهد بود. به منظور شناسایی هرچه بهتر ویژگی‌های سازه، مکان‌یابی بهینه سنسورها (OSP)^۲ عملی اجتناب ناپذیر در طراحی سیستم نظارت بر سلامتی می‌باشد. سیستم سنسورها یک بخش اساسی از سیستم نظارت بر سلامتی است که برای تحلیل مکانیکی سازه (مانند شناسایی پارامتر، تشخیص آسیب و ارزیابی شرایط) کاملاً وابسته به داده‌های به دست آمده از سنسورها می‌باشد. با این وجود، تعداد سنسورهای نصب شده در یک سازه، به شدت توسط هزینه‌های مربوط به سیستم‌های اکتساب داده، پردازش داده‌های همراستا^۳ و همچنین نصب و راه اندازی اولیه سنسورها، محدودیت استفاده کامل از سیستم نظارت بر سلامتی برای ارزیابی یکپارچگی سازه، دوام و قابلیت اطمینان و غیره محدود می‌شود. بنابراین، چگونگی استقرار تعداد محدود سنسورها در طراحی و ساخت سیستم نظارت بر سلامتی سازه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. [۶]

با توجه به وجود حجم زیادی از اطلاعات اضافی، همه درجات آزادی یک سازه جهت نصب سنسورها، ضروری نیستند. مکان‌یابی بهینه سنسورها به این موضوع می‌پردازد که چه تعداد و کدام درجات آزادی از مجموعه بی‌نهایت درجات آزادی یک سازه، نیاز به نصب سنسور دارند، و به بیان دیگر، هدف مکان‌یابی بهینه سنسورها را می‌توان این‌چنین بیان نمود: از بین بردن درجات آزادی غیر ضروری تا اندازه‌ای که ممکن است، در حالی که درجات آزادی باقیمانده، اطلاعات کافی برای توضیح رفتار سازه با دقت کافی ارائه دهند. [۷]

در این پروژه در نظر است مسئله‌ی انتخاب محل سنسورها بر روی سازه، مورد بررسی قرار گیرد. سازه در نظر گرفته شده برای این مسئله پل راه‌آهن می‌باشد. بدین منظور، ابتدا مدل اجزای محدودی از سازه ایجاد می‌شود. سپس، بر اساس این مدل، محل بهینه سنسورها تعیین شده و در این محل‌ها بر روی سازه، سنسور نصب می‌گردد. با اکتساب داده‌ها از سنسورها، اطلاعات و ویژگی‌هایی از سازه

Health Monitoring System-۱

Optimal Sensor Placement -۲

in-line -۳

بدست می‌آید. این اطلاعات و ویژگی‌ها با اطلاعات و ویژگی‌های مدل اجزای محدود مطابقت داده شده و در صورت لزوم، مدل به‌روزرسانی می‌شود تا بتواند رفتار سازه را به درستی بیان کند. از این پس به کمک مدل اجزای محدودی سازه می‌توان وضعیت سازه را از نظر آسیب‌های احتمالی بررسی کرد و یا رفتار سازه را در اثر آسیب‌ها پیش‌بینی نمود. البته همانطور که اشاره شد، در این پروژه فقط مکان‌یابی بهینه سنسورها مورد نظر است.

جهت مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه‌ها، روش‌های مختلفی بیان شده است. برای مثال روش EI^1 توسط کمر^۲ [۸] عنوان شده است. روشی دیگر در مرجع [۹] به نام $minMAC^3$ برای مکان‌یابی بهینه سنسورها ارائه شده است. همچنین در مرجع [۱۰] روش $EI-DPR^4$ معرفی شده است. روش SVD^5 نیز در مرجع [۱۱] برای بهینه‌یابی محل سنسورها به کار رفته است. این روش‌ها و تعدادی دیگر از روش‌های مکان‌یابی سنسورها در فصل دوم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اکثر روش‌های مکان‌یابی سنسورها به منظور دستیابی به بهترین میزان حساسیت نسبت به تغییرات علایم بیانگر آسیب، یا بهترین حالت شناسایی خصوصیات سازه شامل فرکانس‌های ارتعاش، اشکال مودی و همچنین نسبت استهلاک ابداع شده‌اند. [۱۲]

بر اساس دینامیک سازه‌ها [۱۳] و مرجع [۶] مسئله مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه را می‌توان طبق فرمول زیر به صورت ریاضی بیان کرد:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = \Phi^T p(t) \quad (1-1)$$

$$y = \Phi x$$

که در آن $x \in R^n$ مختصات مودال، $M, C, K \in R^{n \times n}$ به ترتیب ماتریس جرم، استهلاک و سختی سازه، $\Phi \in R^{n \times n}$ ماتریس شکل مودی، $p \in R^n$ بردار نیروی وارد بر سازه و $y \in R^n$ بردار جابجایی می‌باشند.

۱- Effective Independence

۲- Kammer

۳- minimum Modal Assurance Criterion

۴- Effective Independence Driving Point Residue

۵- Singular Value Decomposition

بنابراین، مسئله مکان‌یابی بهینه سنسورها، انتخاب m ردیف از ماتریس شکل مودی هدف Φ_s برای بهترین تخمین از ماتریس شکل مودی سازه Φ می‌باشد. ماتریس شکل مودی هدف با حذف ردیف‌ها و ستون‌های بردار شکل مودی کم اهمیت از ماتریس شکل مودی بدست می‌آید. همانطور که در این مسئله قابل مشاهده است، از ماتریس شکل مودی برای بهینه‌یابی محل سنسورها استفاده می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که در برخی پل‌ها جرم وسیله نقلیه نسبت به جرم پل قابل توجه است و نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد. همچنین در اثر حرکت وسیله نقلیه بر روی پل، در هر لحظه که موقعیت وسیله تغییر می‌کند، ویژگی‌های دینامیکی پل (منظور فرکانس‌ها و اشکال مودی) نیز تغییر می‌کنند. بنابراین، برای بهینه‌یابی محل سنسورها، با بی‌نهایت شکل مودی متفاوت روبرو هستیم. در واقع چون شکل‌های مودی پل مدام در حال تغییر هستند، نمی‌توان با یک شکل مودی ثابت محل بهینه سنسورها را تعیین کرد. بنابراین، مسئله اصلی در مکان‌یابی بهینه سنسورها برای سازه‌هایی که دارای شکل مودی متغیر هستند، این است که، با توجه به متغیر بودن ویژگی‌های سازه، چگونه محل بهینه سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه تعیین شود.

ترتیب انجام پروژه، بدین صورت می‌باشد: در فصل دوم کارهای گذشته در خصوص مکان‌یابی سنسورها مرور خواهد شد. سپس، در فصل سوم در مورد تئوری روش EI، جهت بهینه‌یابی محل سنسورها توضیحاتی ارائه می‌شود، و پس از آن، روش‌های پیشنهادی برای بهبود مکان‌یابی با توجه به متغیر بودن ویژگی‌های سازه توضیح داده می‌شود. در فصل چهارم شبیه سازی‌های عددی برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی ارائه خواهد شد. همچنین مکان‌یابی سنسورها برای یک پل راه‌آهن، تشریح خواهد شد و نتایج بدست آمده از روش‌ها ارائه و با هم مقایسه خواهند شد. در نهایت، در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای کارهای آینده ارائه می‌شود.

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مروری بر کارهای گذشته

روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی بهینه سنسورها وجود دارد. در این فصل مروری بر برخی از روش‌ها و کاربرد آن‌ها در سازه‌های مختلف به طور خلاصه آورده شده است.

ساده‌ترین و احتمالاً ابتدایی‌ترین روش مکان‌یابی سنسورها، با مشاهده شکل مودی میسر شده است. بدین صورت که پس از مشاهده‌ی شکل‌های مودی مورد نظر، مکان‌هایی که دارای بیشترین دامنه ارتعاش می‌باشند به عنوان محل بهینه سنسورها در نظر گرفته می‌شود. اما این روش فقط برای سازه‌های ساده کاربرد دارد.

روش MKE^1 نیز بر اساس مشاهده شکل‌های مودی ایجاد شده است. انرژی جنبشی مودال برای درجه آزادی n ام در مود n ام با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$MKE_{in} = \varphi_{in} \sum_j M_{ij} \varphi_{jn} \quad (2-1)$$

φ_{in} درایه سطر n ام در بردار شکل مودی n ام، M_{ij} درایه سطر n ام و ستون j ام ماتریس جرم و φ_{jn} درایه j ام بردار شکل مودی n ام می‌باشند. پس از محاسبه انرژی جنبشی مودال برای درجات آزادی در موده‌های مورد نظر، مکان‌هایی که دارای بیشترین انرژی جنبشی مودال می‌باشند، انتخاب می‌شوند. [۸ و ۱۴]

ممکن است یک درجه آزادی در یکی از موده‌ها شدیداً ارتعاش کند و در موده‌های دیگر ارتعاش کمی داشته باشد یا ارتعاش نکند. با استفاده از روش MKE انرژی جنبشی مودال برای درجه آزادی در مودی که ارتعاش نمی‌کند صفر شده و محل آن برای نصب سنسور انتخاب نخواهد شد. روش $AMKE^2$ با گرفتن میانگین انرژی جنبشی مودال درجات آزادی در شکل‌های مودی مورد نظر، این مشکل را برطرف کرده است. متوسط انرژی جنبشی مودال برای درجه آزادی n ام از رابطه صفحه بعد بدست می‌آید:

۱- Modal Kinetic Energy
۲- Average Modal Kinetic Energy

$$AMKE_i = \frac{1}{m} \sum_n MKE_{in} \quad (2-2)$$

که m تعداد موده‌های در نظر گرفته شده است. محل درجات آزادی دارای بیشترین متوسط انرژی جنبشی مودال برای نصب سنسورها انتخاب می‌شوند. [۱۴و۸]

روش DPR^1 یکی دیگر از روش‌های مکان‌یابی سنسورها می‌باشد. این روش مشابه روش MKE است. مقدار DPR_{in} بیانگر میزان ارتعاش درجه آزادی i ام در مود n ام می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DPR_{in} = \varphi_{in} \sum_j \varphi_{ij} \omega_{jn} \quad (2-3)$$

و در آن ω_{jn} درایه j ام و n ام ماتریس قطری فرکانس سازه می‌باشد. درجات آزادی دارای بیشترین مقدار DPR برای سنسورها در نظر گرفته می‌شوند. [۱۵]

مانند روش $AMKE$ می‌توان متوسط مقادیر DPR ($ADPR^2$) را برای درجات آزادی در همه فرکانس‌های ارتعاش سازه در نظر گرفت:

$$ADPR_i = \frac{1}{m} \sum_n DPR_{in} \quad (2-4)$$

بدین ترتیب، مکان‌های دارای مقادیر بزرگ‌تر متوسط $ADPR_i$ انتخاب می‌شوند. [۱۵]

از دیگر روش‌های مکان‌یابی سنسورها می‌توان به روش EVP^3 اشاره کرد. در این روش با ضرب کردن متوالی قدر مطلق درایه‌های هر یک از ردیف‌های ماتریس شکل مودی، معیاری برای تعیین محل سنسورها بدست می‌آید. EVP_i با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EVP_i = \prod_{n=1}^m |\varphi_{in}| \quad (2-5)$$

φ_{in} درایه سطر i ام و ستون n ام ماتریس شکل مودی است. محل درجات آزادی دارای بزرگ‌ترین مقادیر EVP_i برای سنسورها در نظر گرفته می‌شوند. [۱۴]

۱- Driving Point Residue
۲- Average Driving Point Residue
۳- Eigenvector Component Product

روشی مشابه روش EVP در مرجع [۱۶] بیان شده است. در این روش که MSSP^۱ نام دارد، به جای ضرب کردن متوالی قدر مطلق ردیف‌های ماتریس شکل مودی، مجموع قدر مطلق ردیف‌ها محاسبه شده و بزرگ‌ترین مقادیر، به عنوان محل‌های بهینه سنسورها معرفی می‌شوند. مقدار MSSP_i از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$MSSP_i = \sum_{n=1}^m |\varphi_{in}| \quad (۲-۶)$$

روش GRM^۲ یکی دیگر از روش‌های مکان‌یابی سنسورها است [۱۷]. در این روش درجات آزادی سازه به دو دسته اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. در درجات آزادی فرعی نیروی اینرسی در مقایسه با نیروی الاستیک قابل صرف‌نظر کردن است. اگر نسبت $\frac{k_{ii}}{m_{ii}}$ کوچک باشد، یعنی میزان نیروی اینرسی در مقایسه با نیروی الاستیک زیاد بوده و درجه آزادی متناظر با آن اصلی می‌باشد و در مقابل، اگر نسبت $\frac{k_{ii}}{m_{ii}}$ بزرگ باشد درجه آزادی متناظر با آن فرعی بوده و باید حذف شود. پس از حذف بزرگ‌ترین درجه آزادی فرعی در هر مرحله، ماتریس کاهش یافته سختی و جرم (با استفاده از تکنیک کاهش گویان [۱۸]) تشکیل شده و بزرگ‌ترین درجه آزادی فرعی دوباره حذف می‌شود. این تکرار ادامه می‌یابد تا تعداد مورد نظر سنسورها حاصل شود.

روش EI در سال ۱۹۹۱ توسط کمر بیان شده است. این روش بر اساس شناسایی پارامترهای مودال سازه‌های فضایی درمدار، ارائه شده است. در روش EI ابتدا مدل اجزای محدودی از سازه ارائه شده و ماتریس شکل مودی بدست می‌آید. دوران درجات آزادی دورانی و همچنین تغییر مکان درجات آزادی غیر قابل دسترس در سازه، قابل اندازه‌گیری نیستند. بنابراین، ردیف‌های متناظر با آن‌ها از ماتریس شکل مودی حذف می‌شود. همچنین همه مودهای ارتعاشی دارای اهمیت نیستند. پس مودهای کم اهمیت نیز از ماتریس شکل مودی حذف می‌شوند. بنابراین، ماتریس شکل مودی هدف φ_s به ابعاد $m \times n$ که $m > n$ تشکیل می‌شود.

Mode Shape Summation Plot -۱
Guyan Reduction Method -۲

ماتریس اطلاعات فیشر (FIM)^۱ برابر است با:

$$FIM = \varphi_s^T \varphi_s \quad (۷-۲)$$

اگر دترمینان FIM صفر باشد به این معنی است که ستون‌های ماتریس φ_s کاملاً وابسته خطی هستند. بنابراین، هدف روش EI ماکزیمم کردن دترمینان FIM می‌باشد. ماتریس E به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$E = \varphi_s (FIM)^{-1} \varphi_s^T \quad (۸-۲)$$

ماتریس E دارای این خاصیت است که رتبه آن با اثر آن برابر است. لذا، هر درایه قطری آن، بیانگر میزان سهم آن در رتبه ماتریس می‌باشد. با توجه به این نکته که رتبه ماتریس برابر تعداد ستون‌های مستقل خطی یک ماتریس است، کوچک‌ترین درایه قطری ماتریس E و ردیف متناظر با آن در ماتریس φ_s که کمترین میزان مشارکت در استقلال خطی موده‌های هدف را دارد، حذف می‌شود. دوباره ماتریس E با توجه به ماتریس کاهش یافته φ_s محاسبه شده و کوچک‌ترین درایه قطری آن حذف می‌شود. در یک روش تکراری مکان‌هایی که مشارکت آن‌ها در استقلال خطی موده‌های ماتریس شکل مودی هدف ناچیز است، حذف شده و در نهایت، محل نهایی سنسورها تعیین می‌شود. برای تعیین تعداد سنسورهای مورد نیاز، می‌توان نمودار دترمینان ماتریس اطلاعات فیشر را برحسب تعداد سنسورها رسم کرد. چنانچه با افزایش تعداد سنسورها، افزایش دترمینان ماتریس فیشر قابل توجه نباشد، این تعداد را می‌توان تعداد مورد نیاز سنسورها در نظر گرفت. [۸]

روش وزن دار شده EI در مرجع [۱۹] با نام EIWM^۲ ارائه شده است. محاسبات روش EIWM مانند روش EI است، با این تفاوت که ماتریس جرم در ماتریس اطلاعات فیشر به صورت زیر وارد می‌شود:

$$FIM = \varphi_s^T M \varphi_s \quad (۹-۲)$$

۱- Fisher Information Matrix

۲- Effective Independence with Mass

که M ماتریس جرم مدل اجزای محدود سازه است. بنابراین، ماتریس E به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$E = M^{0.5} \varphi_s (\varphi_s^T M \varphi_s)^{-1} \varphi_s^T M^{0.5} \quad (10-2)$$

در هر مرحله، کوچک‌ترین درایه ماتریس E و ردیف متناظر با آن در ماتریس φ_s حذف می‌شود. ردیف متناظر با درجه آزادی حذف شده در ماتریس M نیز توسط تکنیک کاهش ماتریس گویان حذف می‌شود. تکرار ادامه می‌یابد تا به تعداد مورد نظر سنسورها دست یافته شود.

روش SVD در مرجع [۱۱] با ماکزیمم کردن دترمینان ماتریس اطلاعات فشر به یافتن مکان بهینه سنسورها می‌پردازد. پس از تشکیل ماتریس شکل مودی هدف و کاهش ردیف‌های آن به تعداد محل نمایندگان سنسورها، ماتریس φ_s^r ایجاد می‌شود. سپس، با تجزیه مقادیر منفرد این ماتریس:

$$\varphi_s^r = U S V^T \quad (11-2)$$

و با محاسبه R به صورت زیر:

$$R = \text{diag}(U U^T) \quad (12-2)$$

کوچک‌ترین درایه این ماتریس حذف شده و ردیف متناظر آن در ماتریس φ_s^r نیز حذف می‌شود. تجزیه مقادیر منفرد ماتریس جدید φ_s^r با فرمول (۱۱-۲) محاسبه و ماتریس R نیز با فرمول (۱۲-۲) بدست می‌آید و دوباره کوچک‌ترین مقدار حذف می‌شود. تکرار، تا رسیدن به تعداد سنسور مورد نظر ادامه می‌یابد.

در روش EI مکان‌های انتخاب شده برای سنسورها بدون توجه به موقعیت و میزان ارتعاش آن‌ها بدست می‌آید. تنها معیار انتخاب درجات آزادی، میزان مشارکت در استقلال خطی ماتریس شکل مودی است. بنابراین، ممکن است مکان‌هایی برای سنسورها بدست آید که ارتعاش کمی در مودها داشته باشند و این امر شناسایی مودها را دچار مشکل می‌کند. روش EI-DPR با ضرب کردن ماتریس DPR در ماتریس E این مشکل را برطرف کرده است. ماتریس K به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \text{diag}(\varphi_s (\varphi_s^T \varphi_s)^{-1} \varphi_s^T \varphi_s \times \varphi_s \omega) \quad (13-2)$$

① ماتریس قطری فرکانس‌های مودی و علامت $\times$ بیانگر ضرب درایه‌های نظیر در ماتریس‌ها است. ماتریس K مشابه ماتریس E در روش EI است، با این تفاوت که درایه‌های آن در میزان ارتعاش درجات آزادی متناظر ضرب شده‌اند. در این روش مانند روش EI ، در هر مرحله، کوچک‌ترین درایه قطری ماتریس K حذف می‌شود. بنابراین، مکان‌هایی برای سنسورها بدست می‌آید که بیشترین مشارکت در استقلال خطی موده‌های هدف را دارند و همچنین دارای بیشترین دامنه ارتعاش هستند. [۱۱]

از دیگر روش‌های مکان‌یابی سنسورها می‌توان به روش $EMRO^1$ اشاره کرد. ایده به کار رفته در این روش این است که، مکان‌هایی برای سنسورها انتخاب شوند که درجات آزادی متناظر با آن‌ها دارای بیشترین انرژی کرنشی در موده‌های ارتعاشی باشند. با استفاده از تجزیه چولسکی ماتریس سختی سازه به صورت زیر:

$$K=CD \quad (۱۴-۲)$$

که K ماتریس سختی سازه، C و D به ترتیب ماتریس‌های پایین مثلثی و بالا مثلثی هستند. ماتریس انرژی کرنشی سازه برابر است با:

$$SE=\Psi^T\Psi \quad (۱۵-۲)$$

که در آن:

$$\Psi=D\varphi_s \quad (۱۶-۲)$$

مقادیر ویژه (λ) و بردارهای ویژه (v) ماتریس SE را محاسبه کرده و با محاسبه بردار $EMRO$ به صورت زیر:

$$EMRO_k=\sum_r \left[\Psi v \lambda^{-1/2} \right]_{k,r}^2 \quad (۱۷-۲)$$

هر درایه بردار EMRO بیانگر سهم درجه آزادی متناظر در میزان انرژی کرنشی است. لذا، کوچک‌ترین درایه حذف شده و ردیف متناظر با آن در ماتریس شکل مودی هدف حذف می‌شود. همچنین ردیف متناظر در ماتریس سختی K با تکنیک کاهش گویان حذف می‌شود. دوباره ماتریس E تشکیل شده و کوچک‌ترین درایه حذف می‌شود. این تکرار تا رسیدن به تعداد سنسور مورد نظر ادامه می‌یابد. [۲۰]

روش KEMRO^۱ مشابه روش EMRO است، با این تفاوت که هدف آن ماکزیمم کردن انرژی جنبشی می‌باشد. اگر انرژی جنبشی سازه به صورت زیر بیان شود:

$$KE = \Phi^T M \Phi \quad (۱۸-۲)$$

با تجزیه چولسکی ماتریس جرم M:

$$M = LU$$

$$\Psi = U \Phi$$

$$KE = \Psi^T \Psi \quad (۱۹-۲)$$

پس از محاسبه مقادیر ویژه (λ) و بردارهای ویژه (Λ) ماتریس انرژی جنبشی، بردار EOT به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$EOT_i = \sum_j \left[\Psi \Lambda \lambda^{-1/2} \right]_{i,j}^2 \quad (۲۰-۲)$$

هر درایه در بردار EOT بیانگر سهم درجه آزادی متناظر در انرژی جنبشی است. کوچک‌ترین درایه حذف شده، ردیف متناظر آن در ماتریس شکل مودی حذف می‌شود. محاسبات تکرار شده و تا رسیدن به تعداد سنسور مورد نظر ادامه می‌یابد. [۲۱]

روش minMAC در مرجع [۹] از دیگر روش‌های استفاده شده برای بهینه‌یابی محل سنسورها می‌باشد که دارای کاربرد زیادی است. این روش بر اساس همبسته کردن شکل‌های مودی مدل اجزای محدودی سازه و نتایج بدست آمده از آزمایش مودال به وجود آمده است. برای همبستگی بین

شکل‌های مودی مدل اجزای محدود و شکل‌های مودی بدست آمده از آزمایش، باید بتوان بردارهای شکل مودی را از یکدیگر تشخیص داد. با توجه به این نکته از ضرب داخلی بردارها که، اگر کسینوس زاویه بین دو بردار کوچک و نزدیک به صفر باشد بردارها قابل تمایز هستند، باید محل‌هایی برای سنسورها انتخاب شود که کسینوس زاویه بین بردارهای شکل مودی تا حد امکان کوچک باشد.

در این روش از معیار اطمینان مودال (MAC^1) به صورت زیر کمک گرفته شده است:

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (2-21)$$

که ϕ_i و ϕ_j به ترتیب بردار شکل مودی موده‌های i ام و j ام می‌باشند.

بنابراین، باید محل سنسورها طوری انتخاب شود که درایه‌های غیر قطری ماتریس MAC کوچک باشند. بدین منظور، ابتدا دسته کوچکی از محل سنسورها بر اساس تجربه و هندسه سازه انتخاب شده و ماتریس MAC محاسبه می‌گردد. سپس، در هر مرحله، یک مکان سنسور اضافه می‌شود تا درایه‌های غیر قطری ماتریس MAC تا حد امکان کوچک شوند. این تکرار ادامه می‌یابد تا تعداد مورد نظر سنسورها حاصل شود.

یکی از مشکلاتی که ممکن است روش $minMAC$ داشته باشد این است که، با افزایش تعداد محل سنسورها در هر مرحله، درایه ماکزیمم غیر قطری ماتریس MAC کاهش نیابد. برای رفع این مشکل در مرجع [۲۲] الگوریتم توسعه یافته روش $minMAC$ به نام $Extended minMAC$ معرفی شده است. در این الگوریتم، مشابه روش $minMAC$ ابتدا دسته کوچکی از محل سنسورها انتخاب می‌شود. سپس، در هر مرحله، مکان سنسورها اضافه شده تا به تعداد مکان‌های بیشتر از تعداد سنسورهای مورد نظر دست یافته شود. بعد، در هر مرحله، یک محل سنسور حذف شده تا تعداد مورد نیاز مکان سنسورهای در نظر گرفته شده حاصل شود. پس از آن، دو منحنی، یکی ماکزیمم درایه‌ی غیر قطری ماتریس MAC بر حسب افزایش تعداد سنسورها و دیگری بر حسب کاهش تعداد

سنسورها رسم می‌شود. با مقایسه بین این دو منحنی در محل تعداد سنسور مورد نظر، منحنی که دارای مقدار کمتر ماکزیمم درایه غیر قطری ماتریس MAC می‌باشد، انتخاب می‌شود.

روش تجزیه QR^۱ در مرجع [۲۳] به عنوان یکی دیگر از روش‌های مکان‌یابی سنسورها ارائه شده است. ایده استفاده شده در این روش این است که، با تجزیه QR ماتریس شکل مودی، ردیف‌هایی از آن انتخاب شوند که بیشترین استقلال خطی را از یکدیگر داشته باشند. به این ترتیب، درایه‌های غیر قطری ماتریس MAC مکان‌های انتخاب شده، دارای کمترین مقدار خواهند بود.

مکان‌یابی بهینه سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه‌ها با بهره‌گیری از چند روش بهینه‌یابی در مرجع [۲۴] بیان شده است. در این الگوریتم ترکیبی، ابتدا به کمک روش تجزیه QR محل اولیه برای سنسورها تعیین می‌شود. سپس، با به کار گیری روش minMAC تعداد مورد نیاز سنسورها بدست می‌آید. در نهایت محل سنسورها با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک تعمیم یافته تعیین خواهد شد. این الگوریتم ترکیبی به صورت یک بسته نرم‌افزاری به نام OSPS Toolbox به کمک برنامه متلب^۲ کد نویسی شده است. با استفاده از این الگوریتم ترکیبی و نرم‌افزار آن، تعداد و محل بهینه سنسورها برای برج مخابراتی گوانجو^۳ تعیین شده است.

در مراجع [۲۵ و ۲۲] رابطه بین روش‌های EI و MKE، و همچنین رابطه بین روش‌های EI و QR بیان شده است. اگر توزیع جرم سازه یکنواخت باشد، هر دو روش EI و MKE نتایج مشابهی ارائه می‌کنند. اگر ماتریس جرم سازه معادل ماتریس همانی در نظر گرفته شود شاخص MKE را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$MKE = \text{diag}(\Phi \Phi^T) \quad (2-22)$$

اگر تجزیه QR ماتریس شکل مودی Φ در نظر گرفته شود:

$$\Phi = QR \quad (2-23)$$

۱- QR Decomposition Method

۲- Matlab

۳- Guangzhou

می توان ماتریس E را به صورت زیر نوشت:

$$E = \text{diag}(QR[R^T Q^T QR]^{-1} R^T Q^T = \text{diag}(QQ^T)) \quad (24-2)$$

بنابراین، روش EI را می توان روش تکراری MKE بیان نمود. در هر مرحله، از روش EI شاخص MKE محاسبه شده و کوچک ترین آن حذف می شود. در روش تجزیه QR ردیف های درجات آزادی انتخاب شده از ماتریس شکل مودی دارای بیشترین استقلال خطی هستند، در حالی که روش EI بر روی ماتریس شکل مودی عمل می کند تا ماتریس نهایی بدست آمده دارای ستون های مستقل خطی باشد.

در مرجع [۲۶] اثر عدم قطعیت های پارامتری در روش های مکان یابی بهینه سنسورها بررسی شده است. عدم قطعیت پارامتری در واقع اختلاف بین مقدار واقعی یک پارامتر و مقدار آن در مدل تحلیلی می باشد. در این مرجع، مدول یانگ، جرم و ابعاد مقاطع یک پل خریابی به عنوان پارامترهای غیر قطعی در نظر گرفته شده اند. اثر این عدم قطعیت ها در مکان یابی بهینه سنسورها بر روی سازه ی پل خریابی مورد ارزیابی قرار گرفته است. چهار روش متداول بهینه یابی محل سنسورها (EI ، $EIWM$ ، $EMRO$ و $KEMRO$) به کار رفته است. شبیه سازی مونت کارلو^۱ برای اعمال عدم قطعیت ها به کار گرفته شد. عدم قطعیت ها باعث پراکندگی فرکانس های سازه شدند. همچنین شکل های مودی نیز دستخوش تغییرات زیادی قرار گرفتند. عدم قطعیت ها تاثیر قابل توجهی بر روی مکان های بدست آمده توسط روش های مختلف داشت. نکته ای که در این مقاله قابل ذکر است این است که، برخی محل سنسورها با وجود عدم قطعیت ها در تمام مراحل شبیه سازی انتخاب شدند.

روش PSS^2 در مرجع [۲۷] یکی دیگر از روش های به کار رفته برای مکان یابی بهینه سنسورها است. با فرض m به طوری که:

$$m \leq \text{rank}(\phi_s^T) \quad (25-2)$$

۱- Monte Carlo simulation

۲- Principal Subset Selection

با تجزیه مقادیر تکین ماتریس شکل مودی به صورت زیر:

$$U^T \Phi_s^T V = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m) \quad (26-2)$$

که σ_i مقادیر تکین ماتریس Φ_s^T می‌باشند. با تجزیه QR ماتریس V :

$$VE = QR \quad (27-2)$$

E ماتریس تبدیل است. درجات آزادی متناظر با ردیف‌های متوالی دارای درایه‌های ناصفر در m ستون اول ماتریس E محل بهینه سنسورها هستند.

مشکلی که روش PSS دارد این است که، نمی‌توان تعداد سنسور بیشتر از تعداد مودهای در نظر گرفته شده انتخاب کرد. روش ارائه شده در مرجع [۶] این مشکل را برطرف کرده است. ابتدا محل اولیه سنسورها با روش PSS تعیین می‌شود. سپس، یک محل سنسور به محل‌های اولیه اضافه شده و ماتریس E با کمک روش EI محاسبه می‌شود. کوچک‌ترین درایه ماتریس E ذخیره می‌گردد. دوباره یک محل دیگر به محل‌های اولیه سنسورها اضافه شده و ماتریس E محاسبه می‌شود. کوچک‌ترین درایه ماتریس E ذخیره می‌شود. این کار برای تمام نمایندگان محل سنسورها تکرار می‌شود. درجه آزادی متناظر با بزرگ‌ترین درایه از بین کوچک‌ترین درایه‌های ذخیره شده به عنوان محل سنسور در نظر گرفته می‌شود. تکرار، تا رسیدن به تعداد سنسور مورد نظر ادامه می‌یابد.

۲-۲- ارزیابی روش‌های مکان‌یابی سنسورها

در بخش قبل روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی سنسورها بیان شد. هر یک از این روش‌ها مکان‌های مختلفی را برای سنسورها انتخاب می‌کنند. لذا، معیاری برای مقایسه‌ی کارایی روش‌های مختلف مورد نیاز است. در این بخش چهار معیار متداول برای ارزیابی روش‌ها بیان می‌شود.

۲-۲-۱- معیار MAC

برای اینکه بردارهای شکل مودی قابل تمایز باشند، باید تا حد امکان مستقل خطی باشند. معیار MAC طبق رابطه (۲-۲۱) میزان استقلال خطی بردارهای شکل مودی را بیان می‌کند. درایه‌های ماتریس MAC دارای مقداری بین صفر و یک هستند. اگر دو بردار دارای جهات یکسان باشند و یا

جهات آن‌ها نزدیک به هم باشد، مقدار MAC برابر یک و یا نزدیک به یک خواهد بود. در مقابل، هرچه استقلال خطی بردارها بیشتر باشد مقدار MAC نزدیک به صفر می‌شود. بنابراین، هرچه درایه‌های غیر قطری این ماتریس کوچک‌تر باشد محل سنسورهای بدست آمده بهتر است.

۲-۲-۲- معیار RMS^۱

معیار RMS از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i \neq j} \varphi_{ij}^2} \quad (28-2)$$

مشابه معیار MAC، هرچه مقدار RMS کوچک‌تر باشد، میزان استقلال بردارهای شکل مودی بیشتر است. با این حال، RMS معیار بهتری برای اندازه‌گیری میزان استقلال مودها نسبت به معیار MAC می‌باشد. [۶]

۲-۲-۳- معیار SVDR^۲

این معیار نیز بیانگر میزان استقلال خطی شکل‌های مودی در محل بهینه سنسورها است. اگر تجزیه مقادیر تکین ماتریس شکل مودی مکان‌های بدست آمده برای سنسورها در نظر گرفته شود:

$$U^T \varphi_f V = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \quad (29-2)$$

مقدار SVDR به صورت زیر بدست می‌آید:

$$SVDR = \frac{\sigma_1}{\sigma_n} \quad (30-2)$$

که σ_1 و σ_n به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر تکین ماتریس شکل مودی محل بدست آمده سنسورها است. مقدار حد پایین این نسبت برابر یک است و به این معنی است که بردارهای شکل مودی نرمال و متعامد هستند. بنابراین، هرچه این نسبت کوچک‌تر باشد محل سنسورهای بدست آمده بهتر است.

۱- Root Mean Square of MAC

۲- Singular Value Decomposition Ratio

همچنین، معیار SVDR به عنوان معیار بهتر، برای ارزیابی مکان سنسورها معرفی شده است. [۱۷]

۲-۲-۴- دترمینان ماتریس اطلاعات فیشر

دترمینان ماتریس اطلاعات فیشر بیانگر میزان اطلاعات بدست آمده از سازه است:

$$FIM = \Phi_f^T \Phi_f \quad (۳۱-۲)$$

Φ_f ماتریس شکل مودی محل‌های انتخاب شده برای سنسورها است. بنابراین، هرچه دترمینان این ماتریس بزرگ‌تر باشد، میزان اطلاعات بدست آمده از سازه بیشتر است و محل‌های انتخاب شده برای سنسورها بهتر هستند.

فصل سوم

توسعه‌های پیشنهادی

۳-۱- بیان روش کلاسیک EI

بر اساس دینامیک سازه‌ها، پاسخ سازه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V = \Phi Y \quad (۱-۳)$$

که در آن

V : بردار جابجایی،

Φ : ماتریس شکل مودی سازه و

Y : مختصات مودال می‌باشد.

با توجه به فرمول (۱-۳) اندازه بدست آمده از سنسورها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$u = \varphi_s q + \epsilon \quad (۲-۳)$$

که در آن

u : اندازه بدست آمده از سنسورها،

φ_s : ماتریس شکل مودی هدف مدل اجزای محدود در محل گره‌هایی که سنسور نصب شده،

q : مختصات مودال می‌باشد و

ϵ : خطای اندازه‌گیری که برداری تصادفی با توزیع نرمال، میانگین صفر و واریانس σ^2 در نظر گرفته می‌شود.

مقدار q نامشخص می‌باشد. لذا، می‌توان از روی ماتریس φ_s برآوردی از q بدست آورد. با در نظر

گرفتن برآوردگر BLUE^۱:

$$\hat{q} = \left[\varphi_s^T (\sigma^2)^{-1} \varphi_s \right]^{-1} \varphi_s^T (\sigma^2)^{-1} u \quad (۳-۳)$$

میزان خطای برآورد برابر است با:

$$e = q - \hat{q} \quad (۴-۳)$$

۱- Best Linear Unbiased Estimator

بدیهی است که هرچه مقدار برآورد به مقدار واقعی نزدیک تر باشد، خطای برآورد کمتر خواهد بود. بنابراین، با استفاده از روش کمترین مربعات خطا داریم:

$$E(e^2) = E[(q - \hat{q})^2] = E[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = [\varphi_s^T [\sigma^2]^{-1} \varphi_s]^{-1} = [FIM]^{-1} \quad (3-5)$$

هرچه $[FIM]^{-1}$ کوچک تر باشد، خطای برآورد کمتر خواهد بود. بنابراین، باید مکان‌هایی را برای سنسورها انتخاب کرد، به طوری که خطای برآورد مینیمم باشد. مینیمم کردن معکوس یک ماتریس نیازمند محاسبات زیادی است. بنابراین، بهتر است ماتریس FIM ماکزیمم شود:

$$FIM = [\sigma^2]^{-1} \varphi_s^T \varphi_s = \varphi_s^T \varphi_s \quad (3-6)$$

که ماتریس σ^2 ماتریس همانی در نظر گرفته شده است. باید نرم مناسبی در نظر گرفته و ماکزیمم شود. در مرجع [۸] دترمینان ماتریس FIM به عنوان نرم ماتریس در نظر گرفته شده است. دترمینان ماتریس FIM بیانگر میزان اطلاعات سیستم می‌باشد. [۲۸]

دترمینان ماتریس را می‌توان از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$\det(FIM) = \prod_r \lambda_r \quad (3-7)$$

که λ_r مقدار ویژه r ام ماتریس است. بنابراین، مقادیر ویژه در میزان اطلاعات سیستم تاثیرگذار هستند. معادله مشخصه ماتریس FIM به صورت زیر است:

$$(FIM - \lambda I)v = 0 \quad (3-8)$$

که I ماتریس همانی و v بردارهای ویژه ماتریس FIM هستند. از آنجا که ماتریس FIM متقارن است، بنابراین، مقادیر ویژه آن حقیقی می‌باشند. همچنین بردارهای ویژه آن متعامد می‌باشند. با تشکیل ماتریس G به شکل زیر:

$$G = [\varphi_s v] \times [\varphi_s v] \quad (3-9)$$

که علامت $\times$ بیانگر ضرب درایه‌های نظیر به نظیر می‌باشد. جمع درایه‌های ستون i ام ماتریس G برابر مقدار ویژه i ام است. با ضرب کردن ماتریس λ^{-1} در ماتریس G ، ماتریس F ایجاد می‌شود:

$$F = [\varphi_s v] \times [\varphi_s v] \lambda^{-1} \quad (3-10)$$

بدین ترتیب، جمع درایه‌های هر ستون ماتریس F برابر یک می‌شود. می‌توان این‌طور بیان نمود که درایه F_{ij} بیانگر سهم درجه آزادی λ_m در مقدار ویژه λ_m است. با جمع کردن ردیف‌های ماتریس F بردار E_D بدست می‌آید:

$$E_D = [\sum_j F_{1j}, \sum_j F_{2j}, \dots, \sum_j F_{mj}]^T \quad (11-3)$$

که m برابر تعداد ردیف‌های ماتریس F است. بنابراین، درایه λ_m بردار E_D بیانگر میزان سهم درجه آزادی λ_m از مقادیر ویژه ماتریس FIM است. با توجه به فرمول (۷-۳) هر درایه بردار E_D بیانگر سهم درجه آزادی متناظر در مقادیر ویژه و در نتیجه دترمینان ماتریس FIM است.

همچنین، بردار E_D را می‌توان به صورت درایه‌های قطری ماتریس زیر بیان کرد:

$$E = \text{diag}(\varphi_s [\varphi_s^T \varphi_s]^{-1} \varphi_s^T) \quad (12-3)$$

ماتریس E دارای این خاصیت است که رتبه آن با اثر آن برابر است. لذا، هر درایه قطری آن، بیانگر میزان سهم درجه آزادی متناظر آن در رتبه ماتریس می‌باشد. با توجه به این نکته که رتبه ماتریس برابر تعداد ستون‌های مستقل خطی یک ماتریس است، لذا، درایه E_{ii} بیانگر میزان مشارکت درجه آزادی λ_m در استقلال خطی موده‌های ماتریس شکل مودی هدف φ_s می‌باشد.

بدین ترتیب، ابتدا یک دسته نماینده بزرگ از محل سنسورها انتخاب می‌شود. سپس، در یک روش تکراری، مکان‌هایی که کمترین میزان مشارکت در استقلال خطی موده‌های هدف را دارا می‌باشند، حذف می‌شود. این تکرار ادامه می‌یابد تا به تعداد مکان مورد نیاز برای نصب سنسورهای در نظر گرفته شده دست یافته شود. به طور خلاصه مراحل ذیل برای یافتن مکان‌های بهینه سنسورها به ترتیب انجام می‌شود:

۱- یافتن ماتریس شکل مودی سازه.

۲- تشکیل ماتریس شکل مودی هدف با حذف موده‌های کم اهمیت و همچنین درجات آزادی غیر قابل اندازه‌گیری و درجات آزادی غیر قابل دسترس.

۳- تشکیل بردار E_D .

۴- یافتن کوچک‌ترین درایه E_D و حذف ردیف متناظر آن در ماتریس شکل مودی هدف.

۵- تکرار مراحل ۳ و ۴ تا رسیدن به تعداد سنسور مورد نظر.

درایه‌ها در بردار E_D مقداری بین صفر تا یک دارند. اگر درایه‌ای در بردار، صفر باشد به این معنی است که درجه آزادی گره متناظر با این درایه هیچ مشارکتی در استقلال خطی مودها نداشته و سنسور نباید در این گره نصب شود. در مقابل، اگر درایه‌ای در بردار E_D برابر یک شد، بدین معنی است که درجه آزادی گره متناظر با این درایه کاملاً در استقلال خطی مودها مشارکت داشته و باید در این گره سنسور نصب شود.

۳-۲- توسعه‌های پیشنهادی

در بخش قبل، روش EI جهت مکان‌یابی بهینه سنسورها بر اساس استقلال خطی شکل مودها معرفی شد. شکل مودی ویژگی ذاتی سازه است که تابع جرم و سختی است. با توجه به فرمول زیر اگر جرم و یا موقیت جرم سازه تغییر کند، شکل‌های مودی آن نیز تغییر می‌کنند:

$$[K - \omega^2 M] \Phi = 0 \quad (3-13)$$

که

K : ماتریس سختی

M : ماتریس جرم

ω : فرکانس ارتعاش و

Φ : ماتریس شکل مودی سازه هستند.

پلهایی که در آن‌ها نمی‌توان از اثر جرم وسیله نقلیه در مقابل جرم پل صرف‌نظر کرد، سازه‌هایی هستند که شکل‌های مودی آن‌ها متغیر می‌باشند. از آنجا که در روش EI، و همچنین سایر روش‌هایی که در فصل دوم بیان شد، محل بهینه سنسورها بر اساس شکل‌های مودی سازه به‌دست می‌آید، و این شکل‌های مودی بدون تغییر در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین، این روش‌ها برای سازه‌هایی که شکل‌های

مودی آن‌ها تغییر می‌کند، کاربرد ندارد. در این تحقیق، روش‌هایی جهت مکان‌یابی سنسورها برای این سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

با توجه به متغیر بودن شکل‌های مودی در اثر تغییر محل اثر جرم، انتظار می‌رود که در موقعیت‌های مختلف قرارگیری جرم بر روی سازه، با انجام هر یک از روش‌های مکان‌یابی سنسورها با شکل‌های مودی متفاوت، محل‌های متفاوت برای سنسورها بدست آید. به بیان دیگر، محل‌های انتخاب شده برای سنسورها تابع محل قرارگیری جرم بر روی سازه می‌باشد. پس مسئله مکان‌یابی سنسورها برای سازه‌هایی که دارای شکل مودی متغیر می‌باشند، این است که، با توجه به متغیر بودن محل سنسورها کدام یک از این مکان‌ها، برای نصب سنسورها در نظر گرفته شود. روش‌هایی که برای حل مسئله در این تحقیق بررسی شده است، در ادامه بیان می‌شود.

ابتدا سازه، بدون در نظر گرفتن جرم متحرک (با در نظر گرفتن جرم ثابت سازه) تحلیل مودال شده و ماتریس شکل‌های مودی (Φ^1) بدست می‌آیند. با حذف موده‌های کم اهمیت و همچنین درجات آزادی غیر قابل اندازه‌گیری و غیر قابل دسترس، ماتریس شکل مودی هدف Φ_s^1 تشکیل می‌شود. سپس، با توجه به تعداد سنسورهای در نظر گرفته شده، روش EI را انجام داده تا محل سنسورها در مرحله اول بدست آید. ماتریس شکل مودی متناظر با محل‌های انتخاب شده برای سنسورها در مرحله اول (Φ_e^1) و همچنین درجات آزادی انتخاب شده و مقدار شاخص استقلال خطی متناظر با آن‌ها را در ماتریسی به ابعاد $n \times 2$ ذخیره نموده که در ستون اول شماره درجات آزادی و در ستون دوم مقدار شاخص استقلال خطی قرار گیرند:

$$E^1 = \begin{bmatrix} a & e_{a1} \\ b & e_{b1} \\ \vdots & \vdots \\ k & e_{k1} \end{bmatrix} \quad (۱۴-۳)$$

که n تعداد سنسورهای در نظر گرفته شده و $a, \dots, k$ شماره درجات آزادی انتخاب شده برای سنسور است. درایه e_{k1} شاخص استقلال خطی درجه آزادی k ام در مرحله اول نام‌گذاری می‌شود.

با توجه به اینکه جرم متحرک در مکان‌های مختلفی بر روی سازه می‌تواند قرار گیرد، با در نظر گرفتن این جرم در یکی از مکان‌های محتمل قرارگیری، پس از بدست آوردن ماتریس شکل مودی (Φ^2) ، ماتریس شکل مودی هدف φ_s^2 ایجاد می‌شود. سپس، مانند گام اول، روش EI را انجام داده تا محل سنسورها در مرحله دوم بدست آید. دوباره ماتریس شکل مودی کاهش یافته متناظر با محل سنسورها در مرحله دوم (φ_e^2) و همچنین ماتریس E^2 متناظر ذخیره می‌شوند.

$$E^2 = \begin{bmatrix} m & e_{m2} \\ n & e_{n2} \\ \vdots & \vdots \\ p & e_{p2} \end{bmatrix} \quad (15-3)$$

به همین ترتیب، در هر مرحله، با در نظر گرفتن جرم متحرک در موقعیت‌های مختلف بر روی سازه، بعد از محاسبه ماتریس شکل مودی (Φ^i) و تشکیل ماتریس شکل مودی هدف φ_s^i در مرحله iam، روش EI برای بدست آوردن محل سنسورها انجام می‌شود. ماتریس شکل مودی کاهش یافته φ_e^i و ماتریس E^i ذخیره می‌شوند:

$$E^i = \begin{bmatrix} w & e_{wi} \\ x & e_{xi} \\ \vdots & \vdots \\ z & e_{zi} \end{bmatrix} \quad (16-3)$$

پس از انجام m مرحله، m ماتریس φ_e^i ذخیره می‌شوند. همچنین با قرار دادن ماتریس‌های E^i در کنار هم ماتریس E^t بدست می‌آید:

$$E^t = \begin{bmatrix} a & e_{a1} \\ \vdots & \vdots \\ m & e_{m2} \\ \vdots & \vdots \\ z & e_{zi} \end{bmatrix} \quad (17-3)$$

این ماتریس دارای mmn سطر و دو ستون می‌باشد. حال باید محل n سنسور تعیین شود. چهار روش برای این منظور معرفی می‌شود.

۳-۲-۱- روش EI-SI'

احتمال اینکه یک یا چند محل سنسور که در یکی از مراحل انتخاب شده، در سایر مراحل نیز انتخاب شود وجود دارد. زیرا ممکن است محل اثر جرم متحرک در دو یا چند مرحله از تحلیل در مختصات نزدیک به هم انتخاب شود و بنابراین، ماتریس شکل‌های مودی هدف مشابه بدست می‌آید. درجات آزادی که در ستون اول ماتریس E^t دارای تکرار می‌باشند در یک سطر نوشته و شاخص‌های متناظر با آن‌ها، با هم جمع می‌شوند:

$$e_{ij}^u = \sum_{j=1}^s e_{ij} \quad (18-3)$$

که s تعداد تکرار یک محل برای سنسور است.

با تشکیل ماتریس E_u به صورت زیر، که در ستون اول شماره درجات آزادی و در ستون دوم مقدار مجموع شاخص‌ها درج شده است:

$$E_u = \begin{bmatrix} a & \sum_j e_{aj} \\ \vdots & \vdots \\ z & \sum_j e_{zj} \end{bmatrix} \quad (19-3)$$

درجات آزادی متناظر با مقادیر ماکزیمم درایه‌های ماتریس E_u برای سنسورها در نظر گرفته می‌شود. اگر در همه مراحل، مکان‌های انتخاب شده برای سنسورها یکسان باشد، تعداد سطرهاى ماتریس E_u برابر با n می‌باشد. اگر مکان‌های انتخاب شده تکراری نباشند، آنگاه تعداد سطرها برابر با mn می‌شود.

به عنوان مثال اگر در سازه‌ای، انتخاب سه محل سنسور مورد نظر باشد و با انجام چهار مرحله

روش EI، ماتریس‌های زیر را داشته باشیم:

$$E^1 = \begin{bmatrix} 3 & 0.89 \\ 4 & 0.91 \\ 8 & 0.77 \end{bmatrix} \quad E^2 = \begin{bmatrix} 4 & 0.76 \\ 6 & 0.81 \\ 8 & 0.92 \end{bmatrix} \quad E^3 = \begin{bmatrix} 3 & 0.93 \\ 4 & 0.88 \\ 10 & 0.94 \end{bmatrix} \quad E^4 = \begin{bmatrix} 5 & 0.93 \\ 6 & 0.75 \\ 9 & 0.85 \end{bmatrix}$$

پس از تشکیل ماتریس E^t :

$$E^t = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 8 & 4 & 6 & 8 & 3 & 4 & 10 & 5 & 6 & 9 \\ 0.89 & 0.71 & 0.77 & 0.76 & 0.83 & 0.92 & 0.93 & 0.88 & 0.94 & 0.93 & 0.75 & 0.85 \end{bmatrix}^T$$

ملاحظه می‌شود که درجه آزادی ۴ دارای سه تکرار و درجات آزادی ۳ و ۶ و ۸ هرکدام دو تکرار دارند.

با تشکیل ماتریس E_u :

$$E_u = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 8 & 9 & 10 \\ 1.82 & 2.35 & 0.93 & 1.58 & 1.69 & 0.85 & 0.94 \end{bmatrix}^T$$

به دلیل اینکه انتخاب سه محل سنسور مورد نظر است، از آنجا که درجات آزادی ۴ و ۳ و ۸ ماکزیمم مجموع شاخص‌های استقلال خطی را دارا هستند، مکان متناظر با آن‌ها برای سنسورها انتخاب می‌شوند.

۳-۲-۲- روش $EI-AI$

در این روش، پس از حذف مکان‌های بدون تکرار، میانگین شاخص‌های استقلال خطی مکان‌های

دارای تکرار محاسبه می‌شود:

$$e_{fj}^u = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s e_{fj} \quad (20-3)$$

بنابراین، ماتریس E_u به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$E_u = \begin{bmatrix} a & \frac{1}{s_a} \sum_j e_{aj} \\ \vdots & \vdots \\ z & \frac{1}{s_z} \sum_j e_{zj} \end{bmatrix} \quad (21-3)$$

که s_a تعداد تکرار درجات آزادی انتخاب شده گره a است. بدین ترتیب، درجات آزادی متناظر با ماکزیمم میانگین شاخص‌های استقلال خطی در ماتریس E_u به عنوان محل بهینه سنسورها انتخاب می‌شود.

با توجه به مثال قبل، ماتریس E_u به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_u = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 6 & 8 \\ 0.91 & 0.783 & 0.79 & 0.845 \end{bmatrix}^T$$

لذا، درجات آزادی ۳، ۶ و ۸ برای سنسورها انتخاب می‌شوند.

۳-۲-۳ روش EI-I'

پس از تعیین مکان‌های بهینه برای هر مرحله از تحلیل و ذخیره ماتریس کاهش یافته شکل مودی (φ_e^i) برای هر مرحله، با در کنار هم قرار دادن شکل‌های مودی گره‌های بدست آمده برای سنسورها، ماتریس شکل مودی هدف جدیدی تشکیل می‌شود:

$$\varphi_u = \begin{bmatrix} \varphi_e^1 \\ \varphi_e^2 \\ \vdots \\ \varphi_e^m \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

تعداد سطرهای ماتریس φ_u برابر است با mn. در واقع با این کار، دسته نماینده‌ی جدیدی برای محل سنسورها، با در نظر گرفتن مکان‌هایی که در مراحل گذشته انتخاب شده‌اند، تشکیل می‌گردد. سپس، روش EI را برای ماتریس شکل مودی هدف جدید φ_u انجام داده و مکان‌های بدست آمده به عنوان مکان‌های بهینه سنسورها در نظر گرفته می‌شوند.

اگر ماتریس‌های φ_e^1 تا φ_e^4 مثال قبل به صورت زیر باشد:

$$\varphi_e^1 = \begin{bmatrix} -1.85 & 1.26 & 2.11 \\ 1.6 & 1.44 & -1.54 \\ -2.3 & -1.78 & -2.01 \end{bmatrix} \quad \varphi_e^2 = \begin{bmatrix} 2.33 & -0.65 & 1.99 \\ 2.89 & -1.07 & 2.77 \\ -1.59 & 1.43 & -2.15 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_e^3 = \begin{bmatrix} 0.42 & -1.29 & 1.48 \\ 0.94 & -1.98 & 2.99 \\ 1.25 & 2.19 & -0.51 \end{bmatrix} \quad \varphi_e^4 = \begin{bmatrix} 3.02 & 0.87 & -2.08 \\ 2.24 & -2.53 & -1.09 \\ 1.69 & 1.23 & 2.18 \end{bmatrix}$$

ماتریس φ_u به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\varphi_u = \begin{bmatrix} -1.85 & 1.6 & -2.3 & 2.33 & 2.89 & -1.59 & 0.42 & 0.94 & 1.25 & 3.02 & 2.24 & 1.69 \\ 1.26 & 1.44 & -1.78 & -0.65 & -1.07 & 1.43 & -1.29 & -1.98 & 2.19 & 0.87 & -2.53 & 1.23 \\ 2.11 & -1.54 & -2.01 & 1.99 & 2.77 & -2.15 & 1.48 & 2.99 & -0.51 & -2.08 & -1.09 & 2.18 \end{bmatrix}^T$$

پس از انجام روش EI بر روی ماتریس φ_u ، ماتریس کاهش یافته φ_e^u زیر حاصل می‌شود:

$$\varphi_e^u = \begin{bmatrix} 2.89 & -1.07 & 2.77 \\ 3.02 & 0.87 & -2.08 \\ 2.24 & -2.53 & -1.09 \end{bmatrix}$$

که متناظر با درجات آزادی ۶، ۵ و ۴ است. بردار E_D^u به صورت زیر است:

$$E_D^u = \{0.73, 0.95, 0.78\}$$

از آنجا که درجه آزادی ۶ دارای تکرار است، ردیف متناظر با آن در ماتریس φ_u که مقدار شاخص استقلال کمتری دارد (ردیف پنجم ماتریس φ_u) حذف شده و دوباره روش EI بر روی ماتریس اصلاح شده انجام می‌شود:

$$\varphi_e^u = \begin{bmatrix} 3.02 & 0.87 & -2.08 \\ 2.24 & -2.53 & -1.09 \\ 1.69 & 1.23 & 2.18 \end{bmatrix}$$

که متناظر با درجات آزادی ۵، ۴ و ۳ است و بردار E_D^u به صورت زیر می‌باشد:

$$E_D^u = \{0.77, 0.76, 0.75\}$$

بنابراین، محل درجات آزادی ۵، ۴ و ۳ برای سنسورها انتخاب می‌شود.

۳-۲-۴ روش EI-SVD

در این روش، پس از تعیین ماتریس‌های φ_e^i ، برای هر ردیف از این ماتریس که در واقع بردار شکل

مودی گره انتخاب شده است، مقدار σ_i تعیین می‌گردد:

$$\sigma_i = U^T \varphi_e^i V \quad (23-3)$$

با تشکیل ماتریس E_u :

$$E_u = \begin{bmatrix} a & \sum_{i=1}^{s_1} \frac{1}{\sigma_i} \\ \vdots & \vdots \\ z & \sum_{i=1}^{s_j} \frac{1}{\sigma_i} \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

که s_1 و s_j به ترتیب برابر با تعداد تکرار گره‌های a و z می‌باشد. درجات آزادی که دارای ماکزیمم شاخص‌های EI-SVD می‌باشند. برای سنسورها در نظر گرفته می‌شوند.

با در نظر گرفتن مثال قبل، ماتریس E_u به صورت ذیل تشکیل می‌گردد:

$$E_u = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 8 & 9 & 10 \\ 0.703 & 0.843 & 0.33 & 0.768 & 0.645 & 0.282 & 0.331 \end{bmatrix}^T$$

محل متناظر با درجات آزادی ۴، ۸ و ۶ به دلیل داشتن حداکثر شاخص‌ها در این روش، برای

سنسورها در نظر گرفته می‌شوند.

فصل چهارم

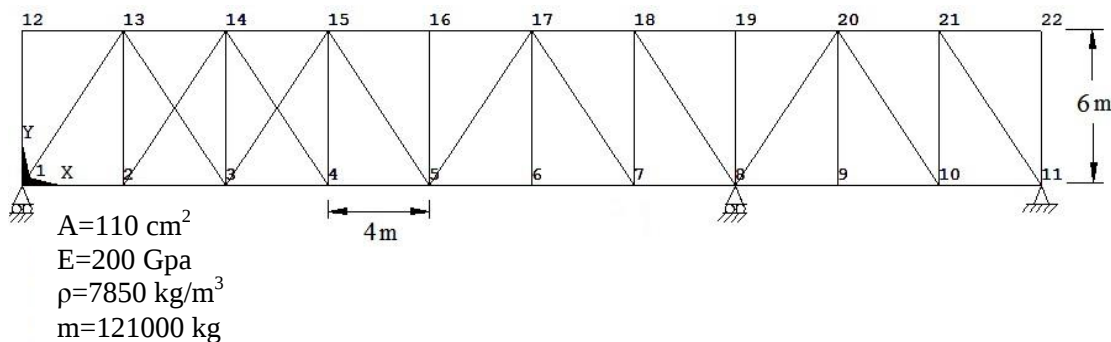
شیوه سازی عددی

۴-۱- مقدمه

کارایی روش‌های پیشنهاد شده‌ی مکان‌یابی بهینه سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه‌ها، در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا یک خریای دو بعدی شبیه‌سازی شده و محل بهینه سنسورها با کمک چهار توسعه پیشنهادی تعیین می‌گردد. سپس، این روش‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در نهایت محل بهینه سنسورها برای پل راه‌آهن باقرآباد ورامین تعیین می‌گردد.

۴-۲- خریای دو بعدی

سازه خریایی نشان داده شده در شکل (۴-۱) جهت بررسی روش‌های پیشنهادی ارائه شده است.



شکل (۴-۱) سازه خریایی

مساحت مقاطع اعضای خرپا برابر ۱۱۰ سانتی‌متر مربع، مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال، و جرم واحد حجم مصالح ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین جرم ۱۲۱ تن برای مدل کردن جرم متحرک منظور شده است. مدل اجزای محدود این سازه توسط نرم‌افزار انسیس^۱ ایجاد شد. به کمک المان خریایی LINK1 که دارای دو درجه آزادی در هر گره است، اعضای خرپا به وجود آمد. برای مدل کردن جرم نیز از المان MASS21 بهره گرفته شده است. مدل دارای ۲۲ گره و ۴۳ المان می‌باشد. شماره گره‌ها در شکل (۴-۱) قابل مشاهده است. در نظر است سه محل سنسور برای این سازه تعیین شود. ابتدا، تحلیل سازه، بدون در نظر گرفتن جرم متحرک انجام شده و ماتریس شکل مودی Φ^1 محاسبه شد. با در نظر گرفتن سه مود ارتعاشی اول و حذف درجات آزادی افقی و

درجات آزادی تکیه‌گاه، ماتریس شکل مودی هدف φ_s^1 ایجاد گردید. سپس، روش EI بر روی ماتریس شکل مودی هدف، اجرا شده و محل متناظر با مکان سنسورهای بدست آمده به همراه شاخص‌های استقلال خطی آن‌ها در ماتریس E^1 ذخیره شد. همچنین ماتریس φ_e^1 نیز ذخیره شد. در مرحله بعد جرم متمرکز ۱۲۱ تنی در محل گره ۱ قرار گرفته و تحلیل تکرار شده تا ماتریس Φ^2 و پس از آن، ماتریس φ_s^2 بدست آید. با انجام روش EI، مکان‌های جدیدی برای سنسورها بدست آمد. این محل‌ها و شاخص‌های متناظر آن‌ها در ماتریس E^2 و همچنین ماتریس φ_e^2 ذخیره شدند. سپس، در مراحل بعد، با قرار گرفتن جرم متمرکز در محل گره‌های ۲ الی ۱۱ و بدست آوردن محل سنسورها، ماتریس‌های E^i و φ_e^i ذخیره شدند. در مجموع ۱۲ مرحله تحلیل انجام شد. ماتریس‌های E^i و φ_e^i در جدول (۴-۱) قابل ملاحظه هستند.

جدول (۴-۱) ماتریس‌های E^i و φ_e^i

E^i		$\varphi_e^i (\times 10^{-3})$			مرحله تحلیل
۶	۰.۹۶۸۵	۸.۰۵۷۳	-۴.۳۵۵۴	۱۴.۲۹۸	۱
۱۴	۰.۵۳۸۰	۷.۹۶۱۸	-۵.۱۶۳۹	-۹.۹۱۹	
۲۱	۰.۹۹۲۹	۰.۶۶۷۴۱	۱.۷۵۷۶	-۱.۱۰۴۷	
۱۴	۰.۹۹۷۸	۰.۹۵۸۷۸	۹.۰۶۲۱	-۰.۷۳۰۹۳	۲
۱۶	۰.۶۱۸۹	۰.۸۹۸۵۶	۱۱.۰۶۸	۵.۳۸۹۵	
۲۱	۰.۸۸۴۳	۰.۲۸۰۴۱	-۰.۸۴۷	۳.۰۵۲۳	
۲	۰.۹۸۷۱	۱.۰۵۶۲	۲.۵۸۰۱	-۰.۵۷۳۶۴	۳
۱۶	۰.۵۸۶	۱.۳۵۶۶	۱.۷۷۷۵	۱۲.۵۰۲	
۲۱	۰.۹۱۸۲	۰.۲۶۸۳۴	-۰.۲۲۸۷۲	-۱.۱۶۴۳	
۳	۱	۲.۳۸۳۱	-۱.۴۵۰۵	-۰.۴۶۱۱۶	۴
۶	۰.۹۹۹۵	۱.۶۸۶۲	-۰.۴۱۹۶۷	۱۴.۲۰۸	
۲۱	۰.۵۱۷۹	۰.۱۰۹۴۹	۰.۳۸۸۵۴	-۱.۶۸۷۲	
۴	۱	۲.۷۳۵۹	-۰.۶۳۸۴۱	-۰.۳۳۴۷۱	۵
۶	۰.۹۹۹۵	۱.۶۶۵۸	۰.۰۴۷۳۷۲	۱۵.۸۳۳	
۲۱	۰.۵۱۱۹	۰.۰۱۷۴۲۶	۰.۴۴۰۲۴	-۲.۱۱۹۱	
۵	۰.۶۶۴۵	۲.۷۹۶۲	-۰.۲۴۰۷۶	-۰.۳۱۱۵۶	۶
۱۴	۰.۹۷۵۸	۱.۷۸۰۹	-۰.۳۵۷۲۷	۱۱.۸۵۲	
۲۱	۰.۷۵۳۱	-۰.۰۱۹۰۶	۰.۴۸۹۳۳	۱.۰۳۹۹	
۴	۱	۱.۸۱۸	-۰.۳۹۷۰۲	۱۲.۵۶	۷
۶	۱	۲.۸۱۴۲	-۰.۱۸۸۸۹	-۰.۴۳۸۰۴	
۹	۰.۵۰۰۷	-۰.۰۹۰۲۴۱	۰.۵۷۶۸۸	-۰.۰۳۳۱۴۱	
۴	۱	۲.۱۷۲۳	-۰.۵۱۷۱۸	۱۱.۷۳	۸
۷	۱	۲.۷۸۸۳	-۰.۰۸۸۱۳۴	-۰.۵۷۳۰۵	
۹	۰.۵۰۰۸	-۰.۱۱۷۴۳	۰.۷۱۳۵۲	-۰.۱۰۶۲۲	
۴	۱	-۰.۵۵۱۴۸	۱۰.۹۷۶	-۳.۹۷۴۱	۹
۶	۱	-۰.۵۳۸۵۶	۹.۰۱۹۷	۰.۱۱۰۵۲	
۹	۰.۵۰۰۶	۰.۹۴۶۸۲	-۰.۳۱۲۳۲	-۰.۸۴۰۳	
۴	۰.۵۰۲۹	-۰.۳۲۱۴۳	-۰.۳۰۸۵	۱۰.۹۶۳	۱۰
۹	۰.۹۹۹۹	۲.۷۱۷۹	-۰.۸۹۶۰۲	۰.۰۴۸۷۰۷	
۲۱	۰.۹۹۶۰	۰.۸۸۳۵۳	۰.۴۹۲۱۳	۰.۱۴۳۹۸	
۴	۰.۵۰۲۰	-۰.۴۳۹۱۷	۰.۳۴۶۳۸	۱۱.۰۵۴	۱۱
۱۰	۱	۲.۷۶۸۱	-۰.۶۸۶۴۷	۰.۱۴۸۳۶	
۲۱	۰.۹۹۹۰	۱.۹۰۸۶	۰.۱۴۶۹۱	۰.۳۸۶۰۴	
۶	۰.۹۶۸۵	۸.۰۵۷۳	-۴.۳۵۵۴	۱۴.۲۹۸	۱۲
۱۴	۰.۵۳۸۰	۷.۹۶۱۸	-۵.۱۶۳۹	-۹.۹۱۹	
۲۱	۰.۹۹۲۹	۰.۶۶۷۴۱	۱.۷۵۷۶	-۱.۱۰۴۷	

با استفاده از چهار روش بیان شده در فصل گذشته، محل‌های نهایی سنسورها به صورت زیر

تعیین می‌شود.

۴-۲-۱ روش EI-SI

همانطور که در جدول (۴-۱) قابل مشاهده است، هر کدام از گره‌های ۴، ۶، ۹، ۱۴، ۱۶ و ۲۱ به ترتیب دارای ۶، ۶، ۴، ۴ و ۹ تکرار می‌باشند. با محاسبه مجموع شاخص‌های گره‌های تکراری و تشکیل ماتریس E_u :

$$E_u = \begin{bmatrix} 4 & 6 & 9 & 14 & 16 & 21 \\ 5.0 & 5.94 & 1.50 & 3.05 & 1.20 & 7.57 \end{bmatrix}^T$$

مشاهده می‌شود که گره‌های ۲۱، ۶ و ۴ به ترتیب دارای ماکزیمم شاخص‌ها هستند. بنابراین، به عنوان محل بهینه سنسورها انتخاب می‌شوند.

۴-۲-۲ روش EI-AI

پس از محاسبه میانگین شاخص‌های گره‌های دارای تکرار و مرتب کردن آن‌ها در ماتریس E_u :

$$E_u = \begin{bmatrix} 4 & 6 & 9 & 14 & 16 & 21 \\ 0.83 & 0.99 & 0.63 & 0.76 & 0.6 & 0.84 \end{bmatrix}^T$$

محل گره‌های ۶، ۲۱ و ۴ به دلیل دارا بودن مقادیر بیشینه شاخص‌ها، انتخاب می‌شوند.

۴-۲-۳ روش EI-I

با در کنار هم قرار دادن ماتریس‌های φ_e^i ، ماتریس φ_u تشکیل می‌گردد. پس از انجام روش EI بر روی این ماتریس، گره‌های ۱۴، ۶ و ۱۶ به ترتیب با شاخص‌های ۰.۹۷، ۰.۹۱، ۰.۵۹ به عنوان محل بهینه سنسورها انتخاب می‌شوند.

۴-۲-۴ روش EI-SVD

با محاسبه ماتریس E_u :

$$E_u = \begin{bmatrix} 4 & 6 & 9 & 14 & 16 & 21 \\ 783 & 711 & 419 & 338 & 160 & 5450 \end{bmatrix}^T$$

گره‌های ۲۱، ۴ و ۶ به دلیل داشتن ماکزیمم شاخص‌ها برای سنسورها تعیین می‌شوند.

در جدول (۲-۴) مکان‌های بدست آمده برای سنسورها با روش‌های مختلف آورده شده است.

جدول (۲-۴) محل بهینه سنسورها با روش‌های مختلف

محل بهینه سنسورها			روش مکان‌یابی
۲۱	۶	۴	EI-SI
۲۱	۶	۴	EI-SVD
۲۱	۶	۴	EI-AI
۱۶	۱۴	۶	EI-I
۲۱	۱۴	۶	کلاسیک EI

۴-۳- مقایسه روش‌های پیشنهادی

با کمک معیارهای بیان شده در فصل دوم، می‌توان روش‌های پیشنهاد شده برای انتخاب محل سنسورها را مورد ارزیابی قرار داد.

همچنین معیار جدیدی برای مقایسه روش‌ها بیان می‌شود. به کمک این معیار توانایی محل گره‌های تعیین شده سنسورها، برای تخمین میزان جابجایی سایر گره‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه زیر:

$$u = \varphi_s q \quad (۱-۴)$$

که

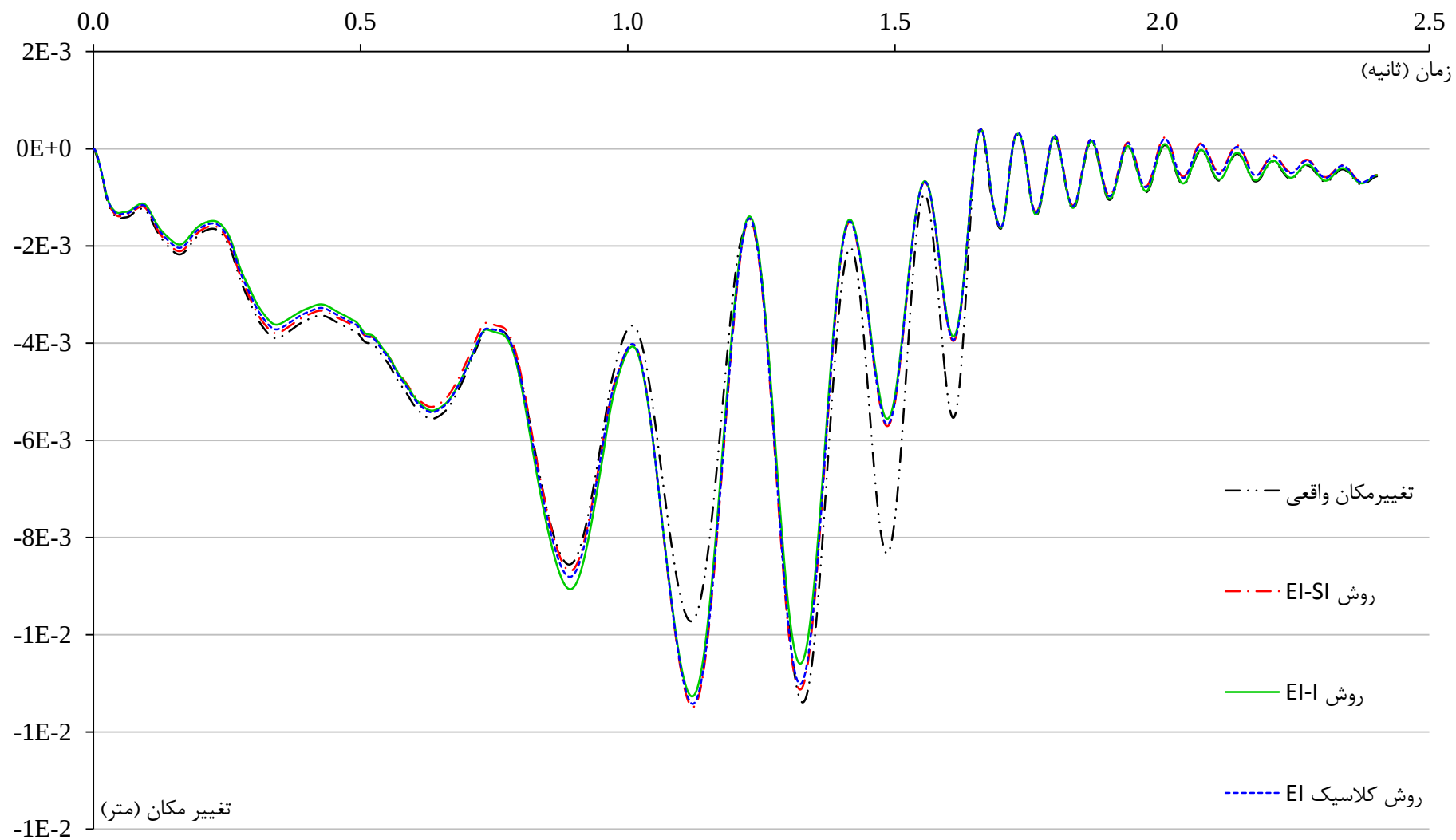
u : اندازه به دست آمده از سنسورها،

φ_s : ماتریس شکل مودی هدف مدل اجزای محدود در محل گره‌هایی که سنسور نصب شده و

q : مختصات مودال می‌باشد.

با داشتن مقادیر u می‌توان بردار q را محاسبه نموده و به کمک آن جابجایی سایر گره‌ها را بدست آورد. سپس، با مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده گره‌ها با روش‌های مختلف، دقت روش‌های پیشنهادی

تعیین می‌گردد. به دلیل اینکه سنسوری در سازه نصب نشده است، مقادیر u را می‌توان با انجام تحلیل تاریخچه زمانی در اثر حرکت جرم متحرک بر روی سازه تعیین کرد. بدین منظور، جرم ۱۲۱ تنی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت از روی سازه عبور داده شده و مقادیر جابجایی گره‌های بدست آمده برای سنسورها تعیین می‌گردد. بدین ترتیب، با داشتن مقادیر u و استفاده از فرمول (۱-۴) بردار q برای هر یک از روش‌های پیشنهادی، بدست آمده و مقدار تخمینی برای سایر گره‌ها محاسبه می‌شود. در نمودار (۱-۴) تغییر مکان واقعی گره ۷ و مقدار تخمینی آن با روش‌های مختلف آورده شده است. نمودار تغییر مکان سایر گره‌ها در پیوست الف آورده شده است. همچنین مقادیر حداکثر خطای اندازه‌گیری تغییر مکان گره‌ها با روش‌های مختلف در جدول (۳-۴) قابل ملاحظه است. معیارهای SVDR، MAC و دترمینان FIM نیز برای محل بهینه سنسورها محاسبه شده و در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.



نمودار (۱-۴) تغییر مکان واقعی گره ۷ و تخمین آن با روش‌های مختلف

جدول (۳-۴) حداکثر خطای اندازه‌گیری تغییر مکان گره‌ها با روش‌های مختلف

شماره گره	روش EI-SI ($\times 10^{-3}$)	روش EI-I ($\times 10^{-3}$)	روش EI ($\times 10^{-3}$)
۲	۲.۱۲۵	۱.۴۸۶	۱.۴۹۵
۳	۱.۴۰۳	۰.۸۱۹	۰.۷۳۳
۴		۱.۲۹۷	۱.۳۱۴
۵	۱.۹۳۵	۰.۳۴۴	۲.۴۱۸
۷	۲.۶۲۳	۲.۷۷۵	۲.۶۵۶
۹	۲.۵۶۴	۷.۳۳۵	۲.۵۶۴
۱۰	۱.۹۴۷	۴.۷۶۲	۱.۹۴۷
۱۲	۰.۰۳۱۰	۰.۰۲۱۷	۰.۰۲۷۲
۱۳	۱.۳۱۶	۰.۵۶۹	۰.۶۱۳
۱۴	۱.۳۶۷		
۱۵	۰.۷۱۹	۰.۶۶۹	۱.۳۰۵
۱۶	۲.۳۲۹		۲.۷۹۷
۱۷	۱.۲۷۰	۱.۴۰۴	۱.۲۹۹
۱۸	۱.۵۹۳	۱.۸۶۹	۱.۵۴۱
۱۹	۰.۰۲۰۷	۰.۰۲۰۱	۰.۰۲۰۹
۲۰	۱.۲۰۲	۷.۲۷۸	۱.۲۰۲
۲۱		۸.۰۱۱	
۲۲	۰.۰۱۵	۰.۰۲۰۵	۰.۰۱۴۷

جدول (۴-۴) مقایسه روش‌های پیشنهادی با معیارهای مختلف

روش مکان‌یابی	max off-diagonal term of MAC	RMS	SVDR	FIM Determinant ($\times 10^{-13}$)
روش EI-SI	۰.۹۱۶	۰.۰۱۸۶	۹.۰۹۲	۱.۶۸۱
روش EI-I	۰.۹۹۳	۰.۰۲۲۷	۴۳.۸۰۰	۰.۲۲۱۵
روش کلاسیک EI	۰.۸۹۷	۰.۰۱۹۷	۹.۴۳۲	۱.۸۱۷

۴-۴- بحث و نتیجه‌گیری

در جدول (۲-۴) ملاحظه می‌شود که سه روش EI-SI، EI-SVD و EI-AI مکان‌های مشابه برای سنسورها تعیین می‌کنند. لذا، در نمودار (۱-۴) و همچنین نمودارهای پیوست الف و جداول (۳-۴) و (۴-۴) یکی از این سه روش (روش EI-SI) آورده شده است.

در نمودار (۱-۴) و همچنین جدول (۳-۴) می‌توان مشاهده نمود که در بین اندازه‌گیری‌ها، میزان حداکثر خطای اندازه‌گیری تغییر مکان برای گره ۷ در روش EI-SI مقدار 3×10^{-2} و ماکزیمم است. حداکثر خطای اندازه‌گیری برای روش EI-I در گره ۲۱ مشاهده می‌شود و مقدار آن برابر 3×10^{-1} است. در روش کلاسیک EI نیز گره ۱۶ با ماکزیمم خطای 3×10^{-2} بیشترین خطای اندازه‌گیری را دارا است. این مقادیر در جدول (۳-۴) با رنگ تیره نشان داده شده است. خانه‌های خالی در این جدول بیانگر این است که، در محل آن گره، سنسور قرار گرفته است. با مقایسه مقادیر ماکزیمم خطای اندازه‌گیری روش‌های مختلف، ملاحظه می‌شود که روش EI-SI دارای کمترین میزان خطا است. پس از آن، روش کلاسیک EI کمترین خطا را دارد. روش EI-I نیز دارای بیشترین خطا است. همچنین در گره ۷ مشاهده می‌شود که ماکزیمم خطای اندازه‌گیری در روش EI-SI کمتر از خطای اندازه‌گیری روش کلاسیک EI است. در گره ۱۶ نیز روش کلاسیک EI با خطای بیشتری نسبت به روش EI-SI مقادیر تغییر مکان را پیش‌بینی می‌کند.

در جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم درایه غیر قطری ماتریس MAC برای روش کلاسیک EI مقدار 0.897 و مینیمم است. پس از آن، روش EI-SI با ماکزیمم درایه غیر قطری 0.916 کمترین مقدار را دارا است. روش EI-I نیز دارای بزرگ‌ترین مقدار درایه غیر قطری ماتریس MAC است. با مقایسه معیار RMS، ملاحظه می‌شود که روش EI-SI کمترین مقدار RMS را دارد و پس از آن، روش کلاسیک EI حائز کمترین میزان RMS است. به همین ترتیب، اگر معیار SVDR مورد مقایسه قرار گیرد، این نتیجه بدست می‌آید که روش EI-SI کمترین مقدار را دارد. در ستون دترمینان ماتریس FIM در جدول (۴-۴) می‌توان ملاحظه نمود که بزرگ‌ترین مقدار مربوط به روش

کلاسیک EI است. پس از آن، روش EI-SI با اختلاف کمی دارای بزرگ‌ترین مقدار دترمینان ماتریس FIM است. لازم به ذکر است که در روش EI محل بهینه سنسورها بر اساس ماکزیمم کردن دترمینان ماتریس FIM تعیین می‌شود.

بنابراین، با توجه به نتایج نشان داده شده و بیان این نکته از فصل دوم که، مقدار SVDR به عنوان معیار بهتر برای ارزیابی روش‌های مکان‌یابی سنسورها معرفی شده است، می‌توان به صورت زیر نتیجه گرفت.

روش EI-SI به دلیل دارا بودن کمترین میزان خطا در اندازه‌گیری تغییر مکان گره‌ها، مینیمم مقدار SVDR، کمترین میزان RMS و همچنین دترمینان ماتریس FIM بزرگ (دارای اختلاف بسیار کم با ماکزیمم)، برای یافتن محل بهینه سنسورها در سازه‌های دارای شکل‌های مودی متغیر پیشنهاد می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که سه روش EI-SI، EI-SVD و EI-AI در این مورد خاص نتایج مشابه دارند و لذا، برای مکان‌یابی سایر سازه‌ها، باید معیارهای مختلف برای این روش مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۵- پل راه‌آهن

در این بخش، مکان‌یابی سنسورها برای پل راه‌آهن باقرآباد ورامین به کمک توسعه‌های پیشنهادی انجام می‌شود.

۴-۵-۱- مشخصات پل

پل راه‌آهن باقرآباد ورامین در مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه و ۲۱ ثانیه شمالی و ۵۱ درجه و ۳۴ دقیقه و ۵۴ ثانیه شرقی در منطقه باقرآباد از توابع شهرستان ورامین، در محور تهران- مشهد قرار دارد. این پل در سال ۱۹۳۵ میلادی توسط مهندسين کشور آلمان طراحی و ساخته شده است. علت انتخاب این پل جهت انجام سلامت سنجی این است که، علی‌رغم قدمت بالای

آن، همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. سازه پل مورد مطالعه، خرپا از نوع وارن^۱ [۲۹] می‌باشد و دارای یک محور رفت یا برگشت است. تردد قطار از کف پل انجام می‌شود. طول دهانه خرپا ۳۹ متر و ارتفاع آن ۸ متر است. با توجه به مشاهدات، جنس پل از نوع فولاد st37 با مدول الاستیسیته $E=2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ و ضریب پواسون $\nu=0.3$ در نظر گرفته شده است. در تصاویر شماره (۲-۴) الی (۴-۴) عکس هوایی و تصاویری از این پل قابل مشاهده است. سایر مشخصات مربوط به پل و مقاطع استفاده شده در ساخت پل در اشکال پیوست ب نشان داده شده است.



تصویر (۲-۴) عکس هوایی از پل راه‌آهن باقرآباد (این تصویر از برنامه google earth گرفته شده است).



تصویر (۳-۴) تصویری از پل باقرآباد



تصویر (۴-۴) تصویری دیگری از پل

۴-۵-۲- مدل اجزای محدود پل

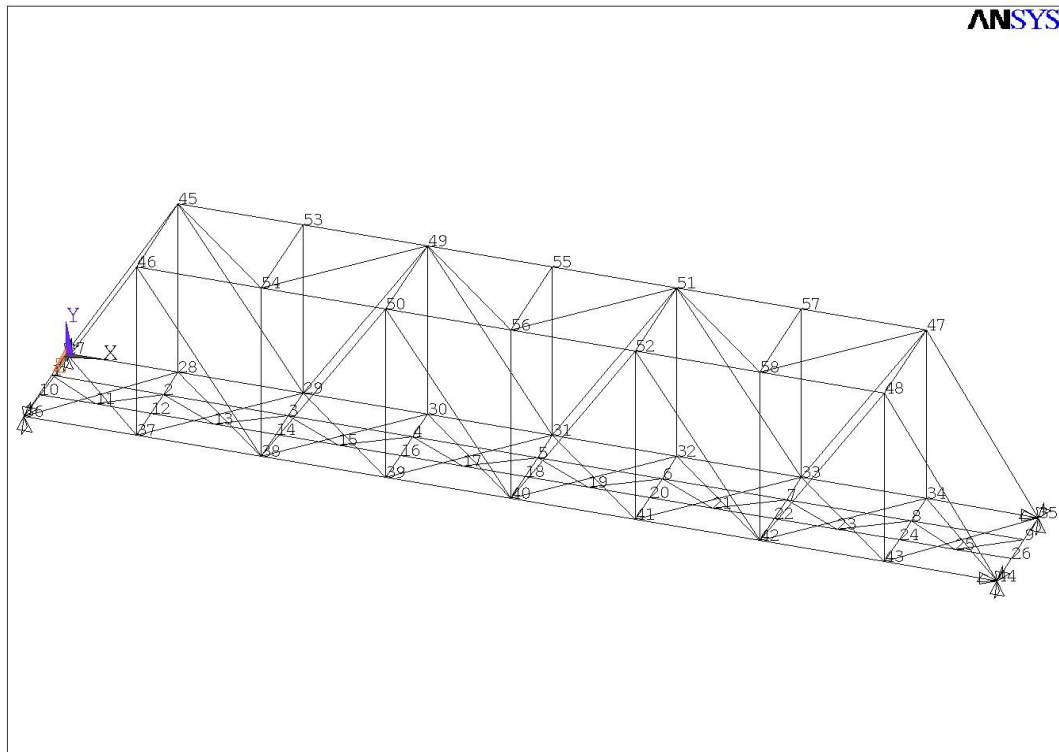
مدل سه بعدی اجزای محدود پل توسط نرم‌افزار انسیس، همانطور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، ایجاد شده است. برای ایجاد مدل سازه‌ی پل از دو المان BEAM188 و LINK8 بهره گرفته‌ایم.

المان BEAM188 یک المان سه بعدی دارای دو گره و ۶ درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی) در هر گره می‌باشد. این المان جهت استفاده در مدل‌های خطی، دوران‌های بزرگ و کرنش‌های غیرخطی بزرگ کاربرد دارد. به کمک بخش مقاطع تعریف شده توسط کاربر^۱، مقاطع مورد نظر در نرم‌افزار ایجاد شد. المان LINK8، المان سه بعدی خربایی دارای دو گره و سه درجه آزادی (درجات آزادی انتقالی) در هر گره می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثرات خمشی در پل از المان BEAM188 جهت مدل‌سازی استفاده شده و به منظور در نظر گرفتن رفتار اتصال مفصلی بین اعضای سازه از المان LINK8 کمک گرفته شده است. اعضای دارای شماره‌های ۴ و ۷ در شکل شماره (ب-۱) در پیوست ب، با المان LINK8 و سایر اعضا با المان BEAM188 مدل شده است. جرم واحد حجم مصالح نیز $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است.

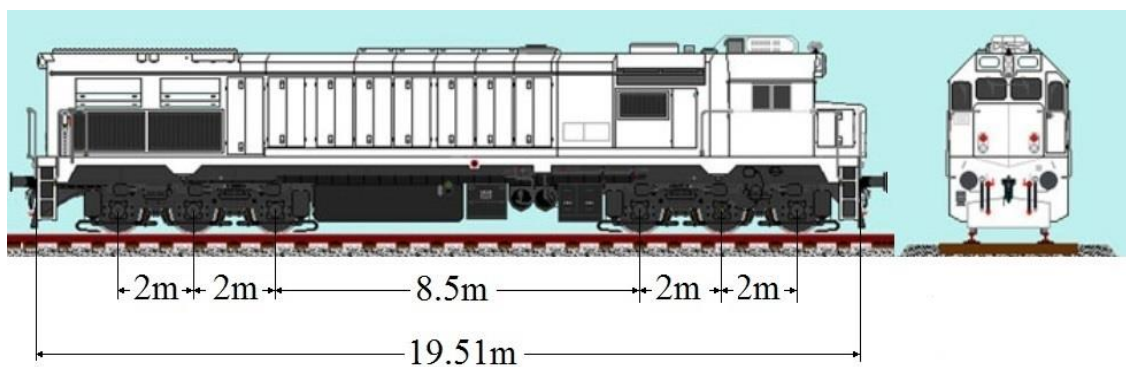
هر عضو سازه پل با یک المان مدل شد (هر عضو به یک المان تقسیم شد). در مجموع، ۵۸ گره و ۱۵۴ المان ایجاد شد. درجات آزادی تکیه‌گاه‌ها مطابق با نوع تکیه‌گاه‌ها مقید شدند.

از المان MASS21 جهت مدل‌سازی جرم لکوموتیو استفاده شده است. المان MASS21 یک المان نقطه‌ای دارای تا شش درجه آزادی (جابجایی در جهات x و y و z و دوران حول محورهای x و y و z) می‌باشد. این المان دارای این قابلیت می‌باشد که می‌توان برای آن، در جهات مختلف جرم و اینرسی دورانی متفاوت تعریف کرد. لکوموتیو مورد استفاده در تحلیل، لکوموتیو GT26CW می‌باشد.

طول این لکوموتیو ۲۰.۷۹ متر، جرم آن ۱۳۲ تن و دارای ۶ محور است. جرم هر محور ۲۲ تن می‌باشد. فاصله محورها و سایر مشخصات لکوموتیو در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵) مدل ایجاد شده پل در نرم افزار انسیس



شکل (۴-۶) فاصله محورها در لکوموتیو GT26CW

۴-۵-۳- نتایج

همانطور که پیشتر اشاره شد، به علت محدودیت در منابع مالی و هزینه بالای سنسورها، فقط تعداد کمی از آن‌ها را می‌توان مورد استفاده قرار داد. به بیان دیگر، مهم‌ترین عاملی که تعداد سنسورها را محدود می‌کند، هزینه است. در این تحقیق، تعداد دو سنسور در نظر گرفته شده است. از آنجا که حرکات پل عمدتاً در راستای قائم می‌باشد، در نظر است ۲ محل برای تغییر مکان سنج قائم در این سازه تعیین گردد.

به منظور تعیین مکان‌های بهینه سنسورها، همانند خرابای دو بعدی در بخش قبل، ابتدا تحلیل مودال سازه بدون در نظر گرفتن جرم قطار انجام شد. پس از حذف درجات آزادی تکیه‌گاه‌ها و همچنین درجات آزادی دورانی و درجات آزادی انتقالی محوره‌های x و z ، ماتریس شکل مودی هدف Φ_s^1 بدست آمد. این ماتریس دارای ۵۴ ردیف و ۲ ستون می‌باشد. ۲ مود ارتعاشی اول سازه برای تعیین مکان‌های بهینه سنسورها در نظر گرفته شده است. پس از انجام روش EI، محل بهینه سنسورها تعیین می‌گردد. همچنین ماتریس‌های Φ_e^1 و E^1 ذخیره می‌شوند. در مرحله بعد، در بدو ورود لکوموتیو به پل، جرم متناظر با آن بر روی پل قرار گرفته، آنالیز دیگری انجام شده و پس از مکان‌یابی سنسورها ماتریس‌های Φ_e^2 و E^2 ذخیره می‌گردد. پس از آن که لکوموتیو ۲ متر از طول پل را طی کرد، آنالیز مودال تکرار شده و به کمک شکل‌های مودی بدست آمده، محل‌های جدیدی برای سنسورها بدست می‌آید. در مراحل بعد، محل اثر جرم لکوموتیو ۲ متر جابجا و آنالیز برای هر مرحله تکرار شده، مکان‌های سنسورها تعیین و ماتریس‌های Φ_e^i و E^i ذخیره شد. در مجموع ۲۹ مرحله تحلیل انجام گرفت. ماتریس‌های Φ_e^i و E^i در جدول (۴-۵) آورده شده است. همچنین در جدول (۴-۶) ماتریس E_{ii} برای روش‌های EI-SI، EI-SVD، EI-AI و EI-AI به نمایش گذاشته شده است.

جدول (۵-۴) ماتریس‌های φ_e^i و E^i برای ۲۹ مرحله تحلیل

E^i		$\varphi_e^i (\times 10^{-3})$		مرحله تحلیل
۳۲	۰.۷۶۸۴	۰.۰۲۹۲۱۲	-۰.۵۶۴۸۱	۱
۴۶	۰.۶۷۲۹	-۰.۰۵۰۹۸۸	-۰.۰۷۵۷۹۵	
۳۲	۰.۷۷۶۹	۰.۰۲۹۲۳۱	-۰.۵۷۲۴۸	۲
۴۶	۰.۶۶۵۹	-۰.۰۵۰۹۷۶	-۰.۰۷۷۰۸۶	
۳۲	۰.۷۷۶۸	۰.۰۲۸۳۱۵	-۰.۵۹۴۵۹	۳
۴۶	۰.۶۵۷۳	-۰.۰۵۱۲۳۸	-۰.۰۶۲۹۴۸	
۳۲	۰.۸۴۳۱	۰.۰۲۸۲۸۹	-۰.۸۱۲۹۵	۴
۴۶	۰.۵۹۷۱	-۰.۰۵۱۲۷۷	۰.۰۰۷۱۳۹۴	
۴۶	۰.۶۳۱۷	-۰.۰۰۰۰۵۱۴۷	-۰.۰۰۰۲۷۰۷۲	۵
۵۵	۰.۸۱۳۳	۰.۰۰۰۰۳۰۳۹۶	۰.۰۰۱۰۵۸۴	
۵۴	۰.۵۳۵۱	-۰.۰۶۲۳۱۱	-۰.۵۱۶۴۲	۶
۵۵	۰.۹۶۱۴	۰.۰۳۰۷۶۹	۰.۸۵۳۲۶	
۵۴	۰.۵۳۴۱	-۰.۰۶۳۱۳۴	-۰.۴۷۶۲۲	۷
۵۵	۰.۹۵۵۷	۰.۰۳۱۳۸۵	۰.۷۲۱۹۳	
۵۴	۰.۵۳۸۲	-۰.۰۶۴۳۹۷	-۰.۴۳۲۵۴	۸
۵۵	۰.۹۶۰۶	۰.۰۳۲۶۲۱	۰.۶۶۸۵۷	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۶۵۵۹۷	-۰.۴۰۲۹۵	۹
۵۵	۰.۵۰۱۷	۰.۰۳۴۸۶۱	۰.۶۴۴۴۶	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۶۷۷۷	-۰.۳۹۶۶۱	۱۰
۵۵	۰.۵۰۱۵	۰.۰۳۶۹۷۶	۰.۶۱۷۴۹	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۷۰۶۵۲	-۰.۳۸۳۸۷	۱۱
۵۵	۰.۵۰۱۳	۰.۰۳۹۶۷۲	۰.۵۷۵۵۷	
۴۶	۰.۵۸۰۰	-۰.۰۵۷۸۰۱	-۰.۲۰۴۲۶	۱۲
۵۵	۰.۸۴۴۰	۰.۰۴۳۰۱۱	۰.۵۴۶۲	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۷۶۱۷۱	-۰.۳۶۸۱	۱۳
۵۵	۰.۵۰۰۸	۰.۰۴۸۱۳۶	۰.۵۳۵۹۷	

ادامه جدول (۴-۵) ماتریس‌های Φ_e^i و E^i برای ۲۹ مرحله تحلیل

E^i		$\Phi_e^i (\times 10^{-3})$		مرحله تحلیل
۴۶	۰.۵۸۹۲	-۰.۰۶۱۴۳	-۰.۲۰۲۹۹	۱۴
۵۵	۰.۸۳۶۷	۰.۰۵۱۹۸۲	۰.۵۱۶۸	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۳۳۶۸	-۰.۳۶۰۳۹	۱۵
۵۵	۰.۵۰۰۸	۰.۰۵۵۸۷۵	۰.۵۰۸۷	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۵۲۲۹	-۰.۳۶۱۵۲	۱۶
۵۵	۰.۵۰۰۸	۰.۰۵۸۲۳۸	۰.۵۰۶۰۳	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۶۱۲۹	-۰.۳۶۱۴۳	۱۷
۵۵	۰.۵۰۰۷	۰.۰۵۹۲۷۶	۰.۵۰۵۰۱	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۴۹۰۱	-۰.۳۷۶۱۹	۱۸
۵۵	۰.۵۰۰۶	۰.۰۵۷۴۵۵	۰.۵۱۳۲۲	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۲۶۰۷	-۰.۳۹۲۷	۱۹
۵۵	۰.۵۰۰۵	۰.۰۵۴۸۴	۰.۵۳۰۷۲	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۸۰۸۹	-۰.۴۱۰۷۴	۲۰
۵۵	۰.۵۰۰۶	۰.۰۵۰۶۴۹	۰.۵۴۶۹۴	
۵۴	۱.۰۰۰۰	-۰.۰۷۷۸۷۹	-۰.۴۳۳۸۸	۲۱
۵۵	۰.۵۰۰۷	۰.۰۴۷۴۵۷	۰.۵۷۴۷۷	
۵۴	۰.۵۴۰۶	-۰.۰۷۵۲۷۷	-۰.۴۶۱۲۶	۲۲
۵۵	۰.۹۵۹۲	۰.۰۴۴۵۵۳	۰.۶۰۰۸۶	
۵۴	۰.۵۳۷۲	-۰.۰۷۲۶۴۳	-۰.۴۹۳۷۲	۲۳
۵۵	۰.۹۵۸۰	۰.۰۴۱۸۹۸	۰.۶۲۷۱۴	
۵۴	۰.۵۳۲۳	-۰.۰۶۹۴۳۳	-۰.۵۴۳۸۲	۲۴
۵۵	۰.۹۵۷۸	۰.۰۳۹۵۲۵	۰.۶۷۸۶۳	
۵۴	۰.۵۲۹۸	-۰.۰۶۶۷۹۱	-۰.۵۹۴۹۱	۲۵
۵۵	۰.۹۵۸۶	۰.۰۳۶۸۴۱	۰.۷۳۱۰۹	
۵۴	۰.۵۳۳۲	-۰.۰۶۵۱۱۴	-۰.۶۶۴۴۱	۲۶
۵۵	۰.۹۶۲۷	۰.۰۳۳۷۴۶	۰.۸۳۸۸۵	
۵۴	۰.۵۳۲۸	-۰.۰۰۰۰۶۳۲۴۷	-۰.۰۰۰۰۸۱۴۱۴	۲۷
۵۵	۰.۹۶۳۶	۰.۰۰۰۰۳۱۸۷۲	۰.۰۰۱۱۴۸۶	
۴۶	۰.۶۲۹۱	-۰.۰۰۰۰۵۱۹۲۳	۰.۰۰۰۰۲۵۲۲۳	۲۸
۵۵	۰.۸۲۲۷	۰.۰۰۰۰۳۱۰۷	-۰.۰۰۱۱۱۳۸	
۳۲	۰.۷۸۲۳	۰.۰۲۸۵۶۴	-۰.۶۱۷۴۹	۲۹
۴۶	۰.۶۵۵۱	-۰.۰۵۱۵۱۶	-۰.۰۵۲۰۲۶	

جدول (۴-۶) ماتریس‌های E_{II} برای روش‌های مختلف

روش EI-AI		روش EI-SVD		روش EI-SI	
۳۲	۰.۷۸۹	۳۲	۸۰۴۰	۳۲	۳.۹۴۷
۴۶	۰.۶۳۱	۴۶	۸۴۰۰۰	۴۶	۵.۶۷۸
۵۴	۰.۷۹۱	۵۴	۴۴۶۳۸	۵۴	۱۵.۸۱۳
۵۵	۰.۷۲۸	۵۵	۳۷۷۹۷	۵۵	۱۷.۴۶۴

با توجه به نتایج بدست آمده از ۲۹ مرحله تحلیل در جدول (۴-۶) محل بهینه سنسورها با روش‌های مختلف بدین صورت تعیین می‌شود. در روش EI-SI محل گره‌های ۵۴ و ۵۵ به دلیل دارا بودن ماکزیمم شاخص‌ها به عنوان مکان‌های بهینه سنسورها معرفی می‌شود. در روش EI-SVD دو گره ۴۶ و ۵۴ محل‌های بهینه برای سنسورها هستند. در روش EI-AI محل گره‌های ۳۲ و ۵۴ برای سنسورها تعیین می‌شوند. همچنین با توجه به جدول (۴-۵) محل گره‌های ۳۲ و ۴۶ مکان‌های بهینه برای سنسورها در روش کلاسیک EI می‌باشند. جهت مقایسه روش‌های مکان‌یابی سنسورها، معیارهای بیان شده در فصل دوم استفاده شده است. مقادیر معیارها در جدول (۴-۷) آورده شده است.

جدول (۴-۷) مقایسه روش‌های مکان‌یابی با معیارهای مختلف

روش مکان‌یابی	max off-diagonal term of MAC	RMS ($\times 10^{-4}$)	SVDR	FIM Determinant ($\times 10^{-16}$)
روش EI-SI	۰.۵۰۷	۱.۶۷۴	۱۱.۱۱۰	۶.۴۸
روش EI-SVD	۰.۱۸۲	۰.۹۷۲	۲.۶۲۷	۱.۶۸۹
روش EI-AI	۰.۴۴۶	۵.۶۸۱	۱۱.۷۷۸	۸.۷۳۵
روش کلاسیک EI	۰.۱۴۲	۵.۶۷۱	۱۰.۴۸۸	۹.۶۱۸

همانطور که در جدول (۷-۴) قابل ملاحظه است، روش EI-SVD دارای کمترین مقدار معیارهای MAC و SVDR است. همچنین دترمینان ماتریس FIM و ماکزیمم درایه غیرقطری ماتریس MAC این روش اختلاف کمی با روش کلاسیک EI دارد. لذا، روش EI-SVD به عنوان بهترین روش در بین چهار روش پیشنهادی معرفی می‌شود. همچنین با مقایسه معیارهای MAC و SVDR، این روش از روش کلاسیک EI بهتر عمل می‌کند.

بنابراین، مکان‌های تعیین شده توسط روش EI-SVD (محل گره های ۴۶ و ۵۴) برای نظارت بر سلامتی سازه پل راه‌آهن باقرآباد ورامین پیشنهاد می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

برخی از زیرساخت‌ها در حال نزدیک شدن به طول عمر مفید اولیه طراحی خود می‌باشند یا از آن تجاوز کرده‌اند. به خاطر پیامدهای اقتصادی، این سازه‌های عمرانی علی‌رغم طول عمر و افزایش آسیب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، توانایی نظارت بر سلامتی این سازه‌ها مهم می‌باشد. نظارت بر سلامتی سازه‌ها در دهه گذشته بر روی بسیاری از زیرساخت‌های عمرانی انجام شده و یکی از مهم‌ترین اهداف آن، اطلاع رسانی در مورد تغییرات تدریجی یا ناگهانی وضعیت سازه می‌باشد. یکی از بخش‌های مهم نظارت بر سلامتی سازه‌ها، سیستم سنسورها است. همان‌گونه که در فصول قبل بیان شد، با توجه به هزینه بالای سنسورها و سایر سیستم‌های وابسته، باید تا حد امکان تعداد کمی از سنسورها در سازه استفاده شود. لذا، تعیین مکان‌های بهینه برای سنسورها از اهمیت بالایی برخوردار است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین محل بهینه سنسورها معرفی شده است. تعدادی از این روش‌ها در فصل دوم بیان شده است. هرکدام از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند. تقریباً همه روش‌های مکان‌یابی سنسورها با استفاده از شکل‌های مودی به تعیین محل‌های بهینه سنسورها می‌پردازند. شکل مودی ویژگی ذاتی سازه است و اگر جرم یا سختی آن تغییر کند، شکل‌های مودی نیز دچار تغییر خواهند شد. در پل‌هایی که نمی‌توان از جرم وسیله نقلیه در مقابل جرم پل صرف‌نظر کرد، تغییر شکل‌های مودی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، از آنجا که روش‌های بیان شده در فصل دوم، که بر اساس شکل‌های مودی بدون تغییر به تعیین مکان بهینه برای سنسورها می‌پردازند، به نظر می‌رسد در مورد این‌گونه سازه‌ها دقت لازم را نداشته باشند. همچنین در فصل دوم معیارهایی جهت ارزیابی روش‌های مکان‌یابی سنسورها بیان شده است.

یکی از پرکاربردترین روش‌های مکان‌یابی سنسورها به نام روش EI، در فصل سوم به طور مفصل شرح داده شده است. این روش بر اساس میزان استقلال خطی مودهای ارتعاشی، محل بهینه

سنسورها را انتخاب می‌کند. اما همچنان که شکل‌های مودی سازه تغییر می‌کنند، استقلال مودها نیز دچار تغییر می‌شود و لذا، دسته مکان‌های مختلفی جهت نصب سنسورها معرفی می‌شوند.

در این پروژه، تعیین مکان بهینه سنسورها با توجه به تغییرات شکل مودی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بدست آوردن شکل‌های مودی سازه، با توجه به قرارگیری محل اثر جرم در موقعیت‌های مختلف، دسته محل‌های بهینه برای سنسورها در هر گام به کمک روش EI تعیین می‌شود. برای تعیین مکان‌های بهینه از بین دسته محل‌های معرفی شده، چهار توسعه پیشنهادی در فصل سوم ارائه شده است. در روش EI-SI همانطور که بیان شد، پس از مرتب سازی محل‌های انتخاب شده و مقدار شاخص استقلال خطی آن‌ها در یک ماتریس، مجموع شاخص‌های درجات آزادی که در چند مرحله تحلیل انتخاب شده‌اند، محاسبه شده و محل درجات آزادی که دارای ماکزیمم مجموع شاخص‌ها هستند، به عنوان محل بهینه سنسورها تعیین می‌گردند. روش EI-AI یکی دیگر از توسعه‌های پیشنهادی روش کلاسیک EI است. این روش مشابه با روش EI-SI می‌باشد با این تفاوت که میانگین شاخص‌های درجات آزادی تکراری محاسبه می‌شود. لذا، درجات آزادی متناظر با ماکزیمم میانگین شاخص‌ها، محل بهینه سنسورها هستند. در سومین توسعه پیشنهادی روش کلاسیک EI با نام EI-I، پس از اینکه شکل‌های مودی درجات آزادی انتخاب شده در مراحل قبل در یک ماتریس جدید ذخیره شدند، دوباره روش EI بر روی ماتریس شکل‌های مودی جدید اعمال می‌شود. در نتیجه، محل‌های جدید بدست آمده، جهت نصب سنسورها در نظر گرفته می‌شوند. روش EI-SVD به عنوان آخرین توسعه پیشنهادی روش کلاسیک EI معرفی شده است. در این روش مقدار تکین بردارهای شکل مودی برای درجات آزادی انتخاب شده در مراحل مختلف تحلیل محاسبه می‌گردد. از آنجا که هرچه مقدار SVD کوچک‌تر باشد بهتر است، معکوس این مقادیر به همراه درجات آزادی انتخاب شده در یک ماتریس ذخیره می‌گردد. پس از محاسبه مجموع معکوس این شاخص‌ها برای درجات آزادی تکراری و مرتب سازی آن‌ها، محل متناظر با درجات آزادی دارای مقدار ماکزیمم شاخص‌ها برای سنسورها تعیین می‌گردد.

در فصل چهارم، توسعه‌های پیشنهادی و مقایسه آن‌ها با روش کلاسیک EI صورت گرفته است. در ابتدا یک خرپای دو بعدی به کمک نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شد. طول خرپای مدل ۴۰ متر می‌باشد. جرم ۱۲۱ تنی برای جرم متحرک منظور شده است. همچنین سه محل سنسور برای این سازه در نظر گرفته شده است. محل اثر جرم در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته و آنالیز مودال برای بدست آوردن شکل‌های مودی انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز مودال، در هر مرحله، روش کلاسیک EI انجام گرفته و محل سنسورها تعیین گردید. سپس، از توسعه‌های پیشنهادی برای تعیین محل بهینه سنسورها بهره گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سه روش EI-SI، EI-AI و EI-SVD مکان‌های مشابه برای سنسورها تعیین می‌کنند.

برای مقایسه این روش‌ها، از معیارهای بیان شده در فصل دوم استفاده شده است. با نگاهی به جدول مقایسه نتایج بدست آمده با معیارهای مختلف، این نتیجه حاصل می‌شود که سه روش EI-SI، EI-AI و EI-SVD از روش EI-I بهتر عمل می‌کنند. روش کلاسیک EI نیز بهتر از روش EI-I است. معیار دیگری برای مقایسه روش‌های پیشنهاد شده معرفی شده است. به کمک این معیار توانایی سنسورها جهت تخمین جابجایی سایر گره‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتیجه به دست آمده از مقایسه روش‌ها با این معیار، نتایج قبلی را تایید می‌کند.

پس از ارزیابی روش‌های پیشنهادی بر روی خرپای دو بعدی، یک پل راه‌آهن جهت مکان‌یابی سنسورها برای نظارت بر سلامتی سازه آن در نظر گرفته شد. این پل در منطقه باقرآباد از توابع شهرستان ورامین واقع گشته است. تعداد دو سنسور برای این سازه منظور شد. از آنجا که سه روش پیشنهادی در مدل خرپای دو بعدی نتایج مشابه دارند، این سه روش به همراه روش کلاسیک EI برای تعیین محل‌های بهینه سنسورها به کار گرفته شدند. نتایج کسب شده نشان می‌دهد که سه روش EI-SI، EI-AI و EI-SVD مکان‌های متفاوتی برای سنسورها تعیین می‌کنند. دو روش EI-SI و EI-AI نسبت به روش کلاسیک EI برتری ندارند. در مقابل، روش EI-SVD از دو روش پیشنهادی دیگر دارای نتایج بهتری است و با مقایسه معیارهای مختلف ارزیابی روش‌ها، مشاهده می‌شود که

روش EI-SVD در همه معیارها بهتر عمل می‌کند. همچنین روش EI-SVD در مقایسه با روش کلاسیک EI دارای عملکرد بهتری است. با نگاهی به جدول نتایج روش‌های مختلف می‌توان این نکته را دریافت. هرچند روش EI-SVD در دو معیار دارای تفاوت ناچیزی با روش کلاسیک EI است، در دو معیار دیگر می‌توان برتری روش EI-SVD را مشاهده نمود. این نکته باید در نظر گرفته شود که روش کلاسیک EI بر اساس ماکزیمم کردن دترمینان FIM به وجود آمده است. همچنین میزان SVDR و RMS معیارهای جامع‌تری برای ارزیابی محل بهینه سنسورها می‌باشند.

۵-۲- پیشنهادات

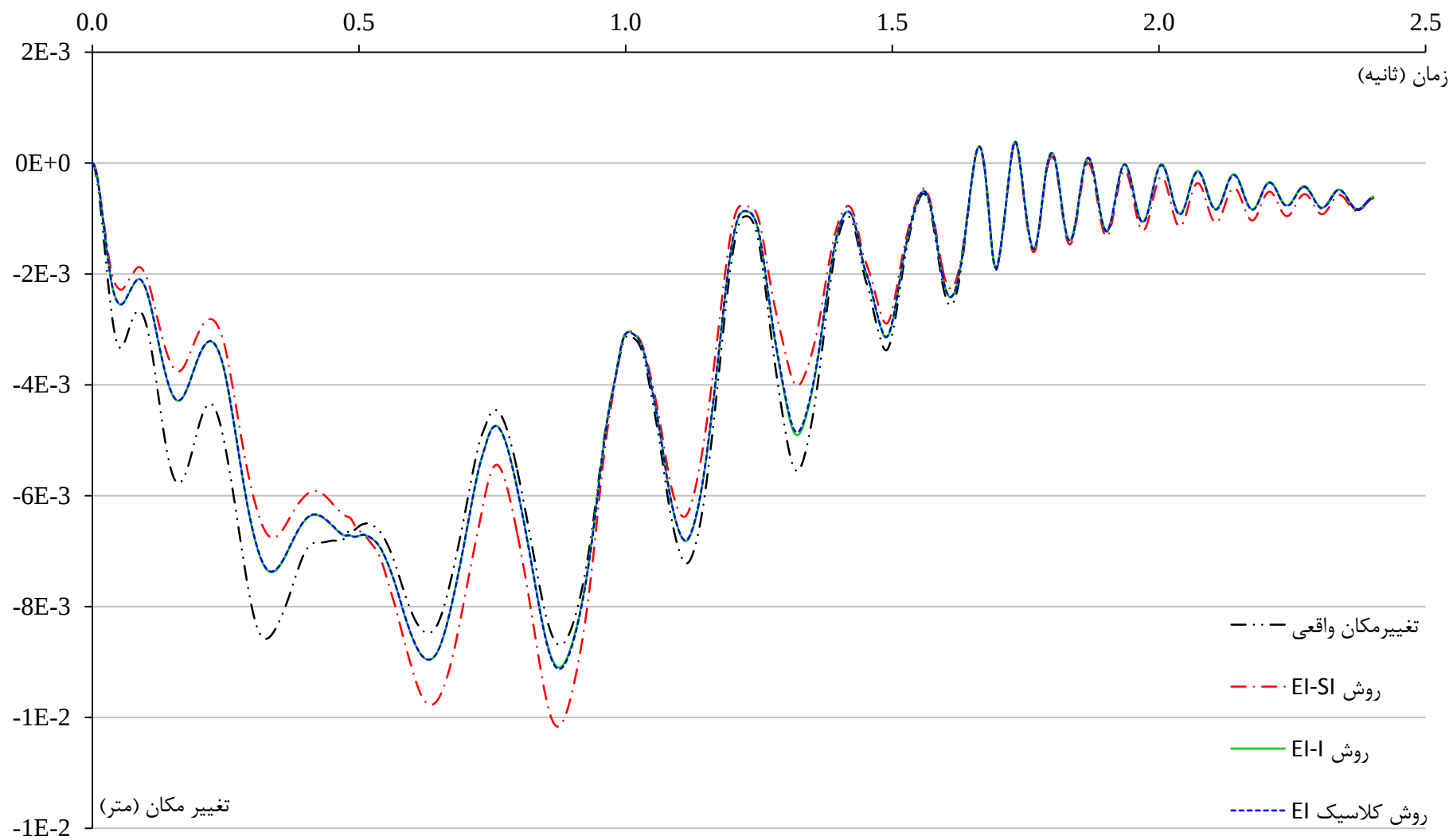
جهت پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- ۱- نصب سنسورها در محل‌های مشخص شده با روش‌های مختلف برای پل راه‌آهن باقرآباد و ارزیابی عملی این روش‌ها.
- ۲- کسب نتایج بدست آمده از سنسورهای نصب شده بر روی سازه و مقایسه با نتایج مدل اجزای محدود پل و به‌روز رسانی مدل در صورت لزوم.
- ۳- ارائه مدل آزمایشگاهی و تعیین پاسخ آن در اثر عبور جرم متحرک و راستی آزمایشی پاسخ بدست آمده از نرم‌افزار.
- ۴- بررسی تعداد سنسورهای مورد نیاز برای نظارت بر سلامتی سازه‌ها.

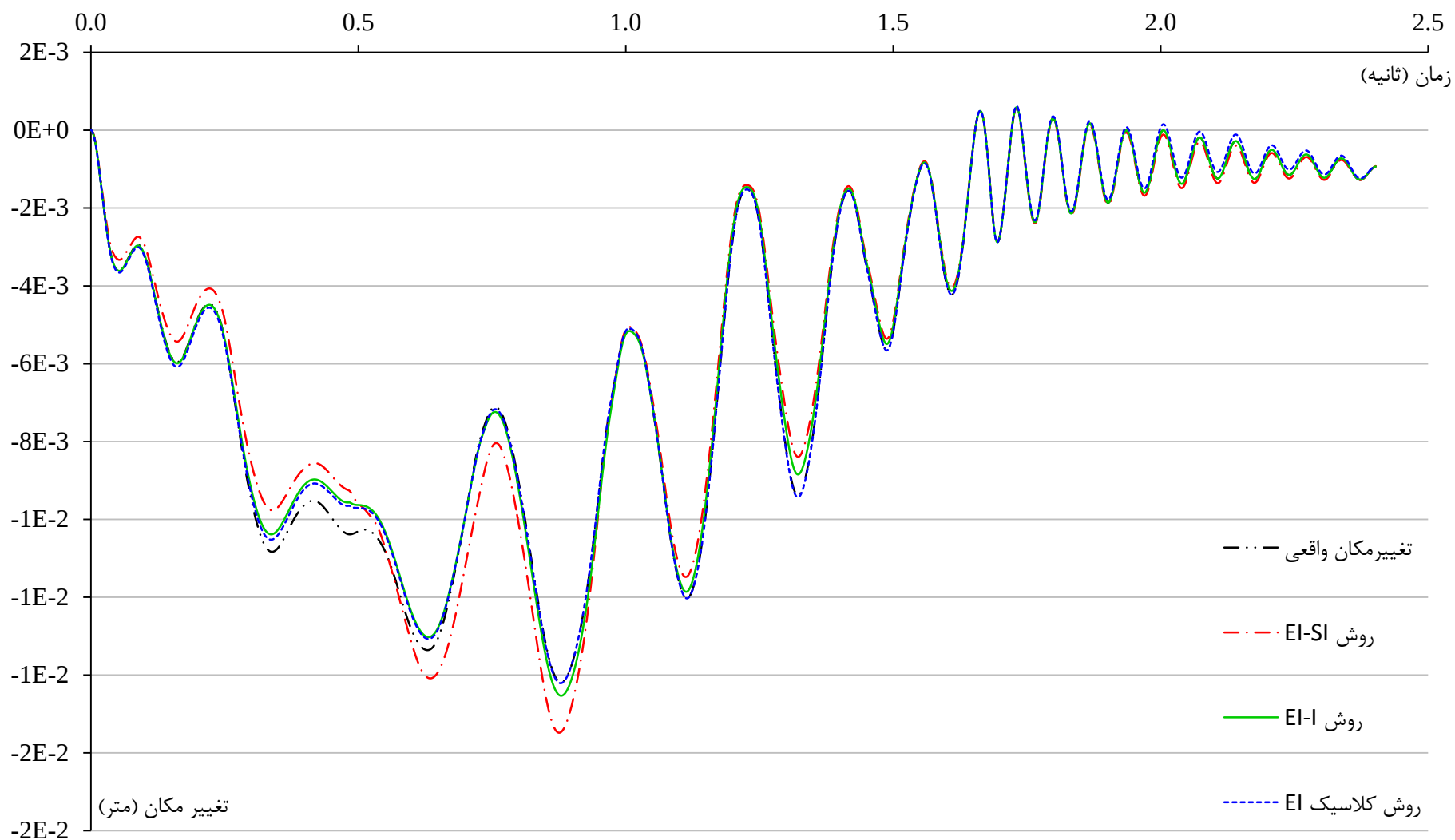
پایان

پوست الف

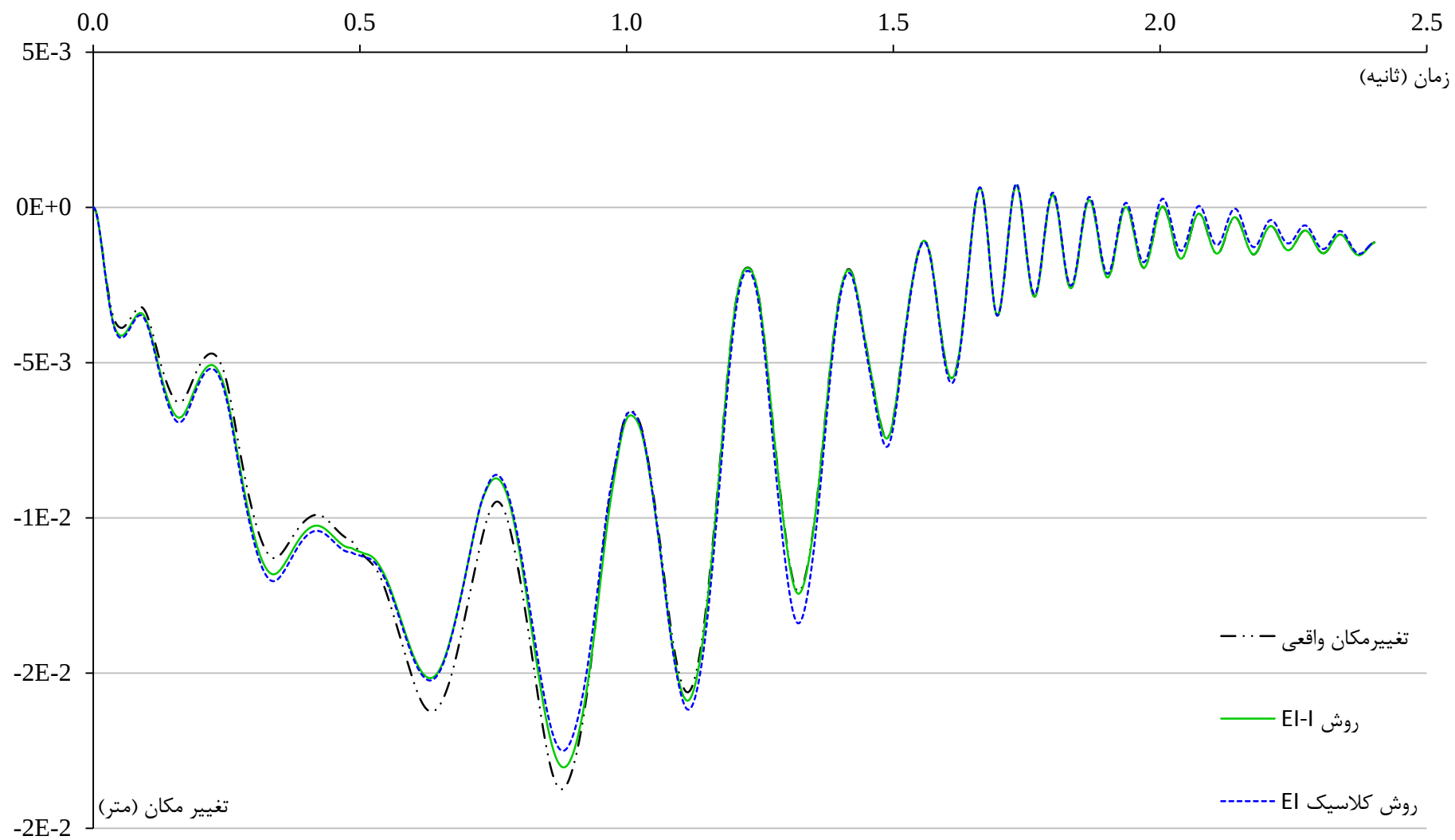
نمودارهای تغییر مکان گره های خرپای دوبعدی



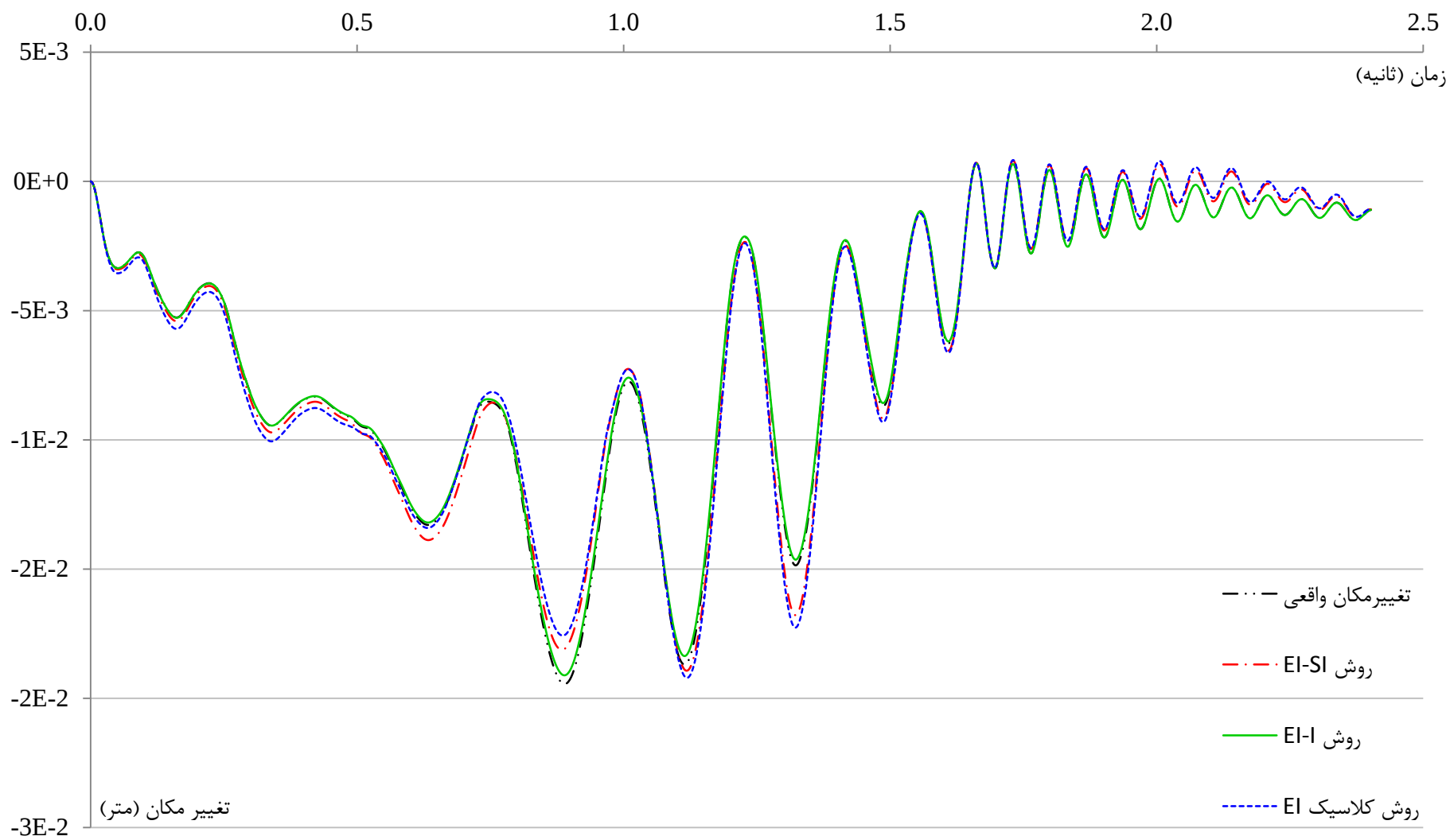
نمودار (الف-۱) تغییر مکان واقعی گره ۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف



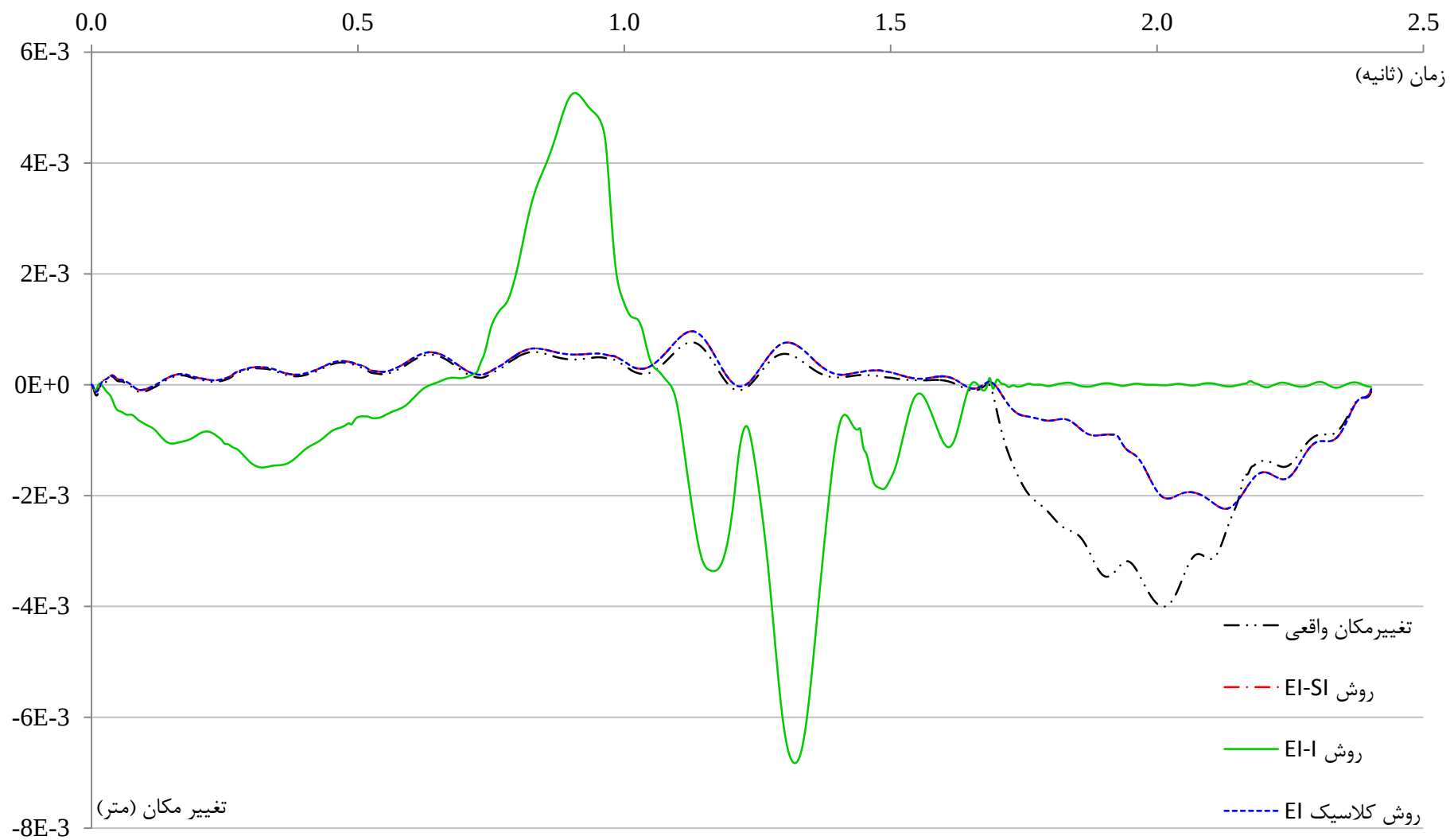
نمودار (الف-۲) تغییر مکان واقعی گره ۳ و تخمین آن با روش‌های مختلف



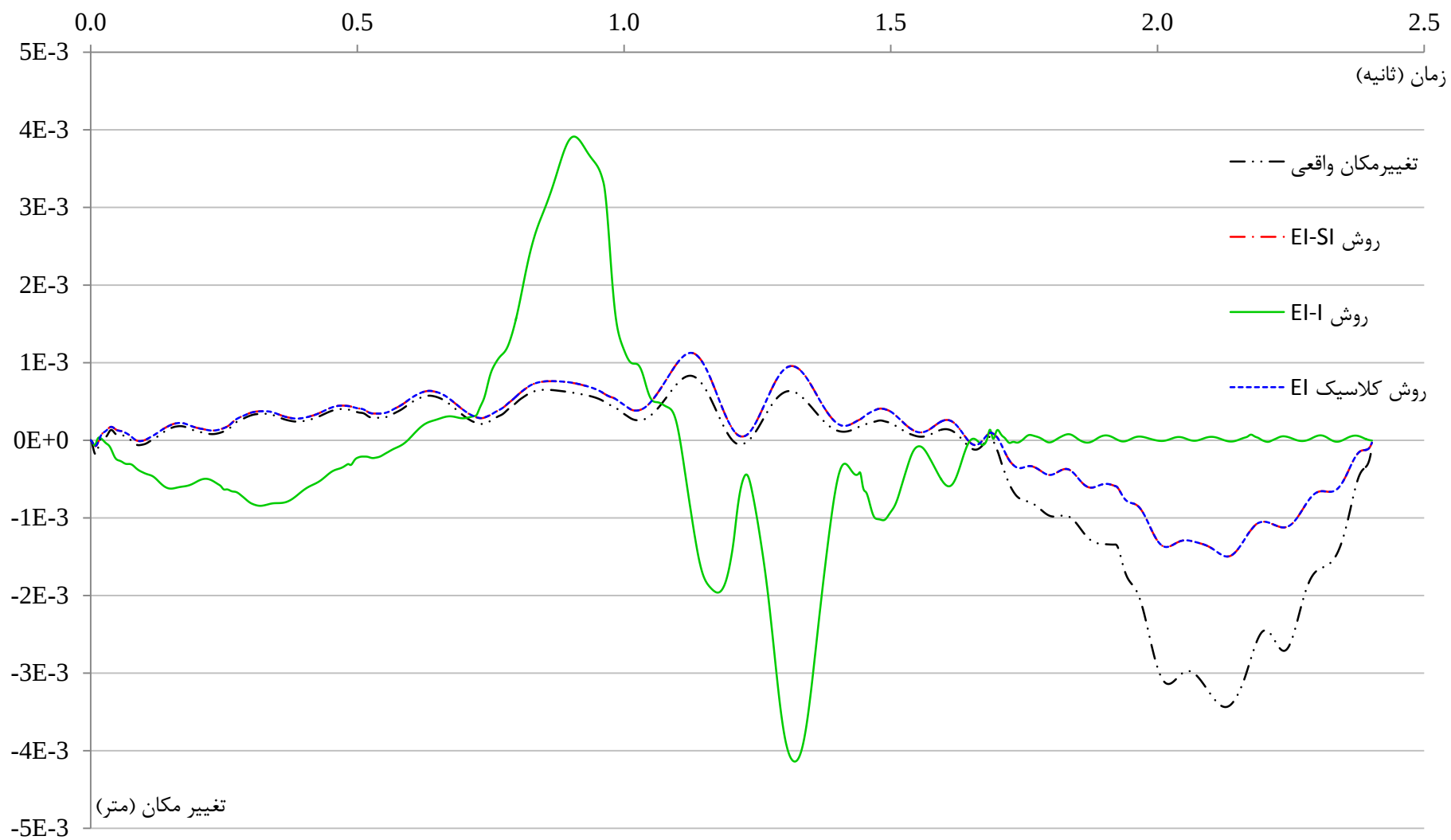
نمودار (الف-۳) تغییر مکان واقعی گره ۴ و تخمین آن با روش‌های مختلف



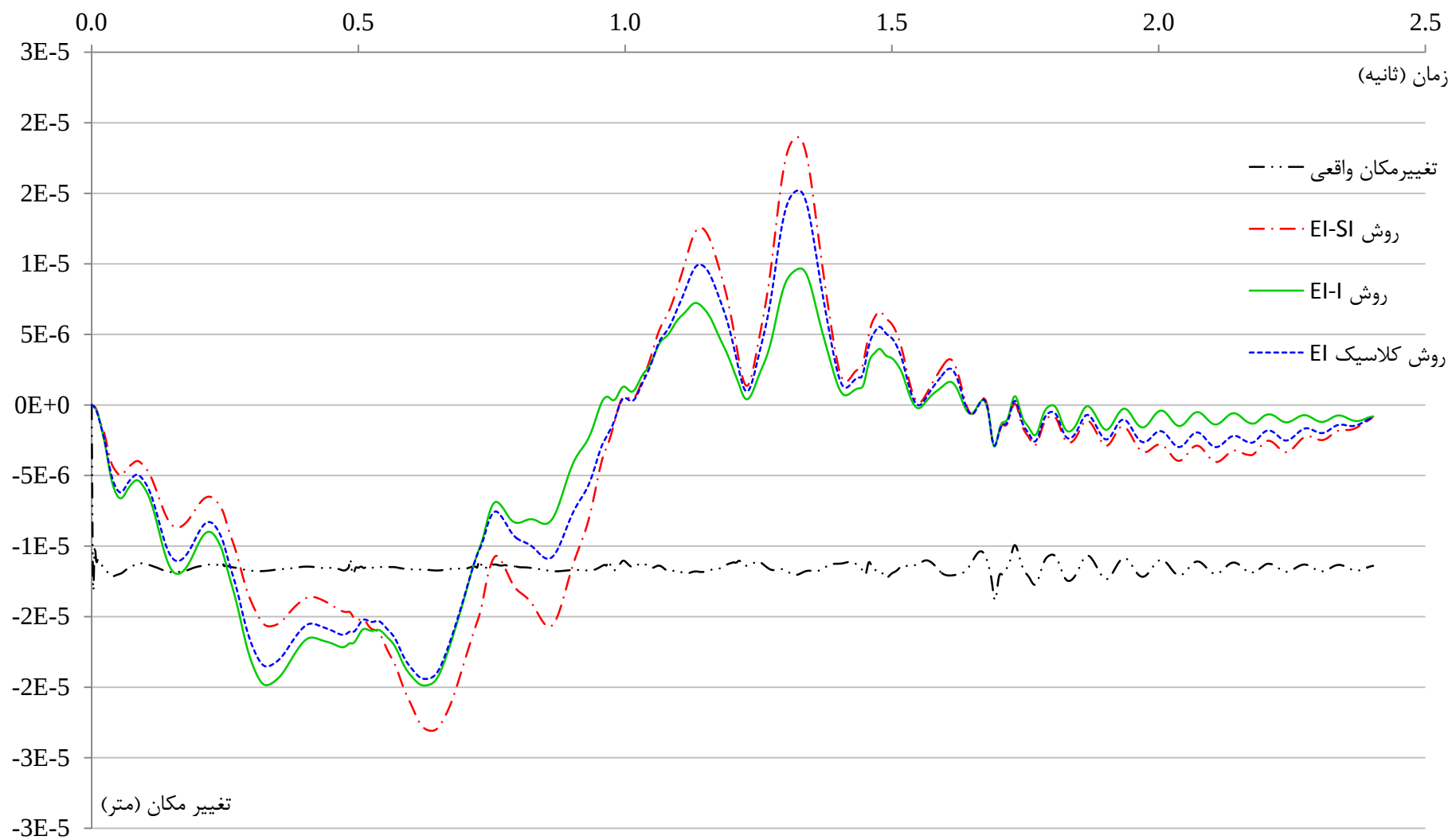
نمودار (الف-۴) تغییر مکان واقعی گره ۵ و تخمین آن با روش‌های مختلف



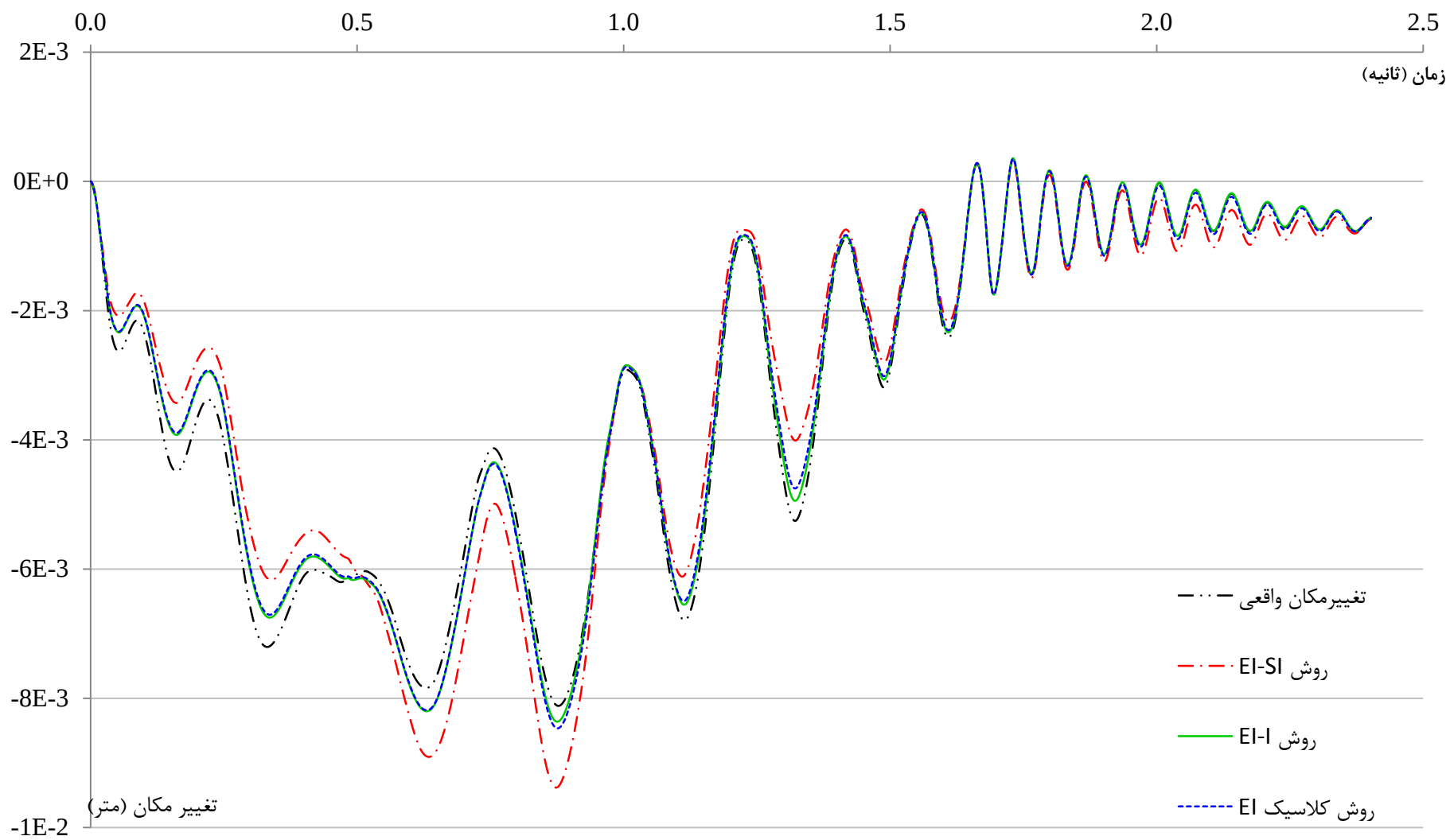
نمودار (الف-۵) تغییر مکان واقعی گره ۹ و تخمین آن با روش‌های مختلف



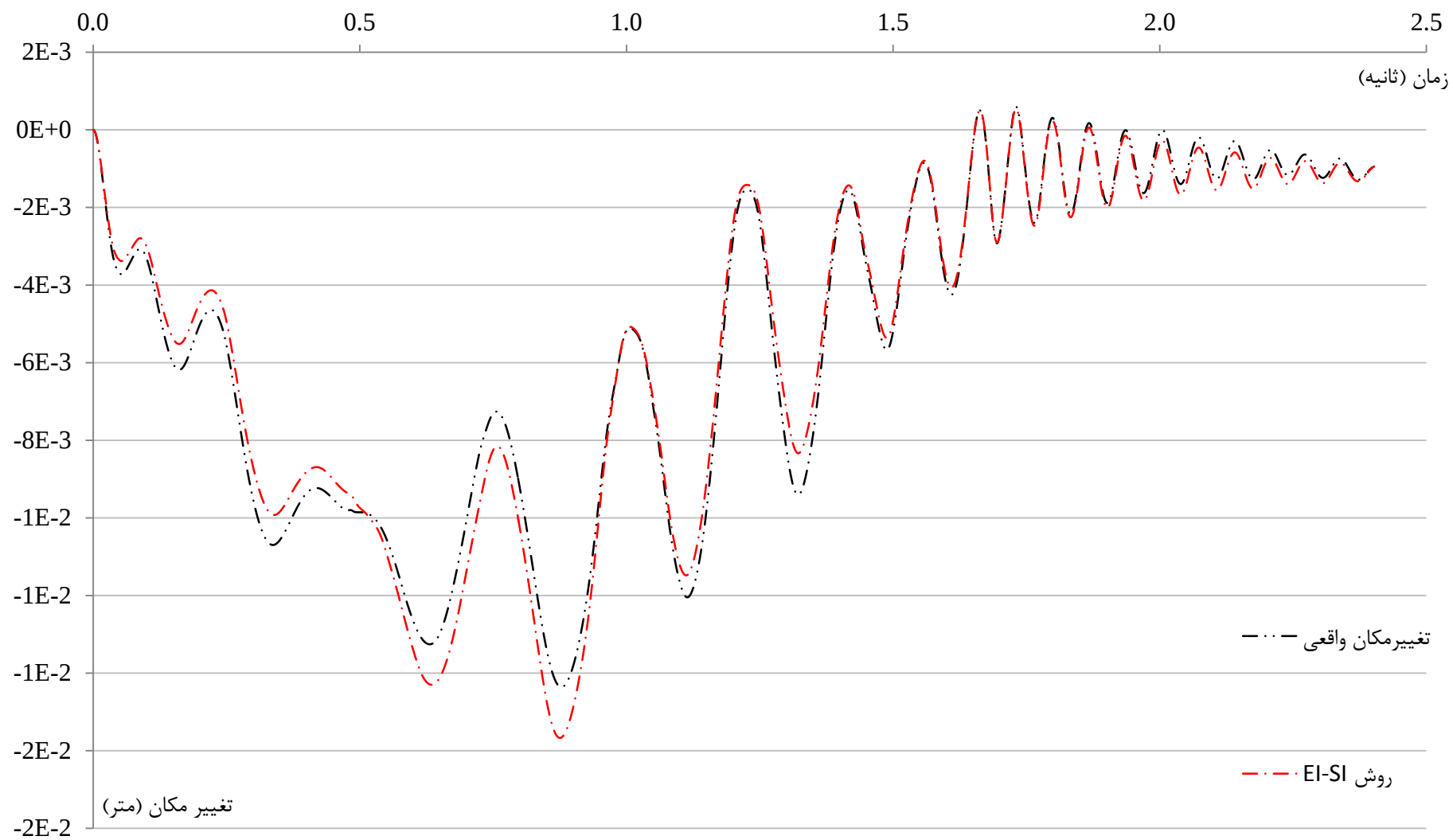
نمودار (الف-۶) تغییر مکان واقعی گره ۱۰ و تخمین آن با روش‌های مختلف



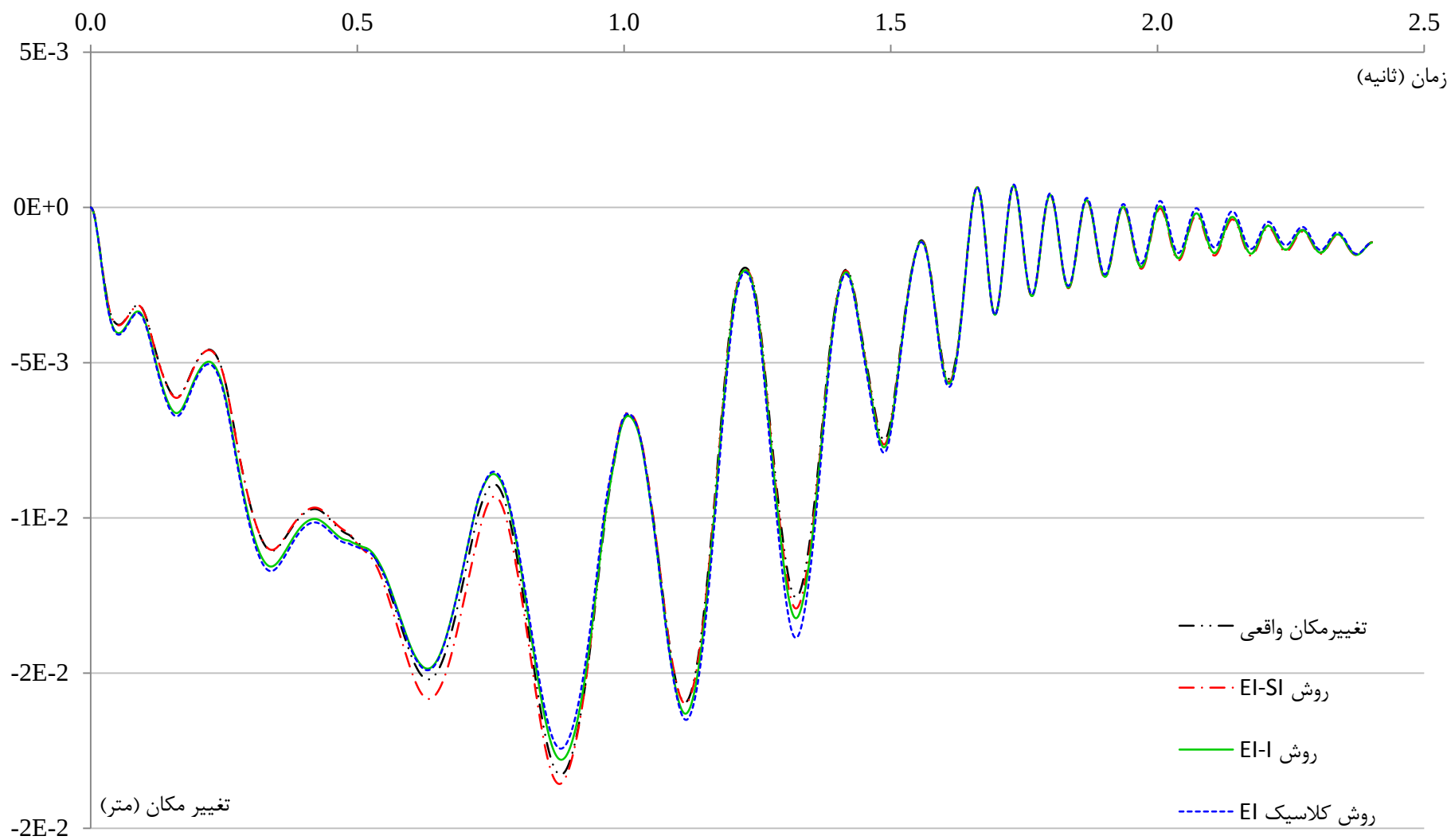
نمودار (الف-۷) تغییر مکان واقعی گره ۱۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف



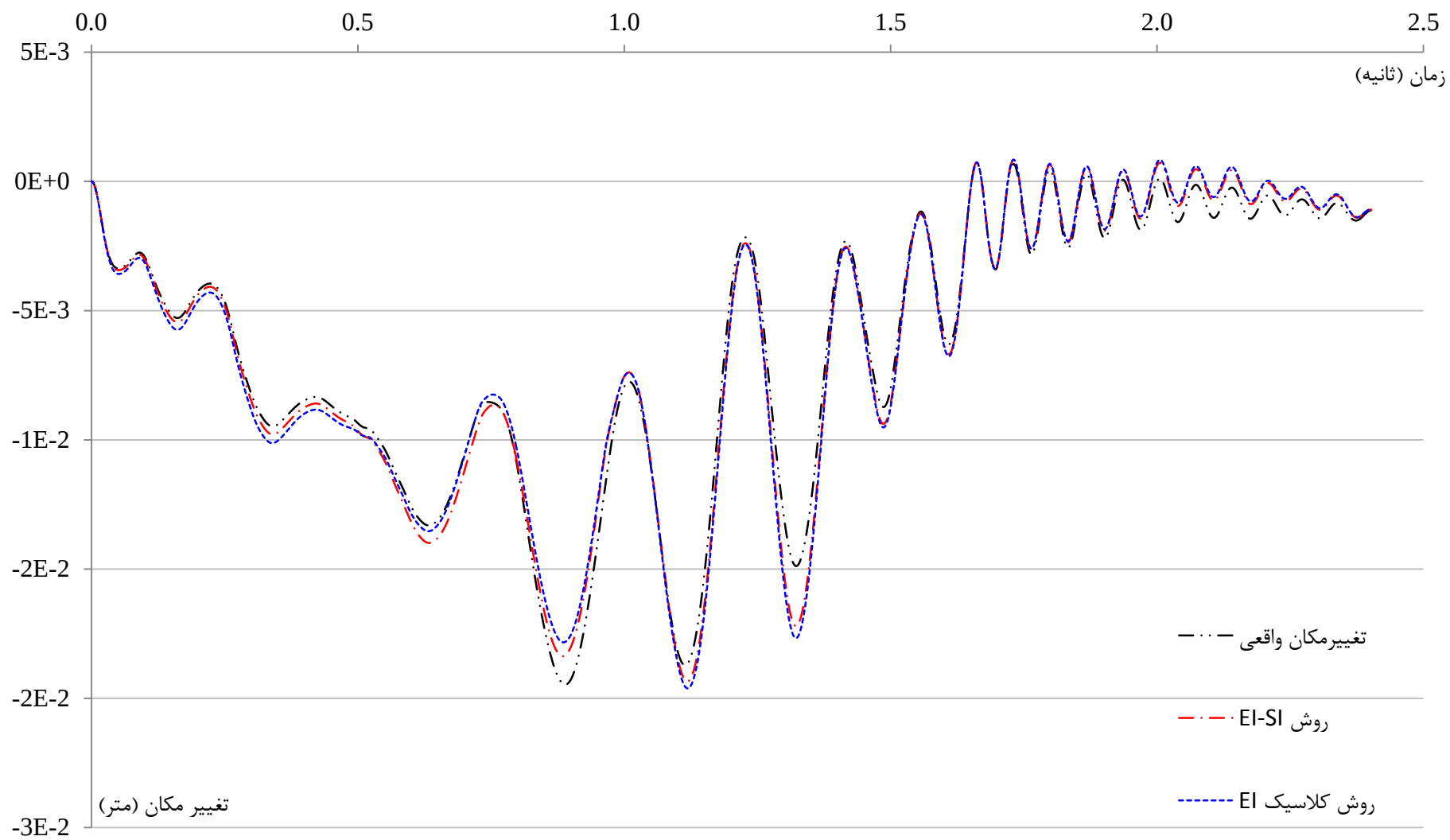
نمودار (الف-۸) تغییر مکان واقعی گره ۱۳ و تخمین آن با روش‌های مختلف



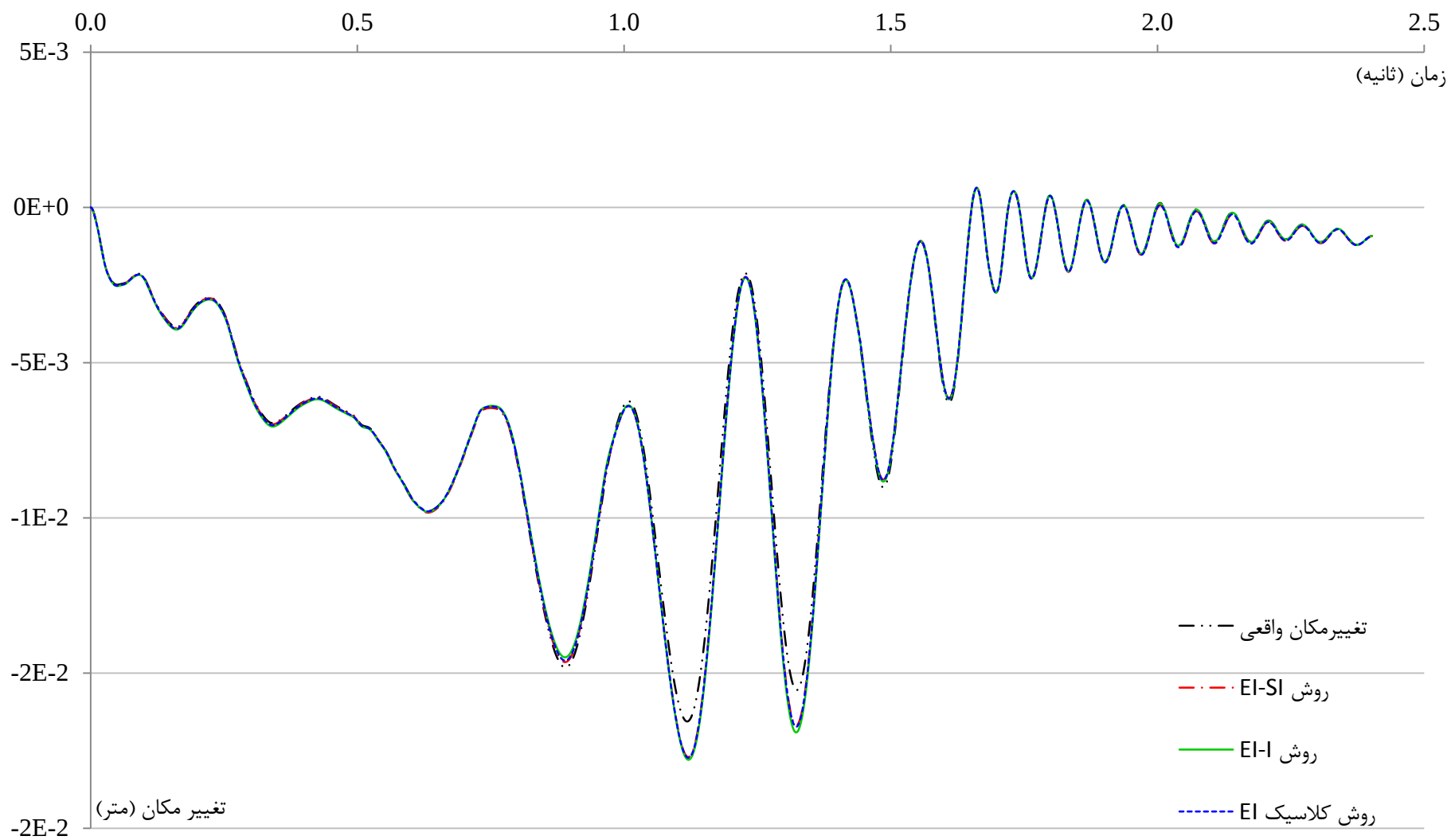
نمودار (الف-۹) تغییر مکان واقعی گره ۱۴ و تخمین آن با روش‌های مختلف



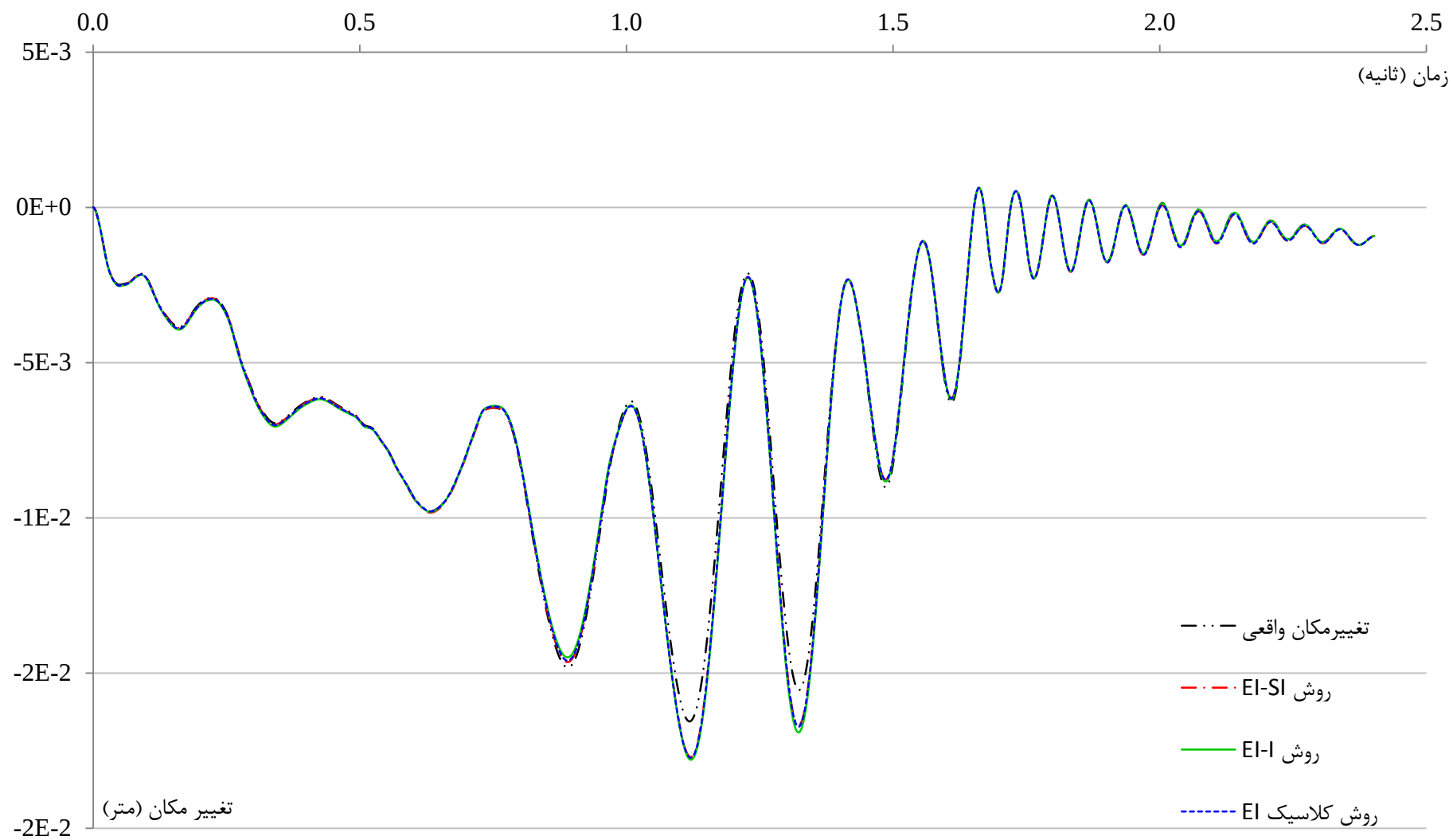
نمودار (الف-۱۰) تغییر مکان واقعی گره ۱۵ و تخمین آن با روش‌های مختلف



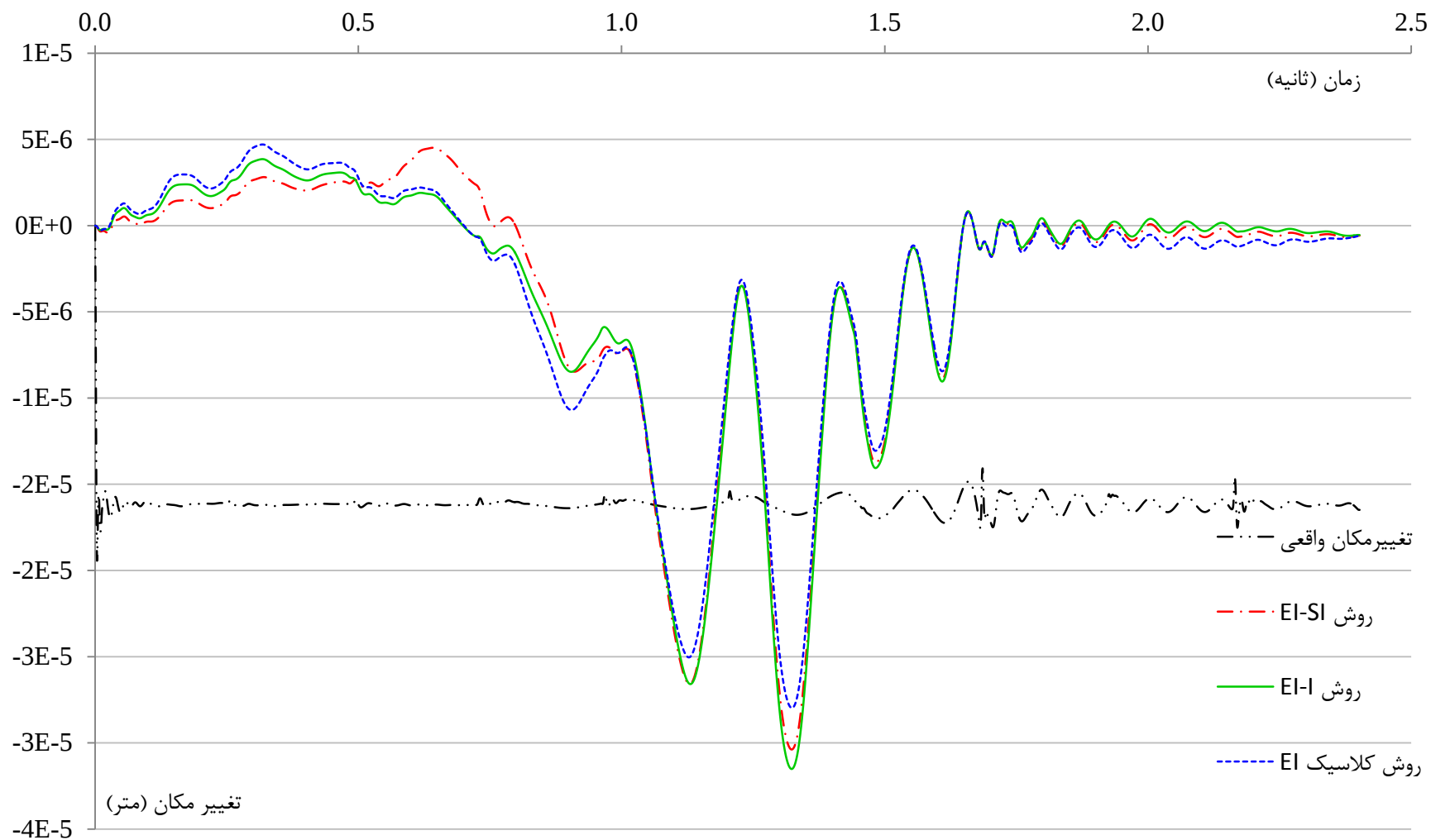
نمودار (الف-۱۱) تغییر مکان واقعی گره ۱۶ و تخمین آن با روش‌های مختلف



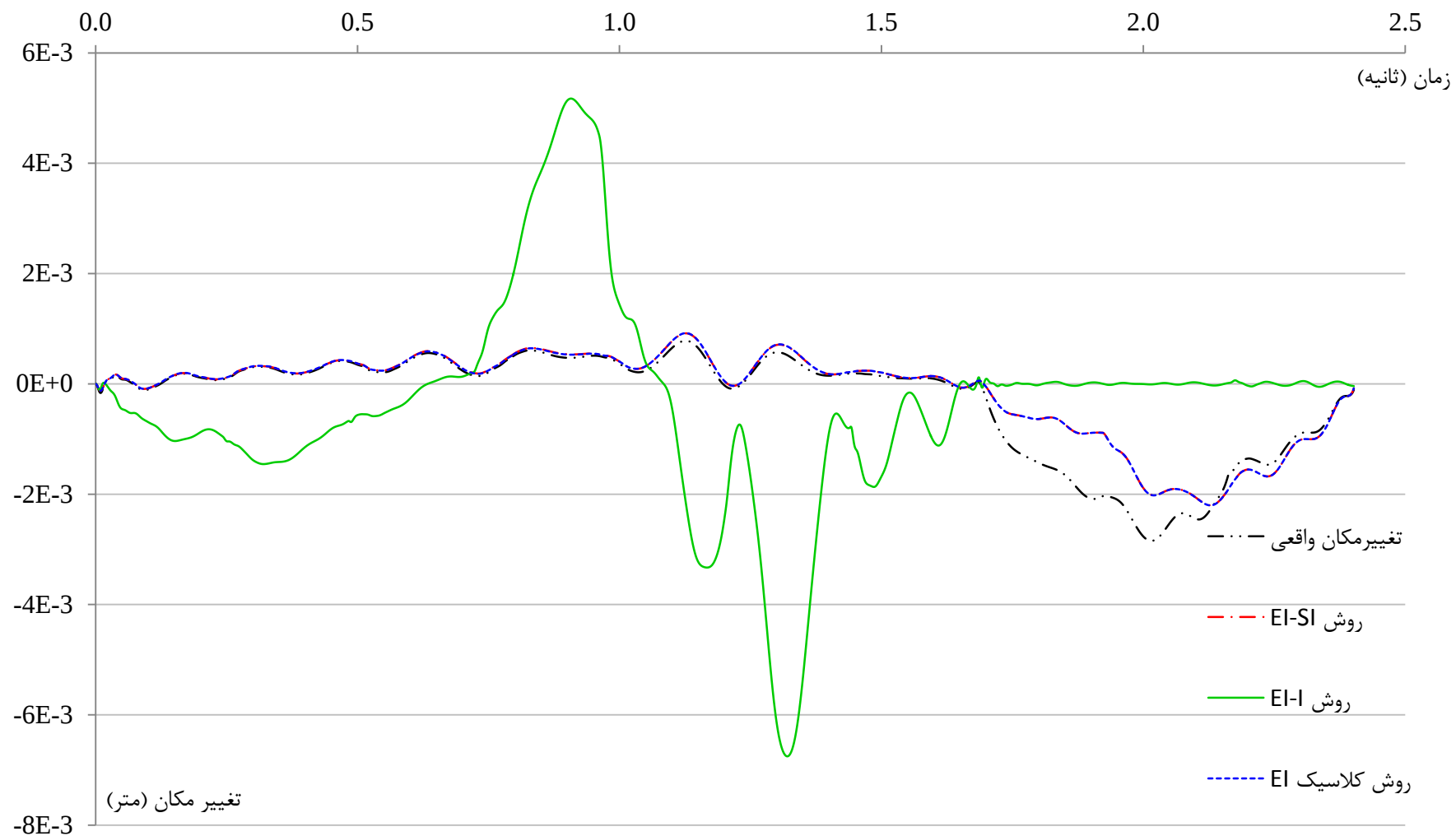
نمودار (الف-۱۲) تغییر مکان واقعی گره ۱۷ و تخمین آن با روش‌های مختلف



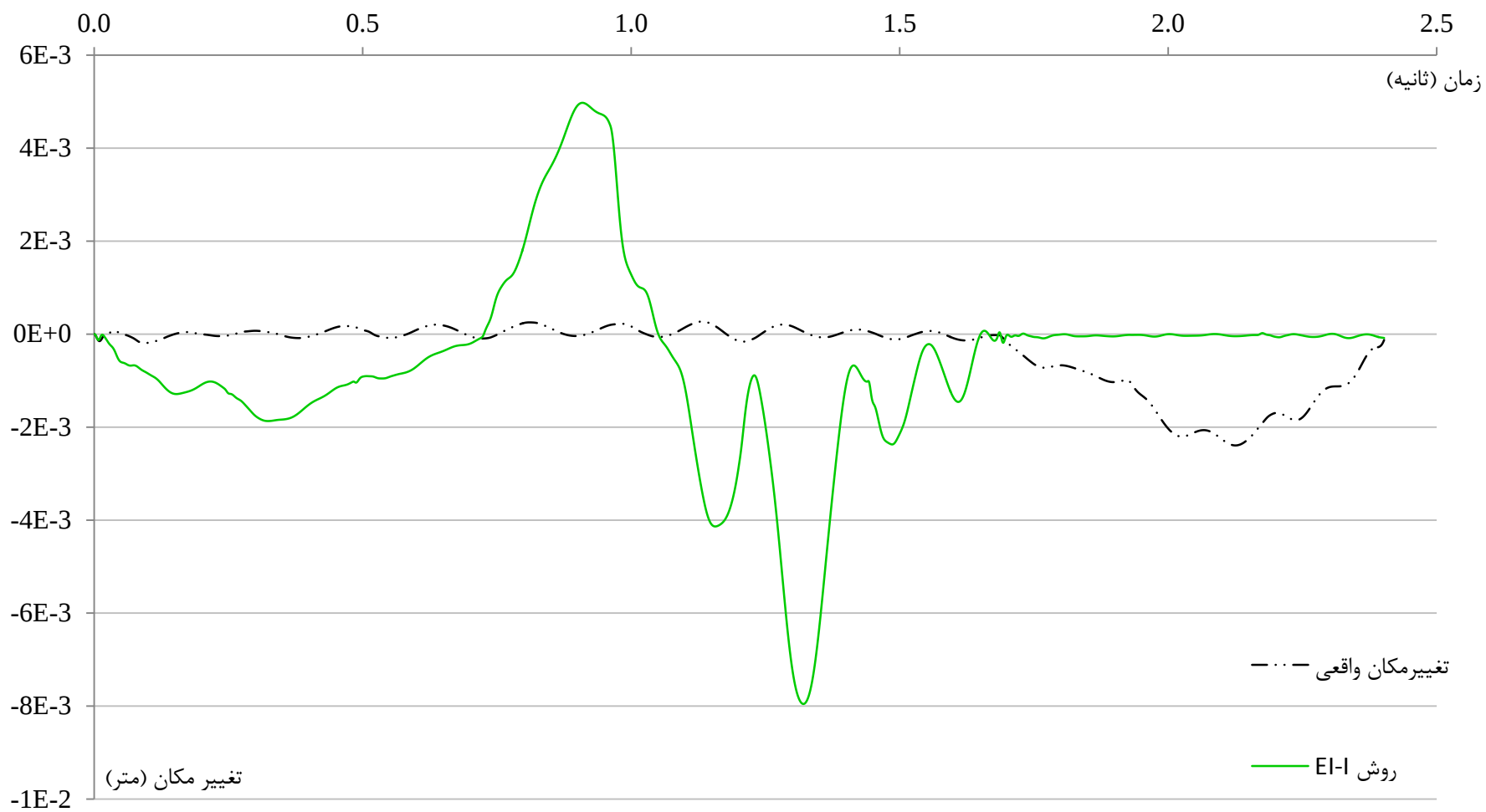
نمودار (الف-۱۳) تغییر مکان واقعی گره ۱۸ و تخمین آن با روش‌های مختلف



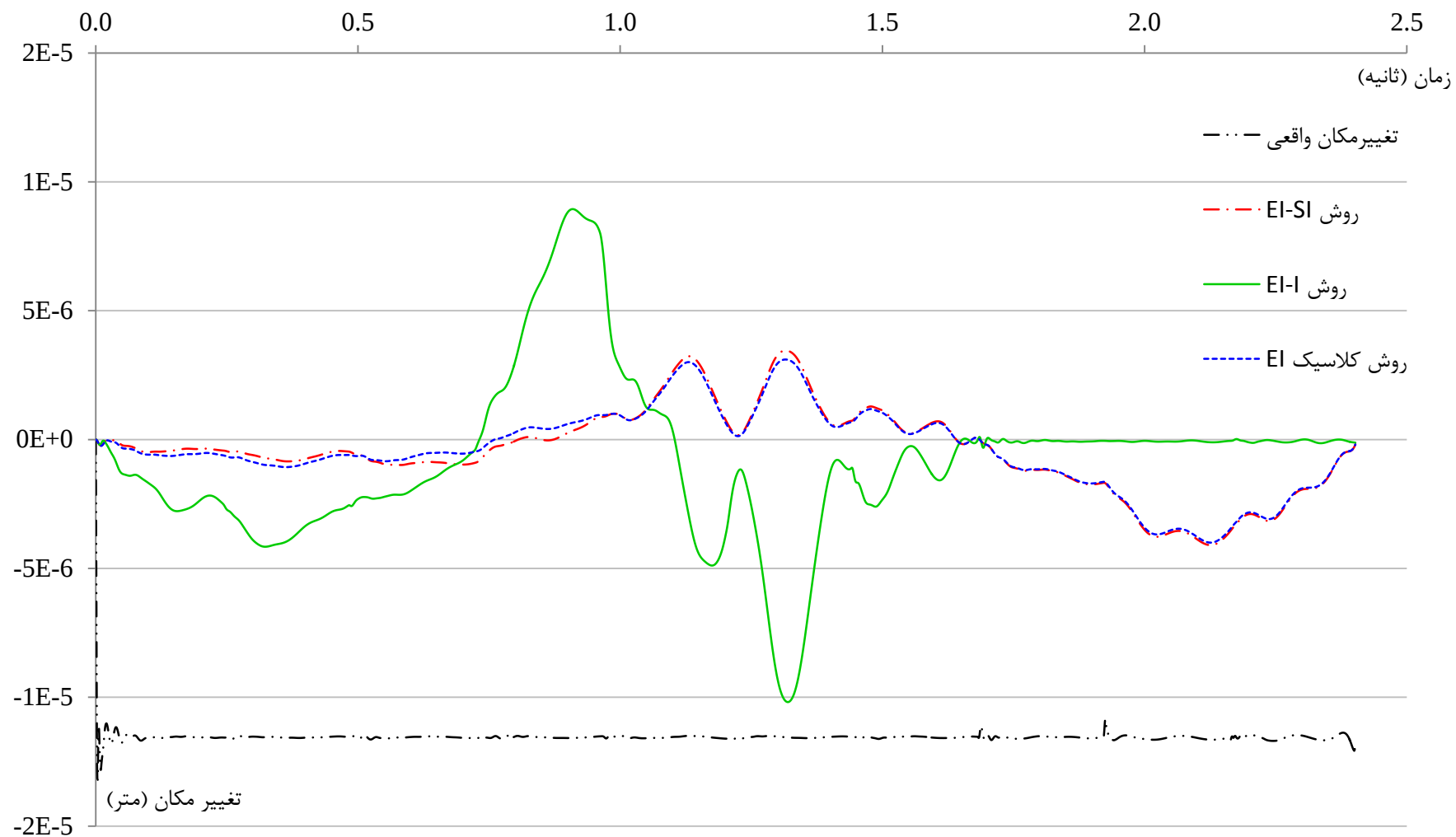
نمودار (الف-۱۴) تغییر مکان واقعی گره ۱۹ و تخمین آن با روش‌های مختلف



نمودار (الف-۱۵) تغییر مکان واقعی گره ۲۰ و تخمین آن با روش‌های مختلف



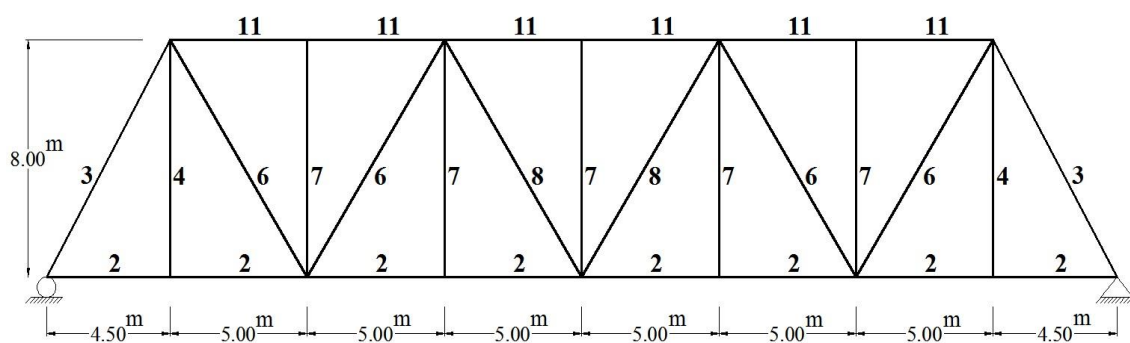
نمودار (الف-۱۶) تغییر مکان واقعی گره ۲۱ و تخمین آن با روش‌های مختلف



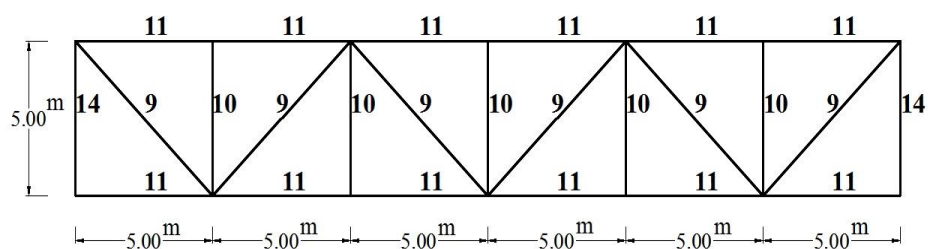
نمودار (الف-۱۷) تغییر مکان واقعی گره ۲۲ و تخمین آن با روش‌های مختلف

پوست ب

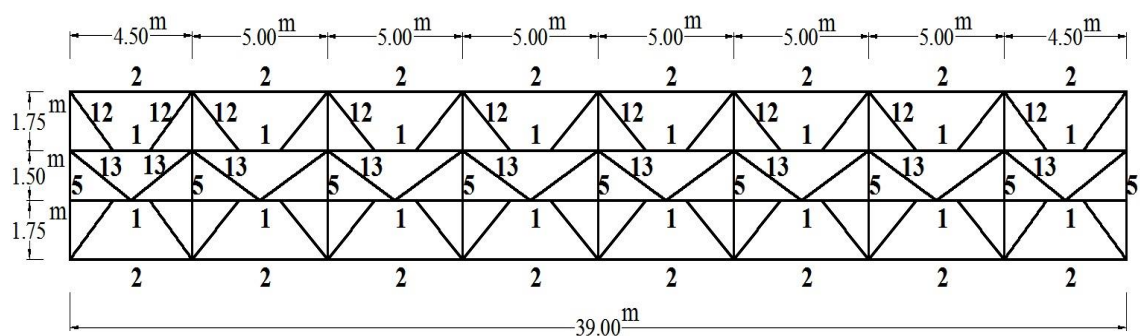
مقاطع به کار رفته در ساخت پل باقرآباد



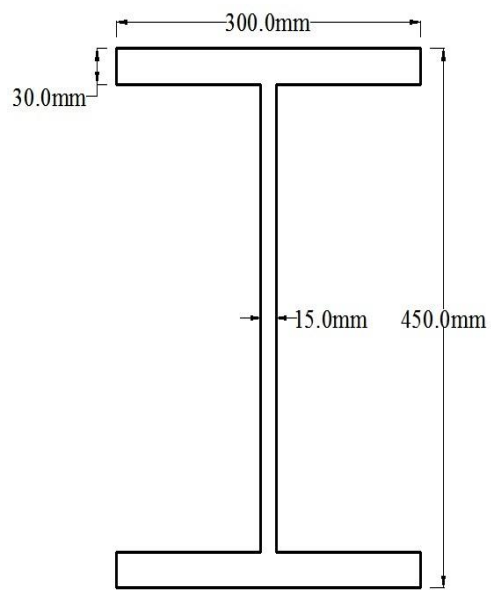
شکل (ب-۱) نمای شرقی و غربی پل



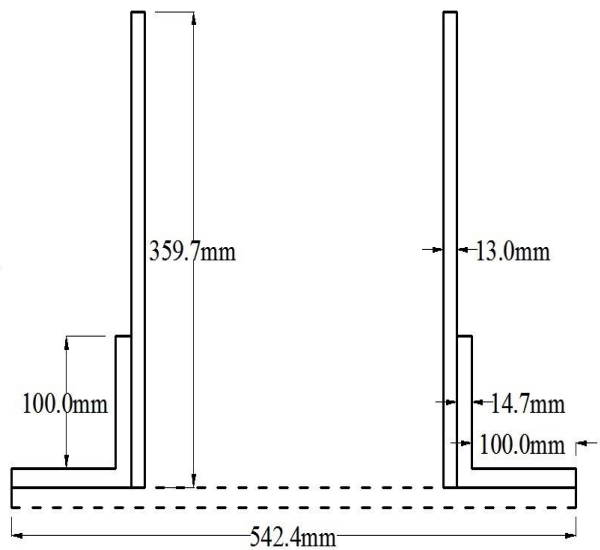
شکل (ب-۲) نمای سقف پل



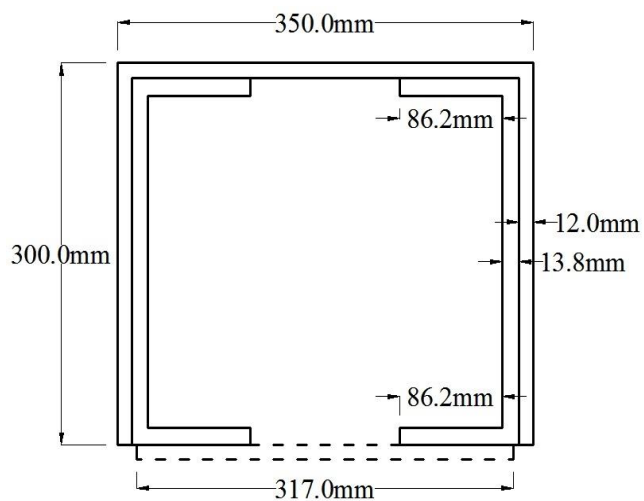
شکل (ب-۳) نمای کف پل



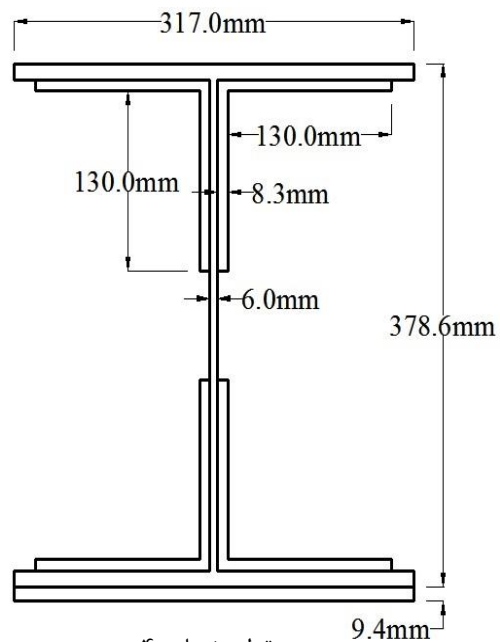
مقطع شماره ۱



مقطع شماره ۲

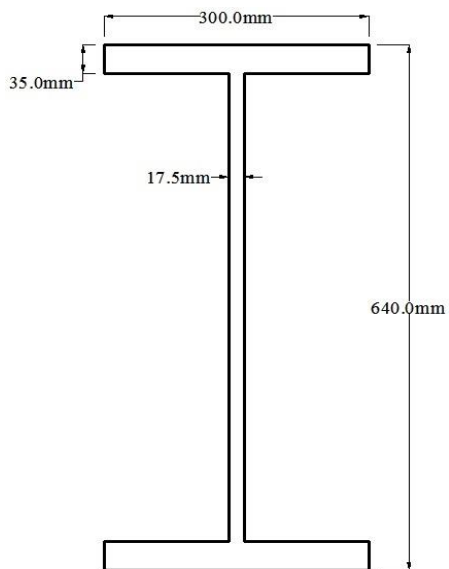


مقطع شماره ۳

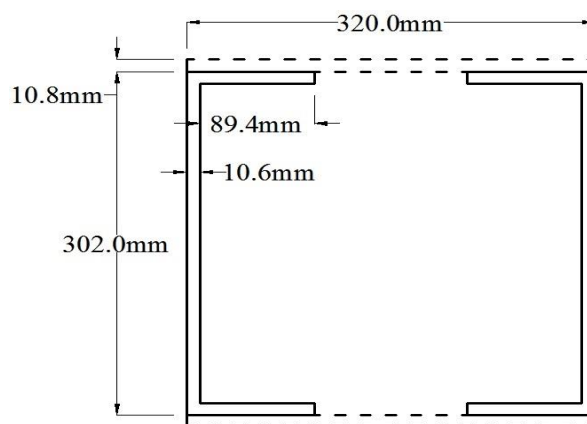


مقطع شماره ۴

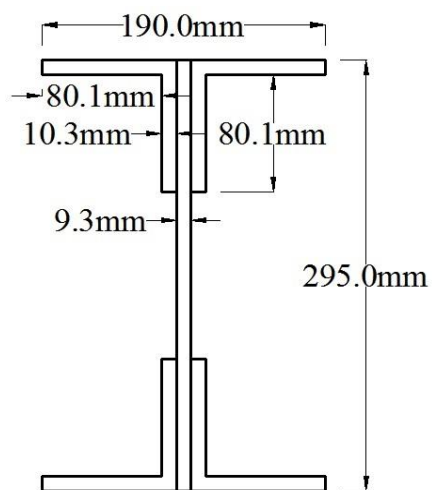
شکل (ب-۴) مقاطع استفاده شده در ساخت پل



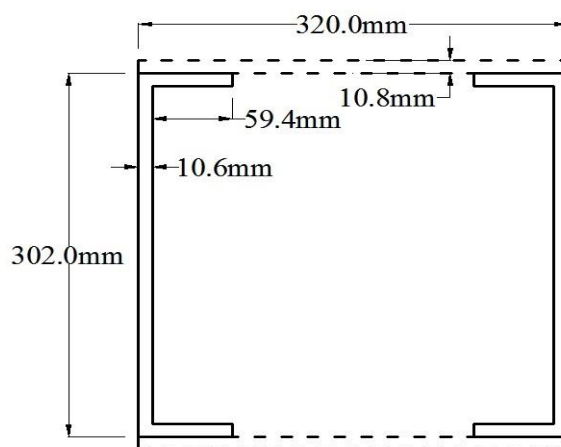
مقطع شماره ۵



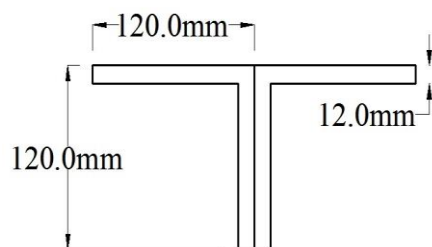
مقطع شماره ۶



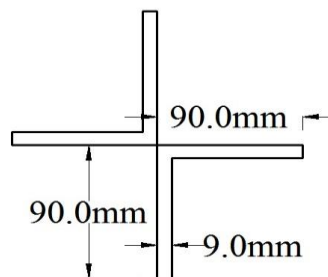
مقاطع شماره ۷ و ۱۴



مقطع شماره ۸

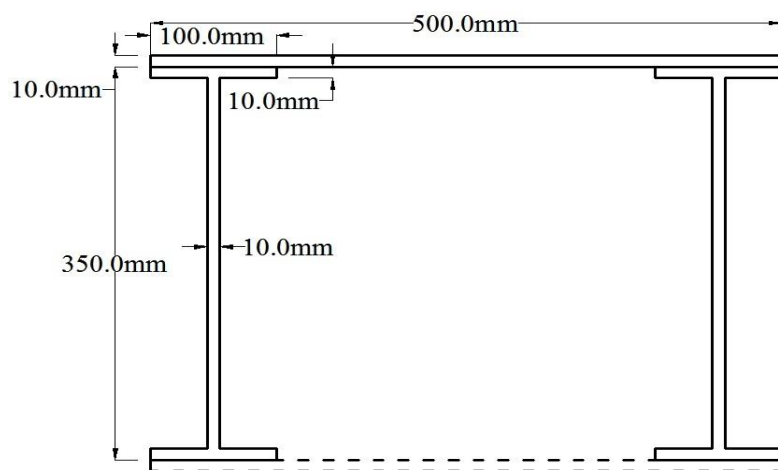


مقاطع شماره ۹ و ۱۲



مقاطع شماره ۱۰ و ۱۳

ادامه شکل (ب-۴) مقاطع استفاده شده در ساخت پل



مقطع شماره ۸

ادامه شکل (ب-۴) مقاطع استفاده شده در ساخت پل

پیوستج

کد برنامه متلب برای روش EI


```

format long;
clear all;
clc;
phit=input('Enter Target Mode Shape Matrix:');
N=input('Enter Number of Sensors (N):');
M= input('Enter Number of Modes (M):');
if N<M;
disp 'N must be equal or bigger than M';
end;
if N>=M;
phi=phit(:,1:1:M);
[o,m]=size(phi);
n=o-N;
for i=1:n;
EID=diag(phi*(inv(phi'*phi))*phi');
[s,t]=min(EID);
phi(t,:)=[];
end;
EID(t,:)=[];
EID
phi
end;

```


منابع

- [1] J.M.W Brownjohn, (2007), “Structural health monitoring of civil infrastructure”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365(1851), pp. 589–622.
- [2] Xu Dongyu, Cheng Xin, Huang Shifeng, Jiang Minhua, (2010), “Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor”, *Construction and Building Materials*, 24(12), pp. 2522–2527.
- [3] LI Hui, OU Jinping, (2011), “Structural Health Monitoring: From Sensing Technology Stepping to Health Diagnosis”, *Procedia Engineering*, 14, pp. 753–760.
- [4] Benjamin Torres, Ignacio Payá-Zaforteza, Pedro A. Calderón, Jose M. Adam, (2010), “Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring”, *Engineering Structures*, 33(2), pp. 539–548.
- [5] Ross R. M. & Matthews S. L., (1995), “In-service structural monitoring—a state of the art review”, *Structural Eng.* 73(2), pp. 23–31.
- [6] Binbin Li, Jinping Ou, Xuefeng Zhao, Dongsheng Li, (2011), “Optimal Sensor placement in Health Monitoring System of Xinghai Bay Bridge”, ANCRiSST, Dalian, China.
- [7] M. Meo and G. Zumpano, (2005), “On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure”, *Engineering Structures*, 27(10), pp. 1488-1497.
- [8] D. C. Kammer, (1991), “Sensor Placement for On-orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures”, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 14(2), pp. 251-259.
- [9] T. G. Carne and C. R. Dohrmann, (1995), “A modal test design strategy for model correlation”, Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, P 927, Nashcille, USA.
- [10] Imamovic N, (1998), Ph.D. dissertation, “Model validation of large finite element model using test data”, Imperial College, London.
- [11] Park. Y. S. and Kim. H. B, (1996), “Sensor Placement Guide for Model Comparison and Improvement” Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference, P 404, Dearborn, USA.
- [12] D. S. Li, H. N. Li, and C. P. Fritzen, (2007), “The connection between effective independence and modal kinetic energy methods for sensor placement” *Journal of Sound and Vibration*, 305(4-5), pp. 945-955.
- [13] Ray W.Clough, Joseph Penzien, (1995), *Dynamics of Structures*, third edition, Computers & Structures Inc, USA, pp. 201.
- [14] Larson C. B, Zimmerman D. C. and Marek E. L., (1994), “A Comparison of Modal Test Planning Techniques: Excitation and Sensor Placement Using the NASA 8-Bay Truss” Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, P 205, Honolulu, USA.

- [١٥] Chung, Y. T. and Moore D., (1993), "On-Orbit Sensor Placement and System Identification of Space Station with Limited Instrumentations", Proceedings of the 11th International Modal Analysis Conference, P 41, Kissimmee, USA.
- [١٦] De Clerck JP, Avitable P., (1998), "Development of several new tools for pre-test evaluation", Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference, P 1272, Santa Barbara, USA.
- [١٧] Penny JET, Friswell MI, Garvey SD., (1994), "Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic Testing", *AIAA Journal*, 32(2), pp. 407-414.
- [١٨] Robert J. Guyan, (1964), "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", *AIAA Journal*, 3(2), pp. 380.
- [١٩] Garvey S. D., Friswell M. L. and Penny J. E., (1996), "Evaluation of a Method for Automatic Selection of Measurement Locations Based on Subspace-Matching", Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference, P 1546, Dearborn, USA.
- [٢٠] F.M. Hemez and C. Farhat, (1994), "An Energy Based Optimum Sensor Placement Criterion and its Application to Structural Damage Detection", Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, P 1568, Honolulu, USA.
- [٢١] Heo G., M. L. Wang and D. Satpathi, (1997), "Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(7-8), pp. 495-502.
- [٢٢] Li D. S., Fritzen C. P., Li H. N., (2008), "Extended MinMAC Algorithm and Comparison of Sensor Placement Methods", Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference, P 2307, Orlando, USA.
- [٢٣] Schedlinski C, Link M., (1996), "An approach to optimal pick-up and exciter placement", Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference, P 376, Dearborn, USA.
- [٢٤] Yi T. H, Li H. N, Gu M., (2011), "Optimal sensor placement for structural health monitoring based on multiple optimization strategies", *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 20(7), pp. 881-900.
- [٢٥] Ting-Hua Yi and Hong-Nan Li, (2012), "Methodology Developments in Sensor Placement for HealthMonitoring of Civil Infrastructures", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, 11 pages.
- [٢٦] Rafael Castro-Triguero, Senthil Murugan, Michael I. Friswell, Rafael Gallego, (2013), "Optimal Sensor Placement for Structures Under Parametric Uncertainty", *Topics in Dynamics of Bridges*, 3, pp. 125-132.

- [۲۷] Q. Fei, A. Li, C. Miao and L. Zhang, (2008), “Vibration Sensor Placement Method Based on Principal Subset Selection”, *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 40(4), pp. 543-549.
- [۲۸] Poston W. L., (1991), Master's Thesis, “Optimal Sensor Locations for On-Orbit Modal Identification of Large Space Structures”, Engineering and Applied Science Depart, George Washington University.
- [۲۹] R.C Hibbeler, (2006), *Structural Analysis*, sixth edition, Prentice Hall, Singapore, pp. 82.

Abstract

Civil infrastructures are very important for every society and include buildings, bridges, power plants, petroleum installations, geotechnical structures, etc. These civil engineering structures usually have complicated design, and are influenced by the excessive using, aging and so on. Due to these interactions, their ability to resist natural and unnatural events will decrease. Maintaining safety, reliability and using ability of these structures is essential. Therefore, it is important to monitor the change of structural state to identify probable damage locations and their measure. The Structural Health Monitoring (SHM) knowledge provides an approach for evaluation of safety and durability of structures during their life. One of these important infrastructures are bridges. Because of economic consequences, these structures are used despite of aging. So the ability for monitoring health of these structures is important.

Structural health monitoring provides an efficient way to ensure the safety of a structure. Nevertheless, with the restriction of limited financial resources, only a small number of sensors could be available in structural health monitoring system (SHMS). Sensor system is a basic portion of SHMS. Unfortunately, the number of sensors installed in a structure is strongly limited by the corresponding costs. So, how to arrange the limited sensors in a structure is very important in the design and construction of an efficient SHMS. The main goal of this thesis is identification the location of sensors for structural health monitoring system for railway bridge. Due to moving train on the bridge the mode shapes of bridge change. Sensor placement of such structure cannot be performed by ordinary optimal sensor placement (OSP) techniques. Several approaches for finding optimal placement of sensors have been proposed in this thesis. One of them shows better results than ordinary OSPs.

Keywords: Structural Health Monitoring; Finite Element Method; Sensor; Railway Bridge



Shahrood University
Faculty of Civil Engineering

**Optimal Sensor Placement for Health
Monitoring of Railway Bridge by Analyzing its
Finite Element Model**

Hamed Ramezani oomali

Supervisor: Dr. Ali Keyhani

February 2014