

اثر تعامل دینامیکی خاک و شمع بر پل‌های دارای عرشه دال-تیر با استفاده از روش اجزای محدود

مقاله علمی - پژوهشی

معین زرگر*، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، اصفهان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: moeinzr@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۳۴۰-۳۳۱

چکیده

درک دقیق رفتار سازه‌ها در هنگام زلزله همواره یکی از چالش‌های مهندسان بوده است. افزایش آگاهی در این زمینه می‌تواند به بهبود مقررات و طراحی‌های ایمن‌تر منجر شود. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در درک این رفتار، فهم رفتار خاک و سازه در هنگام زلزله است. خاک به دلیل رفتار غیرخطی خود، پاسخ لرزه‌ای سازه را تغییر داده و حرکت خاک تحت تأثیر وجود سازه قرار می‌گیرد. تأثیر پاسخ سازه بر رفتار غیرخطی خاک و به‌طور متقابل، نوع پاسخ و رفتار لایه خاک زیربنایی در حضور سازه، پدیده‌ای به نام تعامل خاک-سازه را شکل می‌دهد. اثرات تعامل خاک-سازه و اهمیت تغییرات در پاسخ لرزه‌ای سازه از طریق تحلیل این مجموعه رفتاری عموماً قابل چشم‌پوشی نیست. این اثرات ممکن است باعث افزایش یا کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه یا دیگر پارامترهای لرزه‌ای ناشی از نیروی زلزله شوند. همچنین این امکان وجود دارد که با وقوع این تغییرات، توزیع نیرو در اعضای سیستم مقاومت جانبی نیز تغییر کرده (کاهش یا افزایش یابد) و بر ایمنی، کارایی یا دوام آنها تأثیر بگذارد. در این مطالعه، اثر تعامل دینامیکی خاک و شمع بر پل‌های دارای عرشه دال-تیر با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، یک پل با عرشه دال بتن آرمه و فونداسیون عمیق، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات تعامل بررسی شده است. در این پژوهش، تنش‌ها، کرنش‌ها، جابجایی‌ها و شتاب‌های عرشه پل مطالعه شدند. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن تعامل خاک و شمع، تنش ماکزیمم مجموعه پل در مدل مورد مطالعه را افزایش داده است. با این حال، بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که تعامل خاک و سازه باعث کاهش تنش در عرشه و فونداسیون پل و افزایش میزان تنش در پشت شمع و گروه شمع‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تعامل خاک و سازه، پاسخ لرزه‌ای، تحلیل اجزای محدود

۱-مقدمه

ارزیابی رفتار پل‌های مورب بزرگراهی با و بدون در نظر گرفتن اثرات تعامل خاک و سازه تحت تأثیر حرکات نزدیک گسل بود. با استفاده از هفت رکورد پالس با شدت بالا و سه مؤلفه (دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه عمودی) تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش زاویه تورب تأثیر بسزایی بر جابجایی‌ها و تغییر شکل‌های کلیدی دارد، در حالی که در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه باعث کاهش نیازهای لرزه‌ای در مقایسه با مدل‌سازی با فونداسیون صلب شد. در همان سال، سیاهی اثرات تعامل خاک و سازه و تأثیر قاب‌های پر شده

یکی از روش‌های مطالعه عملکرد استاتیکی و دینامیکی سازه‌های خاکی در مهندسی ژئوتکنیک استفاده از روش‌های عددی است. با توجه به پیچیدگی‌های رفتار خاک، مدل‌های رفتاری مختلف، حضور آب در خاک و تعامل خاک و سازه، شبیه‌سازی عددی این پدیده‌ها همچنان یکی از موضوعات مورد بحث در دنیا است و نتایج متعددی در این زمینه ارائه شده است. در سال ۲۰۱۹، سلطانی رفتار لرزه‌ای پل‌های بتنی مسلح مورب واقع بر بستر خاک رسی سخت را تحت تأثیر زلزله‌های نزدیک گسل و با در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه بررسی کرد. هدف این مطالعه

۲- روش‌های تحقیق

در این مطالعه، پل چهاردهانه‌ای با طول ۶۸ متر، عرض ۲۱ متر، و ارتفاع ستون ۱۱ متر با روش زلزله نورث‌ریچ و با استفاده از روش اجزای محدود بارگذاری شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند آباکوس انجام شده است. بارگذاری بر اساس نشریه شماره ۱۳۹ (آیین‌نامه بارگذاری پل‌های ایران) صورت گرفته است. هر پایه پل با استفاده از یک فونداسیون عمیق شامل ۹ شمع بتنی مدل‌سازی شد. در یک حالت، شمع‌ها بر روی بستر سنگی قرار داده شدند و در حالت دیگر، شمع‌ها فقط در خاک دفن شدند. در نهایت، نتایج دو مدل مقایسه و استخراج گردید. مدل پل در نرم‌افزار آباکوس در بخش Part به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. مدل پل شامل ۴ دهانه با طول ۶۸ متر و عرض ۲۱ متر است. ستون‌های پل با ارتفاع ۱۱ متر و مقطع عرضی 914×914 میلی‌متر مدل‌سازی شدند و تیرهای 1219×914 میلی‌متری بر روی آن‌ها قرار گرفتند. ستون‌ها بر روی فونداسیون‌های بتنی با ابعاد $2134 \times 2134 \times 914$ میلی‌متر قرار دارند و ستون‌های میانی دارای فونداسیون‌هایی با ابعاد $2750 \times 2750 \times 914$ میلی‌متر هستند. شمع‌ها با قطر ۱ متر و ارتفاع ۴ متر به صورت سه‌بعدی و همراه با میلگرد مدل‌سازی شدند. میلگردهای عرشه به صورت جداگانه با المان Truss مدل‌سازی و در بخش Assembly در کنار یکدیگر قرار گرفتند. میلگردهای تیرها با طول ۱۹ متر و با فاصله‌های 305×820 میلی‌متر و فواصل ۳۰۵ میلی‌متر به یکدیگر متصل شدند. میلگردهای ستون‌ها با طول ۹۳۰۰ متر و با خاموت‌هایی به ابعاد 812×812 میلی‌متر و فاصله ۳۰۵ میلی‌متر مدل‌سازی شدند. میلگردهای تیرهای رابط فونداسیون‌ها که فونداسیون‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند، دارای طول ۱۵٫۳ متر بوده و خاموت‌ها با ابعاد 300×300 میلی‌متر و فاصله ۲۷۰ میلی‌متر تعریف شده‌اند.

۳- ویژگی‌های مصالح

خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول زیر (جدول ۱) تعریف و به مدل‌ها اعمال شده است. مدل فولاد به صورت الاستوپلاستیک و با مشخصات ارائه شده در جدول تعریف شد. مدل بتن نیز با استفاده از روش CDP تعریف گردید.

بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها را بررسی کرد. این مطالعه با استفاده از دستورالعمل FEMA440 و ارزیابی معیارهای تعامل خاک و سازه، مدل‌هایی شامل ۳، ۶، ۸، و ۱۵ دهانه را تحلیل کرد. نتایج نشان داد که تعامل خاک و سازه و قاب‌های پر شده تأثیر چشمگیری بر پاسخ سازه‌ها دارند.

عسگری در سال ۲۰۱۹، تأثیر تعامل خاک و سازه را بر مشخصات مدل توربین‌های بادی بزرگ مقیاس بررسی کرد. این مطالعه با مدل‌سازی تعامل خاک و سازه با استفاده از نرم‌افزار CONAN و تحلیل سازه‌ای در SAP2000، تأثیر نوع خاک بر فرکانس‌های طبیعی سازه را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که نوع خاک اثر قابل توجهی بر تغییر فرکانس طبیعی دارد، به طوری که کاهش سختی خاک باعث افزایش تغییرات فرکانس و افزایش مشارکت مدهای بالاتر می‌شود. (اصغری و جانی، ۱۳۸۸)

در همان سال، شایانفر اثر پدیده تعامل خاک و سازه را بر منحنی شکنندگی پل‌های بتنی سه‌دهنه ارزیابی کرد. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان داد که تعامل خاک و سازه باعث تغییرات چشمگیر در پاسخ لرزه‌ای و منحنی‌های شکنندگی برخی از اجزای پل مانند ستون‌ها و جابجایی عرضی عرشه می‌شود، در حالی که اثر کمی بر مقاومت تکیه‌گاه‌ها داشت. (آشتو ۱۹۹۶)

همچنین در سال ۲۰۱۹، اصغری و جانی رفتار عددی پاسخ لرزه‌ای گروه شمع‌ها با در نظر گرفتن اثرات تعامل خاک-سازه-شمع را مطالعه کردند. مطالعه نشان داد که فاصله بین شمع‌ها بر پاسخ دینامیکی و نیروهای داخلی تأثیرگذار است و افزایش سختی خاک باعث کاهش جابجایی‌های حداکثری می‌شود (عسگری فورک، محتشمی و مهرآباد، ۱۳۸۸)

در سال ۲۰۱۸، افتخاری و صفی تأثیر پارامترهای برشی خاک را بر تعامل خاک و سازه در سازه‌های بتنی مبتنی بر ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که تعامل خاک و سازه باعث تغییر شکل‌های جدید در اعضای مختلف شده و در برخی موارد منجر به کاهش یا افزایش وزن و سطح میلگردها می‌شود. همچنین، این اثرات باعث افزایش زمان تناوب سازه و کاهش برش پایه و جابجایی‌ها می‌شود. (کاردر و بارکر، ۲۰۰۵)

جدول ۱. ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در تحقیق

ضریب آلفا در قالب رایلی	زاویه گسترش	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول کششی	ضریب پواسون	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مواد
0.128	22.5	1000	33	1.3*107	0.25	1860	خاک
1	15	-----	-----	2.12*1010	0.15	2400	بتن مسلح
1	15	-----	-----	2.37*1010	0.15	2400	بتن مسلح
-----	-----	-----	-----	109*2.059	0.3	7850	میلگرد

۴-مدل رفتاری خاک

مدل رفتاری خاک در این مطالعه، مدل موهر-کولمب است (شکل ۱) که برای مدل‌سازی مصالح با معیار تسلیم کلاسیک موهر-کولمب استفاده می‌شود. این مدل امکان تعریف رفتار مواد به صورت سخت یا نرم و به صورت ایزوتروپیک را فراهم می‌کند. در معیار تسلیم موهر-کولمب فرض می‌شود که تسلیم زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی در هر نقطه از ماده به مقداری برسد که به صورت خطی به تنش نرمال اعمال شده بر همان صفحه وابسته است. مدل موهر-کولمب بر اساس ترسیم دایره‌های موهر برای وضعیت تنش در حالت تسلیم صفحات با تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل پایه‌ریزی شده است. این مدل، با ارائه رویکردی ساده و قابل فهم برای تعیین معیار شکست و تسلیم در خاک، امکان تحلیل رفتار غیرخطی مصالح خاکی را در شرایط مختلف تنش فراهم می‌کند.

۴-۱- مشخصات پلاستیک بتن و فولاد

پس از رسیدن به نقطه تسلیم، رفتار ماده از حالت خطی خارج می‌شود و اطلاعات بیشتری برای مدل‌سازی آن مورد نیاز است. این اطلاعات از آزمایش‌های کشش بعد از نقطه تسلیم به دست می‌آید. برای مدل‌سازی ماده در محدوده تغییر شکل‌های محدود، دسترسی به این اطلاعات ضروری است. یک مسئله بسیار مهم در مدل‌سازی ماده در محدوده پلاستیک این است که در آزمایش کشش، نتایج به دست آمده از دستگاه به صورت تنش و کرنش مهندسی یا اسمی هستند. همان‌طور که مشخص است، برای تبدیل تنش و کرنش اسمی به تنش و کرنش واقعی، روابط زیر استفاده می‌شود.

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0)$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0)$$

که در این روابط ε_0 و σ_0 به ترتیب کرنش و تنش اسمی هستند، ε و σ به ترتیب کرنش و تنش واقعی هستند.

ارائه شده است. مطابق توضیحات فوق، تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از آزمایش کشش به تنش‌ها و کرنش‌های واقعی تبدیل شده‌اند و نتایج در جدول زیر (جدول ۲) آمده است.

با توجه به این نکته مهم، تنش‌ها و کرنش‌های به دست آمده از آزمایش کشش میلگرد A-III باید به تنش‌ها و کرنش‌های واقعی تبدیل شوند. نمودار تنش-کرنش واقعی میلگرد A-III در زیر

جدول ۲. تنش-کرنش واقعی فولاد (لوگان، ۲۰۱۱)

کرنش پلاستیک	کرنش	تنش (MPa)
0	0	0
0	0.00269	538
0.003942	0.006632	559
0.027271	0.029961	631
0.038735	0.041425	679
0.057553	0.060243	753
0.083318	0.086008	835
0.10843	0.11112	878
0.12947	0.13216	918
0.15008	0.15277	960
0.17359	0.17628	1005
0.19005	0.19274	1022
0.20303	0.20572	1035

مشخصات گسیختگی پلاستیک بتن

تعیین رفتار غیرخطی بتن، مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی سازه‌های بتن مسلح است. در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، رفتار غیرخطی مصالح شکننده به سه روش قابل مدل‌سازی است.

-مدل ترک‌خوردگی

-مدل شکست شکننده

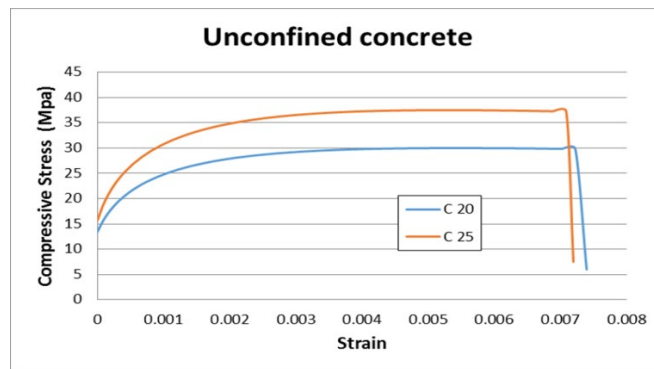
-مدل پلاستیک خرابی بتن

هر یک از این مدل‌ها دارای مزایای خاصی هستند که می‌تواند بسته به نیاز استفاده شوند.

مدل پلاستیک خرابی بتن تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است. در این مدل فرض

می‌شود که ترک‌های کششی و شکست‌های فشاری دو جنبه اصلی مکانیزم شکست بتن هستند. این مدل برای مدل‌سازی خرابی مصالح شکننده تحت بارگذاری تناوبی کشش و فشار طراحی شده و امکان بازیابی سختی در طی سیکل‌های بارگذاری وجود دارد.

این مدل در تمامی محصولات آباکوس برای نواحی که بتن تحت بار است استفاده می‌شود. مبنای این مدل رفتاری، ضریب خرابی چرخه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، برای تعیین رفتار غیرخطی بتن از مدل پلاستیک خرابی بتن استفاده شده است. این مدل به‌طور خاص برای شبیه‌سازی بارگذاری سیکلی طراحی شده و قادر است رفتار غیرخطی بتن تحت بارگذاری پیچیده را به‌طور دقیق نمایش دهد.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش پلاستیک بتن

تعریف المان و واکنش سطوح

برای بخش بتنی، یک مقطع جامد با استفاده از دستور Assign Section تعریف و اعمال شد. همچنین، مقاطع میلگردها به صورت خرپا با وارد کردن مساحت مقطع عرضی در مدل‌سازی تعریف شدند و به مواد اعمال گردیدند.

تعریف حل‌کننده و واکنش سطوح

در بخش Assembly، اجزا در کنار هم قرار داده شدند. فاصله بین ستون‌ها ۱۹ متر در نظر گرفته شد. در بخش Step، یک گام

Dynamic Explicit با مدت‌زمان ۴۰ ثانیه تعریف شد. در بخش Interaction، شبکه میلگردها با دستور Embedded Region در داخل بخش بتنی مدفون شدند. اتصال بین شمع‌ها و پایه‌های بتنی به‌صورت اتصال کامل با دستور Tie تعریف شد. اتصال بین سطح زیرین دال و سطح فوقانی تیرها نیز با استفاده از دستور Tie ایجاد گردید. تماس بین سایر سطوح با دستور Create Interaction و ضریب اصطکاک ۰٫۱، تعریف شد.

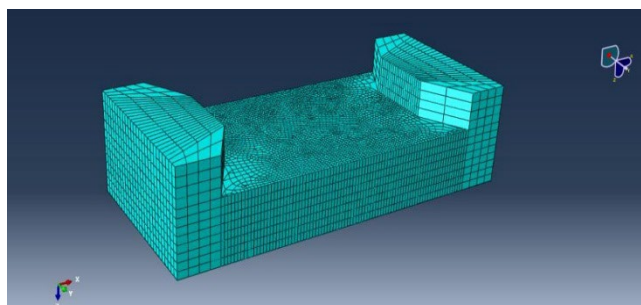
شبکه‌بندی

در بخش شبکه‌بندی نرم‌افزار آباکوس، مدل‌ها شبکه‌بندی شدند. دال و ستون‌های پل با اندازه المان ۰٫۵ متر و نوع المان سه‌بعدی پیوسته ۸ گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته C3D8R شبکه‌بندی شدند. همان‌طور که ذکر شد، المان C3D8R برای تمام قسمت‌های بتنی استفاده شد. این المان سه‌بعدی، دارای هشت گره است و از روش انتگرال کاهش‌یافته برای حل انتگرال‌ها

شرایط مرزی

در بخش LOAD، شرایط مرزی مدل اعمال شد. دو سمت پل و پایه‌های آن با شتاب زلزله Northridge تحت بارگذاری قرار گرفتند.

مناسب هستند. بنابراین، ارائه راه‌حلی جایگزین برای تحلیل مسائل خمشی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از پیشنهادهای موجود، استفاده از المان‌هایی است که نقاط انتگرال آن‌ها کاهش یافته و به عنوان المان‌های **Reduced Integration** شناخته می‌شوند. المان‌های با انتگرال کاهش یافته، یک نقطه انتگرال کمتر در هر جهت دارند. بنابراین، المان‌های خطی این گروه تنها از یک نقطه انتگرال در مرکز استفاده می‌کنند. شکل زیر (شکل ۴) محل قرارگیری این نقاط را در المان‌های خطی و مرتبه دوم نشان می‌دهد. (فیتزجرالد و باسو، ۲۰۱۶)



شکل ۴. مدل‌سازی خاک در مدل مورد مطالعه

و مقدار تنش **Von Mises** کمتر از تنش تسلیم باشد، شکست رخ نمی‌دهد. اما اگر این مقدار بیشتر باشد، المان به نقطه تسلیم می‌رسد. در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند آباکوس، معمولاً از تنش **Von Mises** برای تحلیل تنش‌های ماده استفاده می‌شود. حداکثر تنش در حالت بدون در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه:

$$4/13 \text{ مگاپاسکال}$$

حداکثر تنش در حالت با تعامل خاک و سازه:

$$23/63 \text{ مگاپاسکال}$$

با مقایسه این دو حالت، مشخص شد که تعامل خاک و فونداسیون، تنش حداکثر مدل را ۶۴٪ افزایش داده است. این تعامل، تنش‌های وارد بر دال و فونداسیون پل را کاهش داده و تنش‌های وارد بر فونداسیون و گروه شمع‌ها را افزایش داده است.

بررسی کرنش‌ها

حداکثر نرخ کرنش کلی در حالت تعامل خاک و سازه: ۰/۰۰۰۲۵۸
حداکثر نرخ کرنش کلی بدون تعامل خاک و سازه: ۰/۰۵۱

استفاده می‌کند. حرف **C** نشان‌دهنده تعلق این المان به خانواده المان‌های پیوسته است. این المان در هر گره دارای سه درجه آزادی برای جابه‌جایی در جهت محورهای **X**، **Y** و **Z** است. همچنین برای مش‌بندی پایه‌ها از المان‌های کوچکتر استفاده شد. برای مش‌بندی میلگردها نیز از المان دوگره‌ای **T3D2** استفاده شد. (افتخاری و بیت‌صفی، ۱۳۹۷)

معرفی المان با انتگرال کاهش یافته

به دلیل مشکل **Shear Locking** در المان‌های با انتگرال کامل، این گروه از المان‌ها در بارگذاری‌هایی با حداقل یا بدون خم

در بخش **Interaction**، شمع‌ها در داخل خاک مدفون شده‌اند. اتصال بین دو سمت پل و خاک به صورت اتصال کامل و با استفاده از دستور **Tie** تعریف شده است.

تعریف رفتار بتن و میلگردها

در این مدل‌سازی، از شرط **Embedded Region** استفاده شده است. با این شرط، می‌توان سطح تحمل بخشی از یک مدل را با کمک یک ناحیه میزبان (یا کل مدل) درون بخش دیگر تعیین کرد. میلگردها به عنوان ناحیه‌ای مدفون در بتن در نظر گرفته شدند. (فیتزجرالد و باسو، ۲۰۱۶)

بررسی تنش‌ها

برای المان‌هایی که تحت تأثیر تنش‌های نرمال هیبرید و برشی قرار دارند، می‌توان با استفاده از معیار تنش **Von Mises** بررسی کرد که آیا جسم به نقطه تسلیم رسیده است یا خیر. در المان مذکور، تنش‌های اصلی بر اساس دایره **Mohr** محاسبه می‌شوند. اگر این تنش‌ها در رابطه کنترل **Von Mises** جایگذاری شوند

بررسی جابه‌جایی

با بررسی تغییر مکان پیل در دو حالت:

با تعامل خاک و فونداسیون: ۳۴۵ میلی‌متر

بدون تعامل خاک و فونداسیون: ۷/۰۰۸ میلی‌متر

مشخص شد که تعامل خاک و فونداسیون باعث افزایش جابه‌جایی پیل به میزان ۴۹۲٪ شده است.

شتاب دال پیل

در ادامه، شتاب دال پیل در هنگام زلزله Northridge در دو حالت، با تعامل خاک و سازه (شکل ۵) و بدون تعامل خاک و سازه (شکل ۶) ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، باید گفته شود که حداکثر شتاب دال پیل در حالتی که اثرات تعامل در نظر گرفته شده بیشتر از حالتی است که اثرات تعامل در نظر گرفته نشده‌اند. حداکثر شتاب دال پیل در حالت اثرات تعامل ۲۳۴۸۰ (میلی‌متر بر ثانیه مربع) و در حالت عدم اثرات تعامل ۱۷۱۸۷ (میلی‌متر بر ثانیه مربع) است. در واقع، در نظر گرفتن اثرات تعامل خاک و سازه باعث افزایش ۷۳ درصدی شتاب دال پیل می‌شود.

با در نظر گرفتن تعامل، نرخ کرنش کلی در دال پیل ۲۰۰۰٪ کاهش یافته است. در منحنی تنش-کرنش، قبل از حد الاستیک، کرنش ماده الاستیک است و تغییر شکل آن پس از بارگذاری به حالت اولیه بازمی‌گردد. اما در صورتی که بار از حد الاستیک فراتر رود، تغییر شکل دائمی در ماده ایجاد می‌شود که به آن کرنش پلاستیک گفته می‌شود.

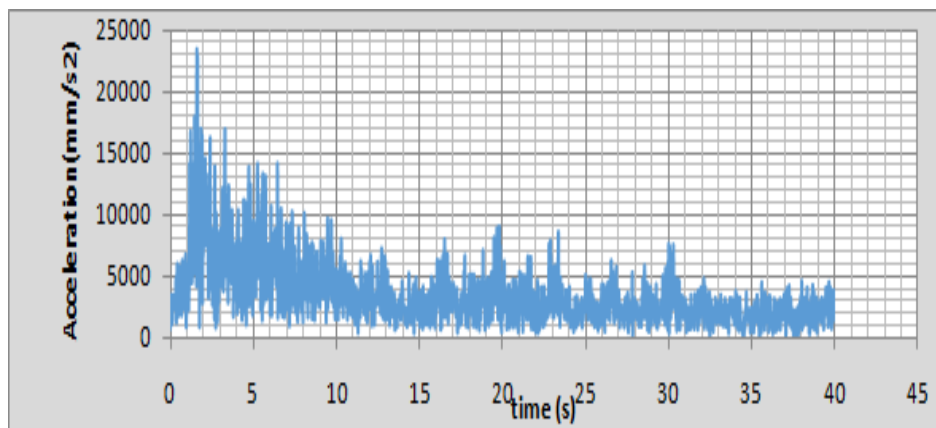
کرنش پلاستیک در دال با تعامل خاک و سازه: ۰/۰۱۶۳

کرنش پلاستیک در دال بدون تعامل خاک و سازه:

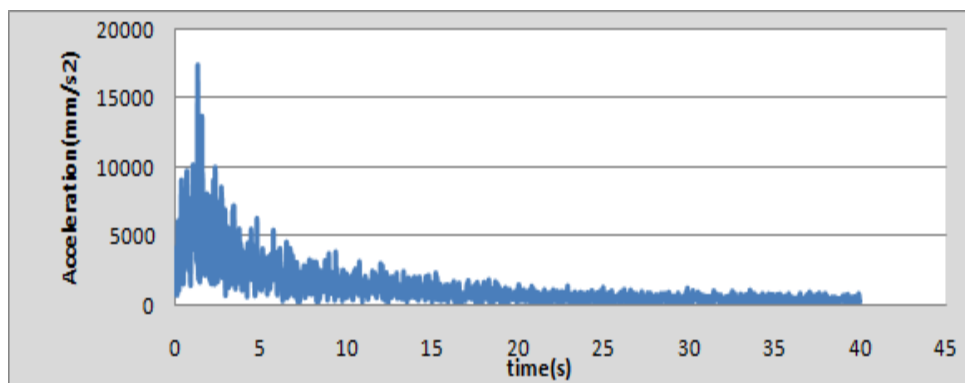
$$3.59 \times 10^{-6}$$

میزان کرنش پلاستیک در حالت تعامل خاک و سازه، ۴۵۴۰٪

بیشتر است که نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری دال است. همچنین کرنش پلاستیک پایه‌ها در حالت تعامل خاک و فونداسیون، ۲۲۰۰٪ بیشتر از حالت بدون تعامل است. بنابراین، این تعامل باعث افزایش شکل‌پذیری پایه‌ها می‌شود.



شکل ۵. شتاب دال پیل با در نظر گرفتن اثرات تعامل



شکل ۶. شتاب دال پیل بدون در نظر گرفتن اثرات تعامل

۵- نتیجه گیری

گرفتن اثرات تعامل خاک و پی باعث افزایش جابه‌جایی پل می‌شود. میزان جابه‌جایی بستگی به نوع خاک، سختی خاک، سازه و بارها دارد. حداکثر شتاب دال پل در حالتی که اثرات تعامل در نظر گرفته شده بیشتر از حالتی است که اثرات تعامل در نظر گرفته نشده است. حداکثر شتاب دال پل در حالت اثرات تعامل ۲۳۴۸۰ (میلی‌متر بر ثانیه مربع) و در حالت عدم اثرات تعامل ۱۷۱۸۷ (میلی‌متر بر ثانیه مربع) است. در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، معمولاً فرض بر این است که خاک تحت پی سازه سفت است و اثرات واکنشی بین خاک و سازه نادیده گرفته می‌شود. در این حالت، پاسخ سازه تنها تحت تأثیر خواص سازه‌ای خود سازه است و انعطاف‌پذیری خاک هیچ تأثیری بر پاسخ سازه ندارد. در واقع، پاسخ سازه تحت تأثیر ویژگی‌های دینامیکی خاک، پی و سازه قرار دارد که با فرض اینکه خاک زیر پی سفت است مغایرت دارد. تعامل خاک-سازه به دلیل عبور امواج زمین‌لرزه از سیستم خاک-سازه رخ می‌دهد. بنابراین، روشن است که برای دستیابی به پاسخ واقعی و پیش‌بینی رفتار سازه، نیاز به در نظر گرفتن اثر تعامل خاک و سازه است.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

در تحقیقات آینده، می‌توان اثر طول و قطر شمع‌ها را بر روی جابه‌جایی و تنش‌ها، کرنش‌ها و شتاب‌های دال پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات تعامل مقایسه کرد. همچنین، تأثیر انواع مختلف خاک‌ها از نظر پارامترهای ژئوتکنیکی بر میزان پاسخ سازه، با در نظر گرفتن اثرات تعامل بین سازه و خاک، موضوع دیگری است که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرند.

مقایسه مقدار تنش در دو حالت فوق نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تعامل خاک و پی باعث افزایش حداکثر تنش کل مجموعه پل در مدل بررسی شده است. با این حال، مطالعات دقیق‌تر نشان داده‌اند که تعامل خاک و سازه تنش‌ها را در دال و ستون‌های پل کاهش داده و مقدار تنش‌ها را در پی و گروه شمع‌ها افزایش داده است. حداکثر میزان کرنش کلی در حالت در نظر گرفتن اثرات تعامل ۰,۰۰۰۲۵۸ به دست آمده است، در حالی که بدون در نظر گرفتن اثرات تعامل ۰,۰۵۱۷ بود. بنابراین، باید گفت که در نظر گرفتن اثرات تعامل باعث کاهش کرنش کلی در دال شده است. میزان کرنش پلاستیک در دال در حالت در نظر گرفتن تعامل خاک و پی ۰,۰۱۶۳ و در حالت بدون در نظر گرفتن تعامل خاک و پی 3.59×10^{-6} به دست آمده است. میزان کرنش پلاستیک در دال زمانی که اثرات تعامل خاک و سازه در نظر گرفته می‌شود بیشتر از حالتی است که تعامل خاک و پی در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه باعث افزایش شکل‌پذیری دال می‌شود. میزان کرنش پلاستیک در پایه‌های پل در حالت در نظر گرفتن تعامل خاک و پی ۰,۰۰۲۳۸۱ و در حالت بدون در نظر گرفتن تعامل خاک و پی ۰,۰۰۱۰۳۸ به دست آمده است. میزان کرنش پلاستیک در پایه‌ها زمانی که اثرات تعامل خاک و سازه در نظر گرفته می‌شود بیشتر از حالتی است که تعامل خاک و پی در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه باعث افزایش یکپارچگی پی‌ها می‌شود. حداکثر میزان جابه‌جایی در پل در حالت در نظر گرفتن تعامل خاک و پی ۳۴۵ میلی‌متر و در حالت بدون در نظر گرفتن تعامل خاک و پی ۰,۷۸۸ میلی‌متر به دست آمده است. بنابراین، در نظر

۶- مراجع

Transportation Officials, Washington, D.C.
-Askari Fork, Saeed, Ehsan Mohtashami and Amirsalar Mehrabad (2009). A Study of the Impact of Soil and Structure Interaction on Models of Large-Scale Air Wind Turbines, *11th National Congress of Civil Engineering, Shiraz, Shiraz University*.
-Carder, D. R. and Barker, K. J., (2005). Performance of a single row of spaced bored piles to stabilize a Gault Clay slope on the M25. TRL Report-627, *Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK*.

-Abaqus 6.10 analysis user's manual volume III.
-Abaqus/CAE webpage, getting start with ABAQUS/CAE.
-Asghari, Vahid and Rasoul Jani, (2009). Numerical Survey of Seismic Behavior of the Collection Group, Considering the Effects of Structure-Soil-Collection Interaction, *Quarterly Journal of Civil Engineering and Environment, Tabari University*.
-ASHTO (1996). Standard Specifications for Highway Bridges, 16th ed., American Association of State Highway and

- on *Applied Research in Civil Engineering (Structural Engineering and Construction Management)*, Tehran, Sharif University of Technology.
- Sarvari, Younes (2016). Mechanical Software Reference Training Reference. *Simulation and Finite Element*.
- Shayanfar, Mohsen Ali and Ali Shokrian, (2009). Evaluation of the effect of soil and structure interaction on the fragility curve of three-span concrete bridge, 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran - Khajeh Nasir al-Din Tusi Industrial University, Khajeh Nasir al-Din University of Technology Gray.
- Siahi, Mohsen and Javad Esfandiari, (2009). The Effect of Interaction Effects between Soil and Structure and Intermediate on Static and Dynamic Response of Structures, 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management, Tehran, Sharif University of Technology.
- Soltani, Haniyeh and Fereshteh Emami, (2009). Seismic Behavior of Concrete Reinforced Reinforced Concrete Bridges Based on Hard Clay Bed, Under Earthquake Seizures Considering Soil and Structure Interaction, 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Management Manufactured, Tehran, Sharif University of Technology.
- TC/FHWA (1983). Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges. Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Redwood City, California. Also Published by Federal Highway Administration as Report FHWA/RD-83/007.
- The Pacific Earthquake Engineering Research Center official.
- wahalathantri, b.l., thambiratnam, d.p., chan, t.h.t., & fawzia, s. (2011). a material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using abaqus. in proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing, queens land university of technology, *Brisbane*, qld, 260-264.
- Wolf, J. P. (1985). Dynamic Soil-Structure Interaction. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, *New Jersey*.
- Chen, W. F., Duan, L. (1999). Bridge Engineering Handbook, *CRC Press*, Florida.
- Daryl L. Logan (2011). A first course in the finite element method. *Cengage Learning*.
- Dassault Systèmes official.
website : <http://www.abaqus.net>.
- Eftekhari, Seyed Mosayeb and Adel Beit Safi, (1397). The Effect of Soil Cutting Parameters on Soil and Structure Interaction in Concrete Structures Fourth Edition of Standard 2800, *National Conference on Fundamental Research in Civil Engineering, Architecture and Urbanism*, Tehran, Ouj Higher Education Institute.
- Fitzgerald, B., & Basu, B. (2016). Structural control of wind turbines with soil structure interaction included. *Engineering Structures*, 111, 131-151.
- Fowler (1925). The Concise Oxford Dictionary. *Oxford University Press*. 102-103.
- Hsu, Y. T., Fu, C. C. (2004). Seismic Effect on Highway Bridges in Chi Chi Earthquake. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 18, No. 1, 1-7.
- International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, <http://www.iiees.ac.ir>
- Isbiliroglu, Y., Taborda, R., & Bielak, J. (2015). Coupled soil-structure interaction effects of building clusters during earthquakes. *Earthquake Spectra*, 31(1), 463-500.
- John P. Wolf, (1985). Dynamic Soil-Structure Interaction.
- Kausel, E. (2010). Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 822-832.
- Menétrey, Ph., and K. J. Willam, (1995). Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, 311-318.
- Nielson, B. (2003). Bridge Seismic Fragility-Functionality Relationships: A Requirement for Loss Estimation in Mid- America. School of Civil and Environmental Engineering, *Georgia Institute of Technology*, Atlanta, GA.
- Ohnaka, M. (2013). The Physics of Rock Failure and Earthquakes. *Cambridge University Press*. 148-149.
- Randolph, M. F., (1994). Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. State of the art report, 13th Int'l Conf. Soil Mech. Foundn. *Engng, New Delhi*, Vol.5, 61-88.
- Sadoughi Shabestari, Araz and Solmaz Sadoughi Shabestari (2016). Investigation of creep effects in bridge analysis with beam and concrete slab deck, *First National Conference*

The Effect of Dynamic Soil-Pile Interaction on Bridges with Slab-Girder Decks Using the Finite Element Method

Moein Zargar, Islamic Azad University Isfahan Branch, Isfahan, Iran.

E-mail: moeinzr@gmail.com

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Understanding the precise behavior of structures during earthquakes has always been a challenge for engineers. Increasing awareness in this field can lead to improved regulations and safer designs. One of the most critical steps in comprehending this behavior is understanding the response of soil and structures during seismic events. Due to its nonlinear behavior, soil alters the seismic response of structures, while the presence of a structure influences soil movement. The interaction between the structural response and the nonlinear behavior of the underlying soil forms a phenomenon known as soil-structure interaction (SSI). The effects of SSI and the significance of its impact on the seismic response of structures are generally not negligible. These effects may either amplify or reduce the seismic response of structures and other earthquake-induced parameters. Additionally, changes in force distribution within the lateral resistance system may occur, potentially affecting the safety, efficiency, or durability of structural elements. In this study, the dynamic interaction between soil and piles in slab-girder deck bridges is investigated using the finite element method. To this end, a bridge with a reinforced concrete slab deck and deep foundation is analyzed using the ABAQUS finite element software, considering and neglecting soil-structure interaction effects. The research examines the stresses, strains, displacements, and accelerations of the bridge deck. The results indicate that considering pile-soil interaction (PI) increases the maximum stress in the bridge system. However, a more detailed analysis reveals that SSI reduces stress in the bridge deck and foundation while increasing stress behind the piles and within the pile group.

Keywords: Soil-Structure Interaction (SSI), Seismic Response, Finite Element Analysis (FEA)