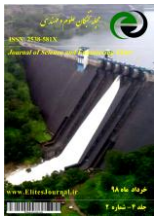
مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۴- شماره ۲- سال ۱۳۹۸
www.ElitesJournal.ir



اثراندرکنش آب وسازه برپاسخ لرزه ای پایه پل آبهای عمیق بامقطع مستطیل

زهرا حیرانی شبانی پور[۱]، ابوالفضل بلندی[۲*]

۱- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی پرند
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد آب وسازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاداسلامی پرند

* Modern22222@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۸ پذیرش: خرداد ماه ۹۸

چکیده

پل‌های‌دریایی‌سازه‌هایی‌هزینه‌بروممهم‌هستندکه این امربیانگراهمیت طراحی واجرای آنهاست. دراین تحقیق هدف اصلی بررسی میزان اثرگذاری تغییرات درشکل مقطع پل وارتفاع آب پیرامون پایه پل برپاسخ لرزه ای پایه پل تحت اثراندرکنش آب وسازه است. در این پژوهش ما برای مدلسازی ازنرم افزارآباکوس استفاده شده است وجریان سیال باتوصیف اویلری که معرف فضای سیال است شبیه سازی شده است. همچنین ازیک پایه پل منفرد بامقاطع ۳×۳و۳×۶و۳×۹ بااعماق آب ۰و۲۰و۳۰ متر استفاده کرده ایم. برای هرحالت به طورمجزا کانتورتنش وتغییرشکل محاسبه شده است .نتایج حاصله بیان می کنند که افزایش سطح آب تغییرمکان نوک پایه پل رابیشترکرده درنتیجه آب تاثیرمستقیم دراندرکنش خاک وسازه دارد وتغییرمکان را افزایش می دهد. نتایج بیانگراینست که هرچه ابعاد مقطع بیشتر شودتغییر شکل نوک پایه پل کمتر می شود پس ابعادمقطع تاثیرمستقیم دراندرکنش خاک وسازه داردوکاهش ابعاد مقطع تغییرشکل راافزایش می دهد.

کلمات کلیدی: اندرکنش آب وسازه، معادلات ناویه استوکس، پایه پل آب عمیق، پاسخ لرزه ای، مقطع مستطیل.

۱- مقدمه

بشر همواره به دنبال راهی برای حمل و نقل کالا از محلی به محل دیگر بوده است. حمل و نقل از طریق رودخانه توسط قایق های اولیه، اولین روشی بود که بشر به آن دست یافت. رودخانه و دریا در هر امتداد و مسیر دلخواه وجود نداشت و بشر ناگزیر به فکر ساخت و استفاده از راه های زمینی شد. اولین راه های ساخته شده شاید راه های ارتباطی بین چند روستا باشد. لزوم سرعت بیشتر در ارتباطات و همچنین سنگین تر شدن محمولات و استفاده از وسایل حمل و نقل پیشرفته تر بشر را به این فکر انداخت که برای عبور از دره ها و رودخانه معبری ایجاد نماید که امروزه به آن پل می گوییم. هرچه سرمایه گذاری اولیه در ساخت پل بیشتر باشد هزینه های استهلاک وسایل نقلیه و زمان، در آینده کمتر خواهد بود. علاوه بر مسائل اقتصادی-سیاسی-اجتماعی، پل ها نقش استراتژیک و تعیین کننده ای در مسائل نظامی دارند. از این لحاظ است که در تاریخ جنگ ها یکی از اهداف مهم تخریب پل ها و سازه های مربوط به آن بود. در این فصل به کلیات تحقیق پرداخته می شود.

۱-۱- بیان مساله

عبور آسان، بی خطر و اقتصادی وسایل نقلیه از عارضه های طبیعی نظیر رودخانه ها و دره های عمیق مستلزم ایجاد معبری است که به آن پل می گوییم. پل سازی فنی است که ریشه تاریخی در تمدن بشری دارد. امروزه با افزایش میزان حجم حمل و نقل بین المللی و بین شهری و احتیاج جوامع بشری به ایجاد شریان های ارتباطی مانند جاده های شوسه و راه آهن بیشتر شده است. با توجه به این موضوع که هر جاده ارتباطی در مسیر خود باید از رودخانه ها و دره های متعدد عبور کند، به اهمیت پل سازی در چرخش اقتصاد کشور پی می بریم. در این فصل به مبانی نظری و مروری بر ادبیات پیشینه تحقیق پرداخته می شود. پل ها سازه هایی جهت تسهیل درعبورومرور هستند و ساخت آنها برروی آب های عمیق درحال گسترش است. پل های احداث شده برروی دریاهای عمیق بسیارهزینه بر و طراحی آنها پیچیده است. این سازه ها علاوه بر تحمل بارهای وارده استاتیکی ودینامیکی، اثرات اندرکنش آب و سازه را درطراحی آنها بایددرنظرگرفت[۱].

با توجه به اینکه پل ها یکی از عناصر استراتژیک در راه های کشورها می باشند، آسیب دیدن و یا خرابی آنها می تواند یک محور را از سرویس دهی بیاندازد و یا عبور و مرور را در آن مختل نماید. بنابراین به مسئله تعمیر و نگهداری از پل ها باید توجه ویژه شود. در چند دهه گذشته به موازات توسعه شبکه راه های کشور، حجم قابل ملاحظه ای از بودجه جهت ساخت پل ها اختصاص یافته است. از طرف دیگر به علت شرایط محیطی نامناسب و ترافیک سنگین از یک طرف و عدم بازدیدهای ادواری و رعایت اصول نگهداری پلها از طرف دیگر هر ساله شاهد کاهش عمر مفید این سازه ها و نیاز به تعمیرات اساسی حتی در مورد پل های تازه احداث هستیم[۲].

پل‌ها ازاجزای اساسی بزرگ‌راه‌ها و شبکه راه‌آهن هر کشوری محسوب می‌شوند و ساخت آن‌ها نسبت به بقیه اجزای راه بسیار پرهزینه‌تر می‌باشد. شبکه راه‌های ایران بیش از ۵۰۶۰ کیلومتر خط راه آهن دارد که در طول این خطوط در حدود، ۱۰۰۰۰ پل با دهانه‌های متفاوت وجود دارند. از آن‌جا که امکان افزایش بار و عوامل پیش‌بینی نشده دیگری از جمله خوردگی در عضوها و ترک‌های ناشی از خستگی در طول عمر سازه در نظر گرفته نشده اند قادرند تأثیرات به‌سزایی در کاهش مقاومت سازه به مرور زمان ایجاد نمایند. در نتیجه لازم است این عوامل در طراحی و کنترل پل‌ها مورد بررسی قرار گیرند[۳].

پل سازه‌ای برای عبور از موانع فیزیکی قلمداد می‌شود تا ضمن استفاده از فضا (نه صرفا سطح زمین) بتواند عبور و مرور و دسترسی به اماکن را تسهیل کند. عوامل موثر در انتخاب نوع پل عبارتند از: محل پل، کاربرد پل، تعداد دهانه‌ها، نوع مصالح مصرفی، نوع فونداسیون و تکیه گاه‌ها، نوع عبورگاه، اقتصاد پل، زیبایی، امکانات اجرایی، نحوه ساخت و...[۴]

درتخریب یک پل خسارت‌های جانی و مالی فراوانی ایجاد می‌شود. هر خللی در عملکرد پل‌ها می‌تواند دسترسی به یک محل را تا مدت ها مختل کندو باعث اختلال در حمل و نقل شود. هنگام وقوع بحران، پل‌ها نقش مهمی در امدادرسانی یا تخلیه‌ی یک منطقه‌ی دچار بحران از افراد را ایفا می‌کنند. امرزه با بالارفتن درگیری‌ها و حملات تروریستی در سرتاسر جهان تحلیل و طراحی پل‌ها در برابر انفجار ضروری به نظر می رسد.

طراحی، محاسبه و احداث پایه و تکیه گاه پل ها، از مهم ترین و حساس ترین مراحل یک پروژه پل سازی می باشد، به خصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. در این زمان، طراح باید برای انتخاب طول و تعداد دهانه ها و عمق حداقل پی در محل پایه و تکیه گاه، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه و رودخانه را در نظر گرفته و مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. از مهمترین مواردی که در این رابطه میتوان به آن اشاره نمود، اطلاعات مربوط به فرسایش بستر رودخانه می باشد که در صورت در نظر نگرفتن آن باید شاهد عواقب خطرناکی، از جمله تهدید پایداری پل و در نهایت خرابی آن بود. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از پل ها درست زمانی که بیش ترین نیاز به آن ها وجود دارد، تخریب می گردند. یکی از مؤثرترین عوامل این تخریب ها، آبشستگی در محل پایه و تکیه گاه می باشد[۵]. آبشستگی پدیده ای است که بر اثر اندرکنش

شرایط جریان و حرکت مصالح بسترهای فرسایش پذیر صورت می گیرد. تعیین عمق آبشستگی از این جهت دارای اهمیت می باشد، که اولاً بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و ثانیاً در طراحی ابعاد فونداسیون سازه هایی که در مسیر جریان آب قرار دارند، نقش بسیار مهمی را ایفا می کند. با حضور پایه های پل در مسیر جریان، سرعت موضعی و آشفتگی جریان افزایش می یابد. بسته به شکل سازه، گردابه هایی ایجاد می گردند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال می نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب بستر و فرسایش -های موضعی در اطراف سازه افزایش یافته و منجر به پائین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می گردد[۶].

آبشستگی نتیجه فعالیت فرسایشی جریان آب است که رسوبات را از بستر و سواحل رودخانه ها و از اطراف پایه های پل ها کنده و به پایین دست منتقل می کند. در اثر برخورد آب به پایه پل روی پایه به تناسب سرعت جریان، فشار ایجاد میشود و به دلیل توزیع سرعت عمودی جریان که سرعت از بستر رودخانه به طرف سطح آب زیاد میشود، فشار دینامیکی بیشتری نیز در ترازهای بالاتر به پایه وارد شده که باعث به وجود آمدن گرادیان فشار روی پایه از بالا به پایین می شود. این گرادیان فشار باعث ایجاد جریان های رو به پایین می شود. این جریان های رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی برخورد کرده و گرداب نعل اسبی را به وجود میآورند. بررسی ها نشان می دهد گرداب های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده ای در ایجاد حفره آبشستگی اطراف پایه پل دارند[۶].

در تحلیل لرزه ای سازه های در تماس با آب، عوامل مختلفی بر پاسخ نهایی سازه تأثیرگذار هستند. با توجه به این امر مطالعات گوناگونی در زمینه تحلیل اندرکنش سازه- سیال در علوم مهندسی مختلف ارائه گردیده است. تعیین عمق فرسایش در محدوده پایه پل ها مستلزم آگاهی از نحوه جابه جایی مواد رسوبی بستر رودخانه ها است. پایه پل ها جریان عادی رودخانه را مختل میکند و تلاطم و اغتشاش حاصل از آن موجب فرسایش مواد رسوبی موجود در اطراف پایه می شود. چاله فرسایشی ایجاد شده در اطراف پایه به شکل و مشخصات هندسی آن بستگی دارد. به علاوه نوع مواد تشکیل دهنده بستر رودخانه و همچنین شرایط هیدرولیکی جریان نظیر وقوع حالت سیلابی و عبور تلماسه ها در میزان عمق چاله فرسایشی مؤثر است. از آنجایی که گسترش چاله فرسایشی پایداری سازه پل را به مخاطره میاندازد پیش بینی میزان گود افتادگی و اتخاذ تدابیر لازم برای مهار آن از جمله اقدامات مهندسی متداول در عرصه مهندسی رودخانه تلقی می شود[۷].

در هنگام رخ دادن یک زلزله قوی، عوامل گوناگونی بر پاسخ لرزه ای سازه های در مجاورت سیال تأثیرگذار هستند که از آن جمله می توان به تأثیر جنس مصالح سازه و ساختگاه آن، نوع، هندسه و ارتفاع سازه، مکانیزم انتشار و برخورد موج به سیستم،خصوصیات بارهای لرزه ای اعمالی نظیر شتاب حداکثر و محتوای فرکانسی بار، تأثیر شرایط تکیه گاهی و تأثیر اندرکنش سازه- فونداسیون و سازه- سیال اشاره کرد. یکی از عواملی که می تواند در هنگام اعمال بارهای زلزله تأثیر فراوانی بر پاسخ لرزه ای سازه داشته باشد، وجود آب و اثر اندرکنش آن با بدنه سازه و با فونداسیون می باشد. زیرا وجود سیال در هنگام زلزله، باعث اعمال یک نیروی هیدرودینامیکی اضافی بر بدنه سازه می گردد. مقدار این نیرو در زلزله های قوی می تواند قابل ملاحظه باشد و با افزایش پاسخ های لرزه ای، می تواند پایداری آن را با مشکل مواجه سازد[۸].

فلسفه ی عمومی روش های طراحی متداول سازه ها و مخصوصا پل در برابر زلزله، بر دو اصل ایجاد سختی و مقاومت در سازه جهت کنترل تغییرمکان جانبی و جلوگیری از تخریب اعضای سازه ای و غیرسازه ای تحت اثر زلزله های کوچک و متوسط استوار می باشد و ایجاد شکل پذیری و قدرت جذب انرژی مناسب در سازه، برای ممانعت ازفروریختگی سازه در زلزله های شدید بنا شده است. در این روش های طراحی، سازه در مقابل زلزله های متوسط و شدید، رفتاری غیرارتجاعی دارد و از این رو شکل پذیری و جذب انرژی ناشی از زلزله به صورت تغییرشکل خمیری و ایجاد مفاصل پالستیک، از خصوصیات اساسی طراحی در این روش ها میباشد. این مفاصل محل تجمع خسارت بوده و اغلب قابل تعمیر نیستند، حال آن که روش های نوین طراحی لرزه ای سازه ها، اغلب

توصیه به حفظ رفتار ارتجاعی سیستم دارند و در عمل با تغییر در مشخصه های دینامیکی سیستم در ارتباط با سختی و میرایی آن، در جهت کاهش نیرو و انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله می پردازند. در روند جدید طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله، برای مقابله با انرژی ورودی به سازه، دو دیدگاه وجود دارد، دیدگاه اول شامل طرح هایی است که سبب کاهش نیروی وارد به سازه از طریق افزایش پریود سازه می شوند که سیستم های جداسازی پایه در این طبقه بندی قرار می گیرند. در این سیستم ها با افزایش پریود سازه و ایجاد یک تغییر در پریود سازه، نیروهای وارده به سازه در اثر زلزله کاهش مییابند. دومین دیدگاه توصیه بر استفاده از مکانیزم های اتلاف انرژی در سازه در جهت افزایش میرایی سازه دارد. در این حالت با قراردادن ادوات جذب انرژی در محل های مناسب سازه، بخشی از انرژی ورودی زلزله به وسیله آنها مستهلک می شود، در نتیجه خسارت وارده به سازه که ناشی از اتلاف انرژی به صورت هیسترزیک میباشد، کاهش می یابد[۷].

از مسائل بسیار مهم در تعیین پاسخ دینامیکی پل ها، اعمال مساله اندرکنش آب و سازه می باشد وجود سیال در اطراف المان ها علاوه بر اینکه از یک طرف به دلیل ایجاد امواج می تواند عامل مهمی برای ایجاد نیروها باشد از طرف دیگر با افزایش جرم سیستم و اعمال نیروهای استهلاکی بر پاسخ و ارتعاشات سازه تاثیر می گذارد.

مسئله اندر کنش سازه و سیال از گسترده ترین بحث های مربوط به رفتار سیال است که از نکته نظر مهندسی جالب بوده و کارهای تحقیقاتی متعددی در خصوص آن انجام شده است. مسائل مربوط به اندر کنش سازه و سیال زمانی به وجود می آید که بین دو سیستم حرکت نسبی وجود داشته باشد. اندرکنش جامد و سیال از موضوع‌های مهم در مهندسی مکانیک و عمران است. این موضوع در طراحی سازه‌های مربوط به نیروگاه‌های هسته‌ای، سازه‌های دریایی، سازه‌های دارای مایعات مانند مخازن آب و سیستم‌های سد-مخزن و انواع دیگر سیستم ها که سازه در اندرکنش با سیال است، اهمیت دارد. حل مسائل اندرکنش در سیستم‌های سد-پی- مخزن، پل های آبی با احتساب اندرکنش سد با مخزن و پی و نیز به‌طور هم‌زمان، مخزن با پی سد، پل های آبی به دلیل تفاوت رفتاری آب مخزن (سیال) و مصالح تشکیل‌دهنده جسم سد و پی (سازه)، نسبت به سازه‌های متعارف، پیچیدگی بیشتری دارد. وجود این پیچیدگی، حل دقیق سیستم سد-پی-مخزن را فقط در حالاتی که هندسه سیستم نسبتاً ساده بررسی‌شده و با کمک فرضیات ساده شونده و نیز حذف اثر اندرکنش پی، با حل امکان‌پذیر کرده است[۹].

تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص شناخت مکانیزم آبشستگی اطراف سازه های هیدرولیکی و به خصوص پل ها انجام شده است. در زمینه آبشستگی اطراف پل ها تمرکز پژوهش ها بیشتر بر روی پایه بوده و پژوهش های انجام شده در خصوص تکیه گاه بسیار اندک بوده است. بررسی منابع نشان می دهد که شکل تکیه گاه بر میزان آبشستگی پیرامون آن تأثیر بسزایی دارد و در بین اشکال مختلف تکیه گاه، تکیه گاه مستطیلی بیش ترین میزان آبشستگی را دارد.دراین طرح اثرات اندرکنش آب وسازه را بررفتارلرزه ای پایه پل آب های عمیق بامقطع مستطیلی بررسی نموده ونتایج را بامقطع دایروی مقایسه کرده ایم .نتایج بدست آمده دراطراف یک پایه پل منفردو بااستفاده از معادلات ناویر استوکس وروش المان محدود حاصل می شود. هدف ازاین تحقیق نیز طراحی ایمن پل ها بادرنظر گرفتن اثرات اندرکنش آب وسازه است.

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

همه ساله پل های زیادی در سراسر جهان تخریب می شوند، تخریب این پل ها در مواردی ناشی از در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل ها می باشد. از این رو بررسی هر چه بیشتر این عوامل به روش صحیح و اصولی جهت نیل به نتایج دقیق و قابل قبول، ضروری به نظر می رسد. خصوصا اجرای تحقیق به صورت کمی و با استفاده از نرم افزار های تخصصی و مدل رایانه ای می تواند به شناخت مهندسین عمران از این پدیده بیافزاید و خلأ موجود در این زمینه را پر کند. بدیهی است تحقق این مهم باعث خواهد شد هزینه طراحی، اجرا و نگهداری سازه های آبی رودخانه ای در موارد مشابه کاهش پیدا کند. ضمن اینکه بستر مناسبی برای تحقیقات مشابه و موردی دیگر فراهم شود.

۱-۳- اهداف تحقیق

- مبحث اندرکنش باتوجه به گستردگی آن از مباحث مهم در علوم مهندسی آب است و پژوهش در این زمینه به افزایش اطلاعات وگسترش دانش بشری برای آیندگان بسیار مهم می باشد. ازجمله کاربردهای اندرکنش آب وسازه در پایه پل آب های عمیق است که تحقیق دراین زمینه لازم به نظر می رسد.
- باتوجه به اینکه احداث پل ها برروی دریاهای عمیق درحال گسترش است ودر کشورمان نیز این مساله به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، کسب دانش های لازم در این زمینه ضروری است.
- برنامه ریزی دولت جهت احداث پل برروی آب های عمیق درجزایر شمالی وجنوبی کشور ازجمله پل خلیج فارس بین بندرعباس وجزیره قشم وسایر پروژه ها که درمراحل تحقیقاتی است، توجه به این موضوع را ضروری می سازد.

۱-۴- سوالات تحقیق

آیا تغییر درمقطع پایه پل آب های عمیق بررفتار و پاسخ لرزه ای آنها تاثیر گذاراست ونقش اندرکنش آب وسازه دراین تاثیرگذاری چقدر و چگونه است؟

۱-۵- فرضیه های تحقیق

فرض براین است که آب تراکم ناپذیر، سازه پل مقاوم دربرابر بارهای وارده واستاتیکی، مصالح مورد استفاده مقاوم دربرابر خوردگی وازجنس مرغوب، معادلات حاکم برجریان ناویر استوکس است. هم چنین اثرات کلیه بارهای وارده برسازه درمرحله طراحی درنظر گرفته شده است.

۱-۶- اهداف وجنبه نوآوری و جدید بودن تحقیق

طرح موجود، اثر اندرکنش آب وسازه بر پاسخ لرزه ای پایه پل آب های عمیق با مقطع مستطیلی را محاسبه می کند که نتایج حاصل را با نتایج موجود درمورد پایه پل آب های عمیق بامقطع دایروی مقایسه می کنیم. جنبه نوآوری درطرح نیز ایجاد تغییر در مقطع پایه پل وبررسی تاثیر آن برپاسخ لرزه ای پایه پل آب های عمیق است که تاکنون طرحی درموردآن ارائه نشده است.

۲- موادوروش اجرای تحقیق

پل‌ها بخش مهمی از جامعه ما بوده و هستند. این سازه‌ها همواره موضوع و کانون توجه فرهنگی و هنری در دوران باستان و عصر کنونی بوده‌اند. در طی تاریخ، پل‌ها مرکز مناقشات بسیاری بوده و جنگ‌های فراوانی به خاطر آن‌ها رخ داده است و در بسیاری از موارد، فتح این سازه استراتژیک تاثیر برجسته‌ای بر نتیجه نهایی جنگ داشته است. پل‌ها مرکز دهکده یا شهر نیز بوده‌اند. بنابراین توجه به مسایل پایداری این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. بررسی پایداری این قبیل سازه‌ها تحت بارهای استاتیکی از دیرباز مورد توجه قرار گرفته است، اما ممکن است سازه علاوه بر بارهای استاتیکی تحت بارگذاری دینامیکی نیز قرارگیرد. بارهای دینامیکی که بر سازه‌ها اثر می‌کنند ممکن است بر اثر عوامل مختلفی از قبیل زلزله و... انجام شده باشند. در این فصل به روش تحقیق و روابط و معادلات حاکم پرداخته می شود.

۲-۱- نوع و ماهیت تحقیق

از نظر طبقه بندی تحقیق بر مبنای هدف، این پژوهش از نوع تحقیقات کاربردی است، زیرا در این پژوهش تمامی نظریه ها، قانون مندی ها و اصول و فنونی که تاثیر اندرکنش آب وسازه بر پاسخ لرزه ای پایه پل آب های عمیق با مقطع مستطیلی را دارند برای حل مسائل اجرایی به کار می روند و این تحقیق از نظرروش تحلیلی است.

۲-۲- تحلیل برهم کنش ساختار سیال

لاگرانژ اویلر خودسرانه(ALE[1])، ارائه یک رویکرد موثر برای حل مشکلات است. زنجیره ای از تعامل مایع را شامل می _شود. معادله بر اساس لاگرانژ اویلر خودسرانه به صورت رابطه(۱) بیان می شود[۲].

$$f = \frac{\delta f}{\delta t}|x + \frac{\delta f}{\delta x}c_i = \frac{df}{dt} + c_i \nabla f \quad (۱)$$

از آنجایی که f یک مقدار فیزیکی است، x مختصات مرجع است و ci سرعت اتصال است که توسط رابطه(۲) داده شده است.

$$c_i = u_i - w_i \quad (۲)$$

در آن ui سرعت جرم مایع و wi سرعت مش در مختصات مرجع است. معادله حرکت طبق رابطه(۳) به دست می آید.

$$\frac{du_i}{dt} + c_j \frac{\delta u_i}{\delta x_i} = \frac{\delta_{\delta_{ij}}}{\delta x_j} + f_i \quad (۳)$$

سپس معادله اساسی طبق رابطه(۴) به دست می آید.

$$\delta_{ij} = -\frac{p}{p}\delta_{ij} + v\left(\frac{\delta u_i}{\delta x_i} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i}\right) \quad (۴)$$

شرایط مرزی سطح مایع برای میدان جریان به صورت رابطه(۵) به دست می آید[۱۰].

$$n.\frac{\delta d_{fs}^f}{\delta t} = n.u \quad (۵)$$

طبق روابط بالا، δ تنش مایع است، f_i نیروی جسم، u سرعت، p فشار و p چگالی و v ویسکوزیته جنبش است. d_{fs}^f جابجایی سطح مایع آزاد است و n بردار طبیعی سطح مایع آزاد است. معادله حرکت ساختار با روش لاگرانژ-اویلر خودسرانه به شرح رابطه (۳-۷) توصیف می شود[۱۱]:

$$p^s \frac{\delta^2 d^s}{\delta t^2} = \nabla \delta^s + p^s f^s \quad (۶)$$

طبق رابطه(۶) p^s چگالی، d^s جابجایی ساختار، δ^s فشار ساختار، f^s نیروی ساختار ماده است.

۲-۳- معادلات اندرکنش آب وسازه بر پاسخ لرزه ای

هدف از وارد ساختن اثر اندرکنش آب و سازه، تحلیل دینامیکی هر چه دقیق‌تر پاسخ لرزه ای و پیش‌بینی هر چه واقعی‌تر پاسخ آن به تحریک‌های تکیه‌گاهی است. بر اساس تئوری اجزای محدود، معادله ماتریسی حاکم بر پاسخ دینامیکی سازه به تحریک تکیه‌گاهی در حوزه زمان را می‌توان به‌صورت رابطه(۳-۹) نشان داد:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr = -MJa_g + F_f \quad (۷)$$

در این رابطه K،C،M، به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، r بردار تغییرمکان های گره نسبی (نسبت به تکیه‌گاه) و J ماتریس شبه یکه می‌باشد که وظیفه انتقال بردار شتاب تکیه‌گاهی a_g به درجات آزادی سازه را بر عهده دارد. همچنین F_fنشان‌دهنده نیروهای وارد از طرف سیال برسازه می‌باشد. به‌طور مشابه، درصورتی‌که سیالی مانند آب درون مخزن پشت سد تحت تحریک تکیه‌گاهی قرار گیرد، رابطه(۸) بر رفتار آن حاکم است[۷].

$$G\ddot{p} + L\dot{p} + Hp = -B\ddot{U} \quad (۸)$$

[1]Arbitrary Lagrange-Euler

در اینجا H و L، G را می‌توان به ترتیب ماتریس‌های شبه جرم، شبه میرایی و شبه سختی سیال نامید که در تعیین فشارهای هیدرودینامیک p نقش بسزایی دارند. افزون بر این‌ها، ماتریس نگاشت B سبب تبدیل بردار شتاب‌های مطلق گرهی به شار فشار می‌شود. هنگامی‌که سازه و سیال در مجاورت هم قرارگرفته و تحت تأثیر یک شتاب پایه واحد باشند، مسئله اندرکنش آب و سازه اهمیت یافته و سبب تغییر پاسخ هر یک از دو بخش مزبور می‌گردد. در این حالت، افزون بر نقش تبدیل شتاب‌های B ماتریس نگاشت تکیه‌گاهی به شار فشار، وظایف مهم دیگری نیز به عهده دارد که همانا تبدیل شتاب‌های سازه به شار فشار و همچنین، تبدیل فشارهای هیدرودینامیک به نیروهای وارد به سازه است. درواقع ماتریس مزبور، عامل ایجاد اندرکنش در سازه و سیال می‌باشد. در این حالت، دو معادله حاکم برسازه و سیال در کنار هم قرار گرفته و رابطه بنیادین حاکم بر مجموعه را بنا می‌نهند.

۲-۴- بررسی روش‌های تحلیل لرزه‌ای

روش‌های مختلفی برای تحلیل لرزه‌ای وجود دارد. تفاوت این روش‌ها در فرض رفتار خطی برای المان‌های سازه‌ای و نحوه‌ی اعمال نیروی زلزله می‌باشد. در مدل‌های خطی فرض بر آن است که المان‌های سازه‌ای در طول تحلیل دارای مقاومت نامحدود و سختی ثابت می‌باشند، درصورتی‌که در مدل‌های غیرخطی کاهش مقاومت و سختی سازه در طول تحلیل لحاظ می‌شود. همچنین در تحلیل‌های استاتیکی نیروی زلزله توسط یک الگوی بارگذاری استاتیکی به سازه اعمال می‌شود، درصورتی‌که در تحلیل‌های دینامیکی بارگذاری زلزله به‌صورت دینامیکی و بر اساس رکوردهای معین صورت می‌گیرد. بر این اساس روش‌های تحلیل عبارت‌اند از:

۱- خطی استاتیکی و دینامیکی

۲- غیرخطی استاتیکی و دینامیکی

در تحلیل‌های خطی (رفتار مصالح خطی) فقط سختی و مقاومت اعضای اصلی مدل می‌شود، در تحلیل‌های غیرخطی سختی و مقاومت هر دو گروه اعضای اصلی و غیر اصلی و همچنین تغییرات مقاومت و سختی این اعضا در اثر کاهندگی باید در مدل سازه‌ای وارد گردد. نیروی جانبی زلزله مؤثر بر سازه هایی مانند پل را می‌توان با استفاده از روش تحلیل استاتیکی معادل و یا روش‌های تحلیل دینامیکی محاسبه کرد. موارد کاربرد هر یک از آن‌ها دربندهای زیر و جزئیات هر یک در ادامه آمده است[۴].

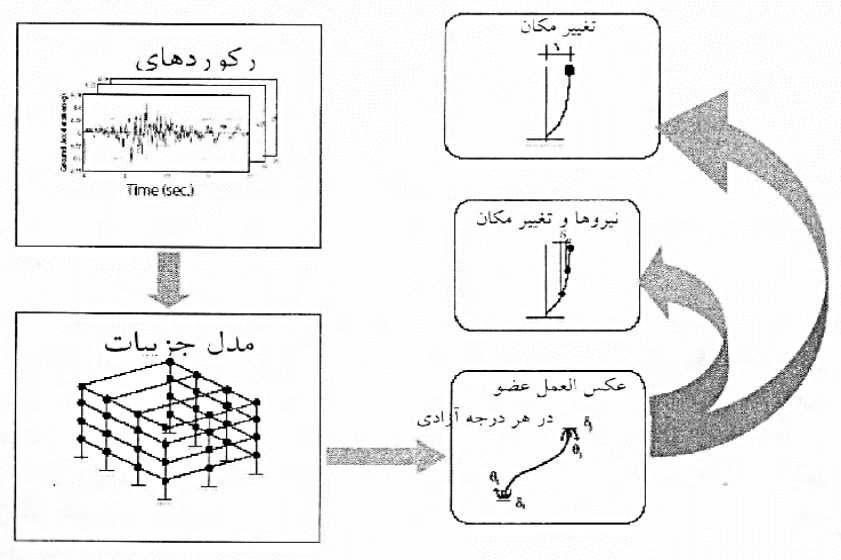
۲-۴-۱- دینامیکی غیرخطی (NDP[2])

دقیق‌ترین روش تحلیل غیرخطی در حال حاضر روش دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی است که به علت ارتباط مستقیم آن با انتخاب رکورد زمین‌لرزه چندان موردتوجه قرار نگرفته است. استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر ارتجاعی به علت اینکه پاسخ دینامیکی حساسیت بسیار زیادی به مدل‌سازی و مشخصات حرکت زمین دارد محدود و مشروط می‌باشد. شکل(۳- ۱) نمایش شماتیک روند تحلیل دینامیکی غیرخطی را نشان می دهد[۱۲].

اساس رویکردهای مدل‌سازی، فرضیات تحلیل و معیارهای پذیرش تحلیل دینامیکی غیرخطی با روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی یکسان می‌باشد و تفاوت اصلی این است که نتایج پاسخ با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی به دست می‌آیند. به این صورت که نیروهای طراحی با استفاده از جابجایی هدف به دست نمی‌آیند و در عوض مستقیماً با تحلیل دینامیکی با استفاده از تاریخچه‌ی حرکت زمین تعیین می‌شوند. پاسخ های محاسبه شده به وسیله‌ی تحلیل دینامیکی غیرخطی بسیار زیاد به ویژگی‌های اختصاصی حرکات زمین حساس هستند؛ بنابراین توصیه می‌شود که تحلیل با بیش از یک رکورد حرکت زمین انجام شود. اساس کار در این روش استفاده از یک رکورد تاریخچه زمانی شتاب است که به‌عنوان یک بردار α_1 که دارای المان‌های $\alpha_1(t_i)$ و $\{0,$

[2] Nonlinear Dynamic Procedure

$t \in \{t_1, \ldots, t_{n-1}$ است در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور به دست آوردن شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های با شدت کمتر یا بیشتر، این بردار را به ضریب مقیاس$(0,+\infty) \ni \lambda$; $\alpha y = \lambda \alpha_1$ ضرب می کنیم. این عمل می‌تواند به‌صورت مقیاس کردن طیف شتاب الاستیکی توسط ضریب λ و یا مقیاس دامنه‌های شکل فوریه شتاب‌نگاشت در طول همه فرکانس‌ها انجام گیرد.



شکل۱- نمایش شماتیک روند تحلیل دینامیکی غیرخطی[۳۶]

❖ **پارامترهای مؤثردر نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی:**

➢ منحنی رفتار – عضو

درروش تحلیل دینامیکی غیرخطی باید رفتار کامل هیسترزیس هر جزء تعیین گردد. رفتار هیسترزیس اعضا به نوع و مشخصات اجزاء، تلاش در آن‌ها و حتی زمین‌لرزه وابسته است.

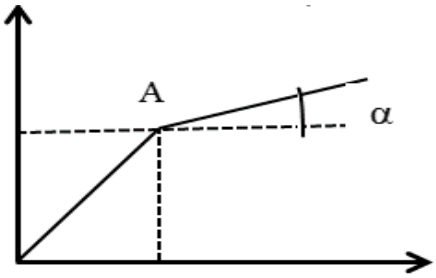
➢ شتاب‌نگاشت

در تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش تاریخچه زمانی، پاسخ غیرخطی سازه با توجه به نوع شتاب‌نگاشت تغییر پیدا می‌کند. برای این منظور بهتر است تا حد امکان از تعداد بیشتری شتاب‌نگاشت استفاده گردد[۱۳].

۲-۴-۲- روش استاتیکی غیرخطی (NSP)[۳]

تحلیل استاتیکی غیرخطی و معرفی پارامترهای مفاصل می‌تواند به دو روش کامل و ساده شده انجام شود:
۱-درروش ساده فقط اعضای اصلی مدل شده و از اثرات کاهندگی صرف‌نظر می‌شود (با دادن مختصات نقطه A و زاویه α به‌صورت نمودار دوخطی). شکل۲ این نمودار را نشان داده است.

[3] Nonlinear Static Procedure



شکل۲- روش ساده تحلیل استاتیکی اعضای اصلی

درروش کامل اعضای اصلی و غیر اصلی در مدل وارد شده و رفتار غیرخطی آن‌ها تا حد امکان نزدیک به واقعیت وارد می‌شود. همچنین اثر کاهندگی باید به نحوی وارد محاسبات گردد شکل ۳ این نمودارها را نشان می دهد (نقاط C تا E)[۲]
به‌طورکلی در این روش، بار جانبی ناشی از زلزله، استاتیکی و به‌تدریج و به‌صورت فزاینده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در یک نقطه خاص تحت اثر بار جانبی به مقدار مشخص (تغییر مکان هدف) برسد و یا سازه فروریزد.

۲-۵- روش تحلیل مسائل مهندسی

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است:

۱. روش تحلیل دقیق (Exact Solution)
۲. روش عددی (Numerical Solution)
۳. روش تجربی (Experimental Method)

در حل دقیق همان طور که از نام آن پیداست به محاسبه دقیق پارامترهای معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان های فیزیکی همچون میدان تنش، میدان حرارتی یا میدان الکتریکی و. . . پرداخته می شود. در حالی که در روش دوم به حل تقریبی و عددی این مسائل پرداخته خواهد شد. روش تجربی یا آزمایشگاهی نیز با توجه به اینکه مبتنی و بر گرفته از خود واقعیات است، روشی مناسب اما پرهزینه و زمان بر است. در این میان روش های عددی که روش اجزای محدود نیز زیر مجموعه آنها می باشد از کاربردی ترین روشهای مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. از جمله مزیت های حل عددی خصوصا اجزاء محدود، نسبت به سایر روش ها به شرح زیر است:

۱. ضعف عمده روشهای آزمایشگاهی، پرهزینه و زمان بر بودن آن است. در حالی که در روش حل عددی این چنین نیست.
روش حل دقیق از تحلیل مدل های با هندسه پیچیده عاجز است و تنها روشهای عددی به خصوص اجزاء محدود در این زمینه
۲. درحل مسائلی که شرایط مرزی کمی پیچیده می شود نیزحل دقیق ناتوان است وتنهاروش های مرسوم عددی درحل این گونه مسائل به کارمی رود.

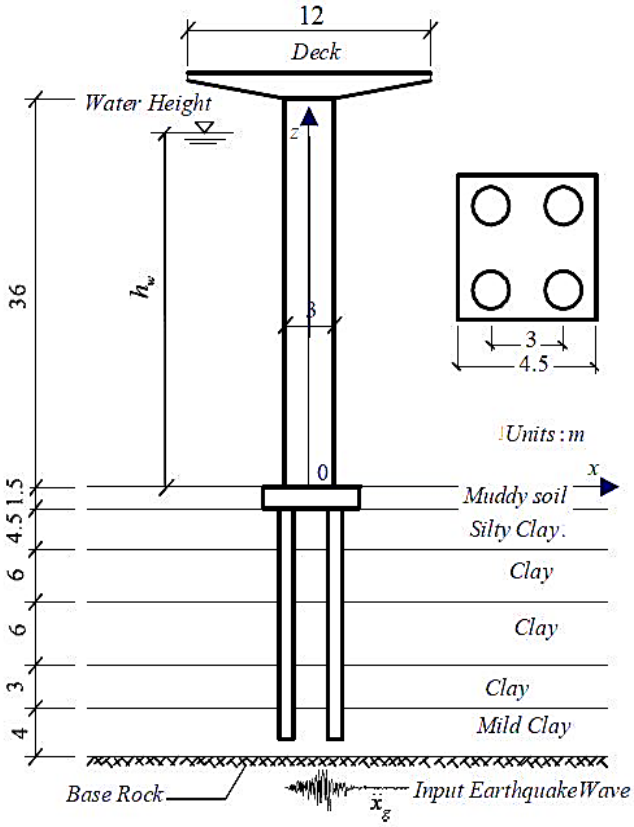
۲-۶- معرفی نرم افزار ABAQUS

ABAQUS یک نرم افزار شبیه سازی بسیار قدرتمند جهت تحلیل مسائل مهندسی می باشد. اساس کار این نرم افزارروش اجزا محدود بوده و محدوده وسیعی از مسائل مهندسی را میتوان با استفاده از آن تحلیل کرد. در ABAQUS مجموعه کاملی از المان های مختلف وجود دارد. این المان ها شبیه سازی بیشتر مواد و سازه های مهندسی را در این نرم افزار ممکن می سازند. از جمله ویژگی های دیگر این نرم افزار که آن را در جایگاه برتری نسبت به دیگر نرم افزاری های اجزای محدود قرار میدهد. قابلیت این نرم افزار در شبیه سازی مدل های متنوع مواد می باشد. این نرم افزار شامل سه بخش اصلی است. ABAQUS/Standard برای حل تمام مسائل خطی و غیر خطی شامل مسائل استاتیکی و دینامیکی، ABAQUS/Explicit برای مدلسازی مسائل دینامیکی

گذرا مانند ضربه، برخورد و همچنین مسائل شبه استاتیکی و ABAQUS/CAE که یک رابط گرافیکی در نرم‌افزار بوده و با استفاده از آن می توان مراحل مدلسازی و تعیین شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی را به سادگی انجام داد. ABAQUS را میتوان یک ابزار شبیه سازی همه منظوره در نظر گرفت. در این نرم افزار علاوه بر شبیه سازی مسائل (مسائل بر اساس تنش و جابجایی)، بسیاری از شبیه سازیهای دیگر از جمله مسائل انتقال حرارت ، انتقال جرم، آنالیزهای کوپله حرارتی- الکتریکی، آکوستیک، مکانیک خاک، آنالیز پیزو الکتریک، آنالیز الکترو مغناطیسی و دینامیک سیال ممکن می باشد. به طور کلی می توان گفت که بیشتر مسائل در مهندسی مکانیک، مهندسی عمران، مهندسی هوافضا و مهندسی مواد را میتوان در ABAQUS شبیه سازی و تحلیل نمود[۲].

۲-۷- روش کار

در این پژوهش پایه پلی در محیط آب و خاک به همراه شمع به صورت حالتهای مختلف تحت شتاب نگاشت کوبه در نرم افزار Abaqus مدل شده و تحت آنالیز دینامیکی قرار گرفته است و سرانجام پس از طی مراحل تحلیل به بحث و نتیجه گیری در پیرامون مدل پرداخته می‌شود. **صحت سنجی:** موضوع صحت سنجی درباره بررسی رفتار پایه پل که توسط شمع در شش لایه خاک قرار گرفته و که پاسخ های لرزهای گوناگونی به آن اعمال شده.هندسه وابعاداین سازه،ارتفاع آب وضخامت لایه های خاک درمقاله Seismic Response of Bridge Pier in Deep Water مطابق شکل۳می باشد.



شکل۳- مشخصات هندسه سازه، ارتفاع آب وضخامت لایه های خاک

مشخصات متریال و جنس خاک ها مورد استفاده به ترتیب طبق جداول ۱و۲در نظر گرفته شده است:

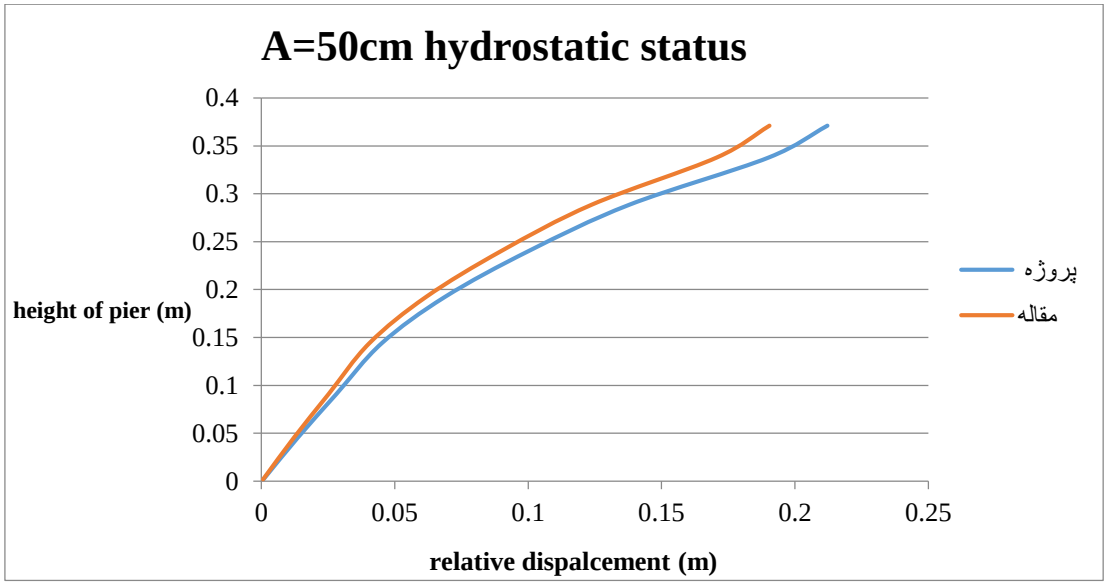
جدول۱- مشخصات بتن

پارامتر	بتن C30	بتن C50
چگالی (kg/m^3)	۲۵۰۰	۲۵۵۰
مدول الاستیسیته (Mpa)	۳۰۰۰۰	۳۴۵۰۰
ضریب پواسون	۰/۲۳	۰/۲۵

جدول۲- مشخصات لایه های خاک دراطراف شمع های پایه پل

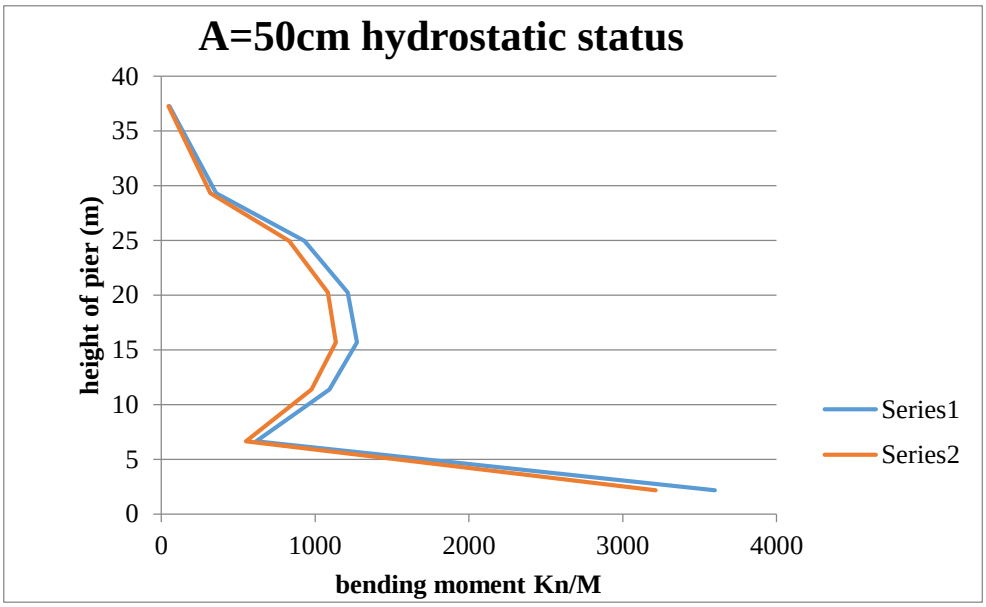
خاک	چگالی (kg/m^3)	سرعت برشی (m/s)	قدرت چسبندگی kpa	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک
گل آلود	۱۸۰۰	۱۷۰	۱۰	۰/۴۹	۱۲
رس خاکستری	۱۸۹۰	۱۹۰	۱۶/۷	۰/۴۹	۱۶
رس	۱۹۰۰	۲۱۰	۲۱/۵	۰/۴۹	۲۲
رس	۱۹۶۰	۲۶۰	۲۵/۳	۰/۴۹	۲۴
رس	۱۹۷۰	۳۲۰	۲۷/۱	۰/۴۹	۲۱
رس ملایم	۲۰۳۰	۳۸۰	۳۵/۵	۰/۴۹	۲۱

برای مدل سازی این سازه از برنامه شبیه ساز اباکوس استفاده شده است که این مدل را به صورت سه بعدی مدل سازی کردیم. نتایج مورد بررسی برای این تحقیق نمودار های جا به جایی شمع در ارتفاع و خمش ایجاد شده در ارتفاع برای شمع می باشد. جا به جایی ایجاد شده بر اثر فشار هیدرو استاتیکی استخراج شده از مقاله بیس و پروژه در شکل۴ قابل مشاهده است که تطابق مناسبی دارند و جا به جایی ایجاد شده در پروژه دارای افزایش ۱۱.۴ ٪ است.



شکل۴- جا به جایی شمع درارتفاع

خمش ایجاد شده بر اثر فشار هیدرو استاتیکی استخراج شده از مقاله بیس و پروژه در شکل ۵ قابل مشاهده است که تطابق مناسبی دارند و خمش ایجاد شده در پروژه دارای افزایش ۱۲٪ است.



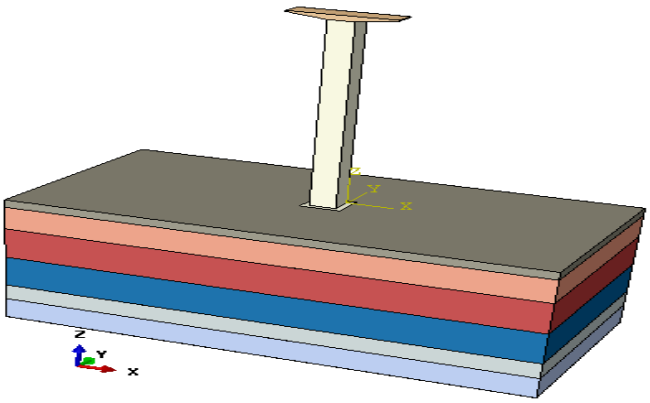
شکل ۵- خمش ایجاد شده در ارتفاع

۳- نتایج و بحث

ستون بتنی با مقطع مربع-مستطیل در مسیر جریان رودخانه در سطح تراز ۰ ، ۲۰ و ۳۰ مترنسبت به بستر رودخانه با نسبت‌های ابعاد ۳×۳ و۳× ۶و۳×۹ر شرایط لرزه‌ای با مشخصات تاریخچه زمانی زلزله Kobe مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. طول مقطع مستطیل در امتداد عمود بر جریان فرض شده‌است. ستون و سرستون توسط پی عمیق از نوع شمع و سرشمع در بستر دریا مهار شده‌است. لایه‌های خاک از جنس درشت‌دانه، رس و سیلت توسط المان‌های ۳ بعدی در مقطع عبور جریان در نظر گرفته شده‌است. در این مرحله از مطالعات از مدلسازی میلگردها در پایه پل صرفنظر شده است. جریان سیال (آب) با توصیف اویلری که معرف فضای حرکت سیال است مدلسازی شده‌است. سایر عناصر حاضر در فضای تحلیل از مش همبسته با مصالح برخوردار هستند. تحلیل‌های مورد نظر در این فصل در جدول معرفی شده‌اند.

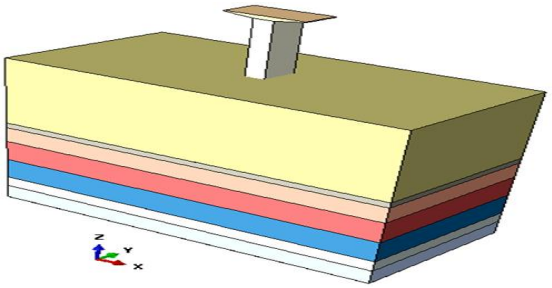
۳-۱- مدل اجزای محدود[۴]

مدل اجزای محدود پایه پل و فونداسیون عمیق، خاک و سیال محیط بر سازه درشکل های زیر نشان داده شده‌است.

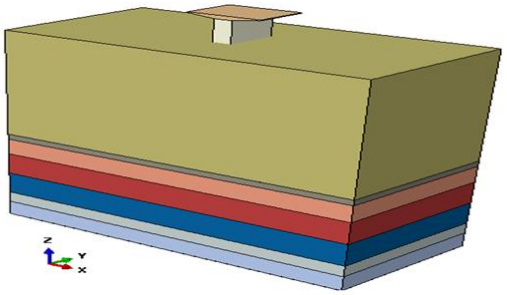


شکل۶- مدل شماتیک خاک، جریان و سازه در شرایط D = 0/0 m

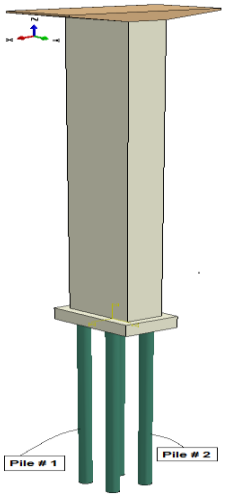
[4] Limie elements method



شکل۷- مدل شماتیک خاک جریان سازه درشرایطD=20m



شکل۸- مدل شماتیک خاک جریان سازه درشرایطD=30m



شکل۹- مدل هندسی سازه(پایه پل منفرد وشمع هایش)

شرایط تنش ژئواستاتیک خاک پیش از شروع تحلیل لرزه‌ای به مدل اختصاص داده شده‌است. سرعت آب در تمام مراحل تحلیل در مقطع ورود و خروج جریان معادل با ۵ m/s در نظر گرفته شده‌است. تاریخچه زمانی زلزله در مرحله دوم تحلیل بر بستر لایه ششم خاک وارد شده‌است. تغییرمکان‌های امتداد متعامد (Y) در مقاطع چپ و راست مقید شده‌است. تماس بین لایه‌های خاک، برهمکنش بین آب و خاک در مراحل مختلف تحلیل و برهمکنش بین آب و سازه توسط قید تماس نرمال و مماسی بدون اصطکاک در نظر گرفته شده‌است.

۳-۲- تحلیل اجزای محدود

همانطور که در مقدمه اشاره شده‌است، تحلیل اثرات لرزه‌ای روی پایه پل در شرایطی که آب در امتداد محور X با عمق m ۰/۰، ۲۰m و ۳۰m با سرعت ثابت m/sec ۵ (در صفحه ۱۸۰۶ مقاله بیس) در جریان است انجام خواهد شد.

۴- نتیجه گیری

روش کار به این صورت بود که سه پایه پل با مقاطع مختلف به عرض ۳، ۶ و ۹ متر را در سه ارتفاع مختلف اب ۰، ۲۰ و ۳۰ متر مدل سازی شده و پایه پل وخاک اطراف آن را تحت شتاب زلزله کوبه قرار گرفته است ونتایج حاصل ارتفاع کوناگون آب ومقاطع پایه پل را بررسی کردیم نتایج در فصل قبل ارائه شده و در این فصل به بررسی مقایسه مدل ها پرداخته می شود. نتایج حاصله نشان می دهد که آب بر روی رفتار سازه تاثیر گذاشته و موجب تغییر پاسخ های سازه می گردد. همچنین عرض سازه نیز موجب تغییر نتایج حاصله شده و وزن سازه افزایش یافته که باید در طراحی شمع و پایه این موضوع لحاظ شود. به خوبی می توان دید که نمی توان دو اثر شمع و پایه های پل را جدا از هم بررسی کرد.

۴-۱- پاسخ به سؤالات

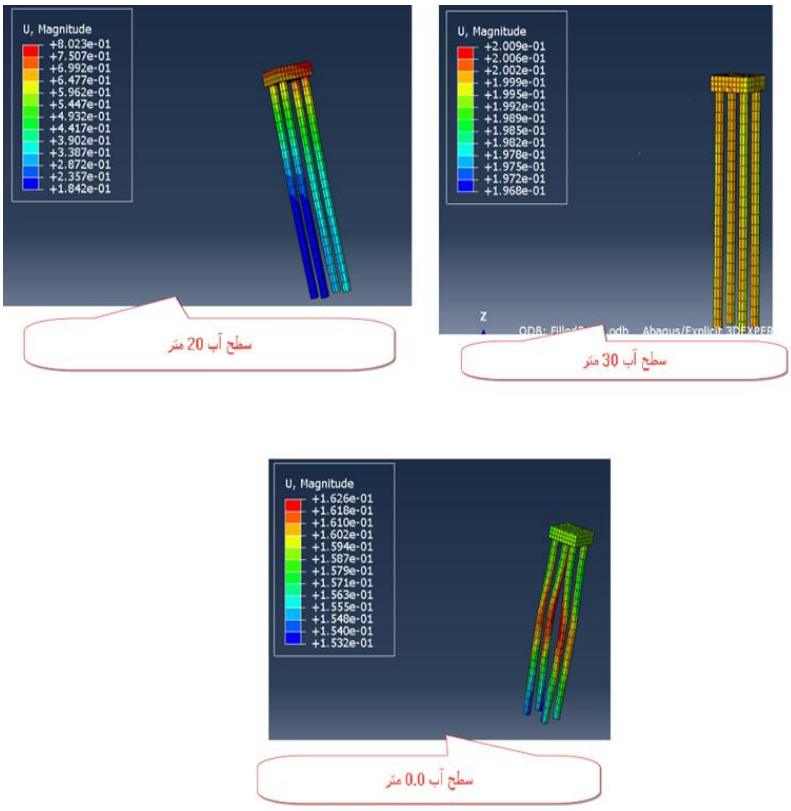
آب موجب تغییر پاسخ سازه به زلزله می شود. افزایش ارتفاع آب پاسخ سازه در مقابل زلزله را تغییر می دهد. رفتار شمع ها در حالتی که آب وجود داشته باشد تغییر می کند.

۴-۲ - بیان نتایج

ارتفاع آب موجب شده است که پریود شمع ها تغییر کرده و در نتیجه پاسخ های مربوط به بارگذاری شمع، تاثیرمستقیمی ازارتفاع آب می گیرد.

۴-۲-۱- مقایسه تغییر شکل های شمع های پایه های پل

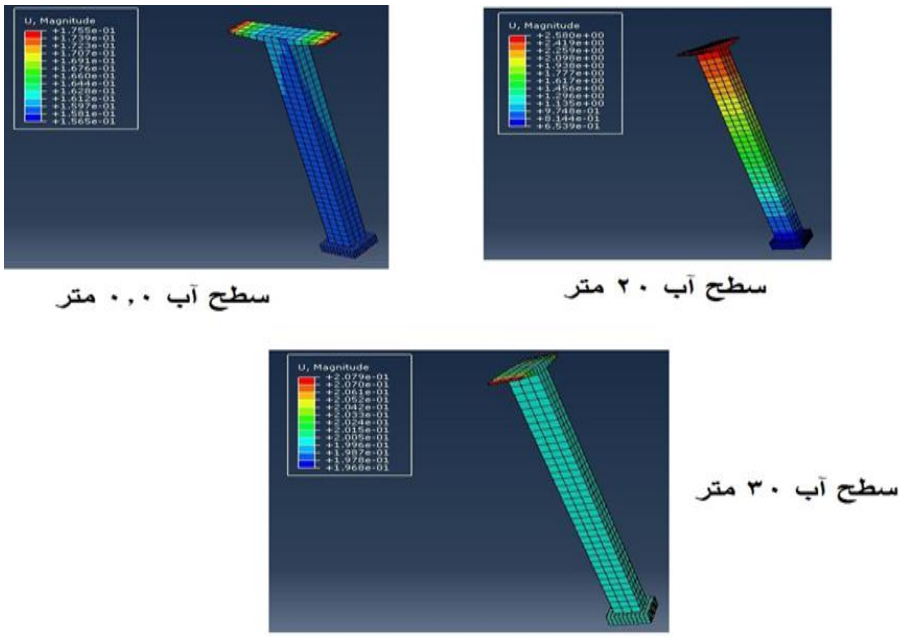
همانطور که درشکل ۱۰مشخص است، شمع ها رفتار متفاوتی را از خود در شرایط مختلف ارتفاع آب نشان می دهند. گرچه هر چه آب بیشتر باشد، تغییر مکان شمع ها بیشتر می شود، اما تغییر مکان حداکثری شمع، نسبت به نقاط دیگر گروه شمع کمتر و احتمال وارد شدن شمع به حالت غیر خطی کمتر است. این موضوع اهمیت حضور آب در طراحی ها را می رساند.



شکل ۱۰- تاثیر ارتفاع آب بر رفتار شمع ها (پایه پل با عرض ۳ متر)

۴-۲-۲ – مقایسه تغییر شکل بر اثر اختلاف سطح آب

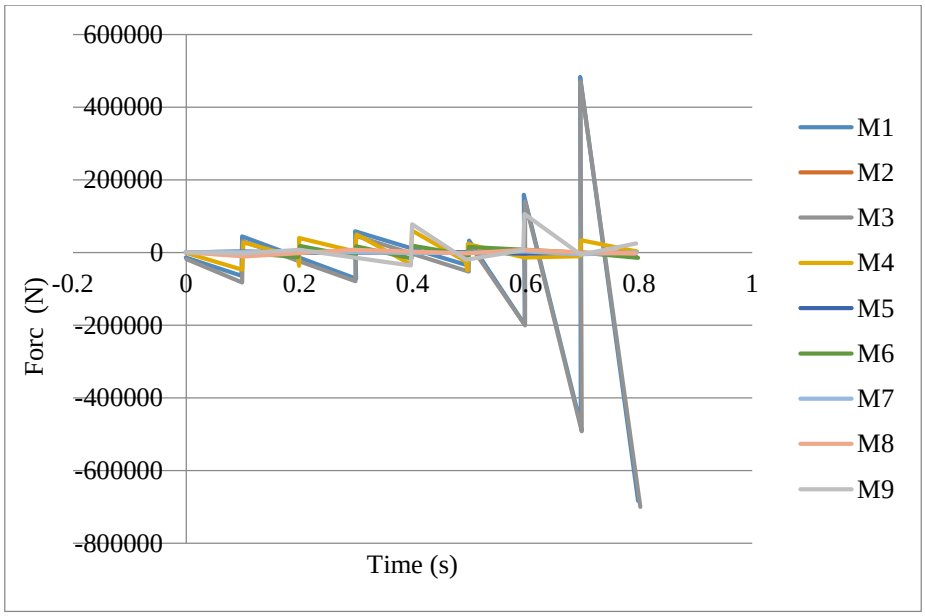
با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود که هر چه سطح آب بیشتر باشد، تغییرمکان مربوط به نوک پایه پل بیشتر می شود. این موضوع نشان می دهد که آب تاثیر مستقیمی بر اندرکنش خاک و سازه داشته و آب مقدار تغییر شکل را افزایش می دهد.



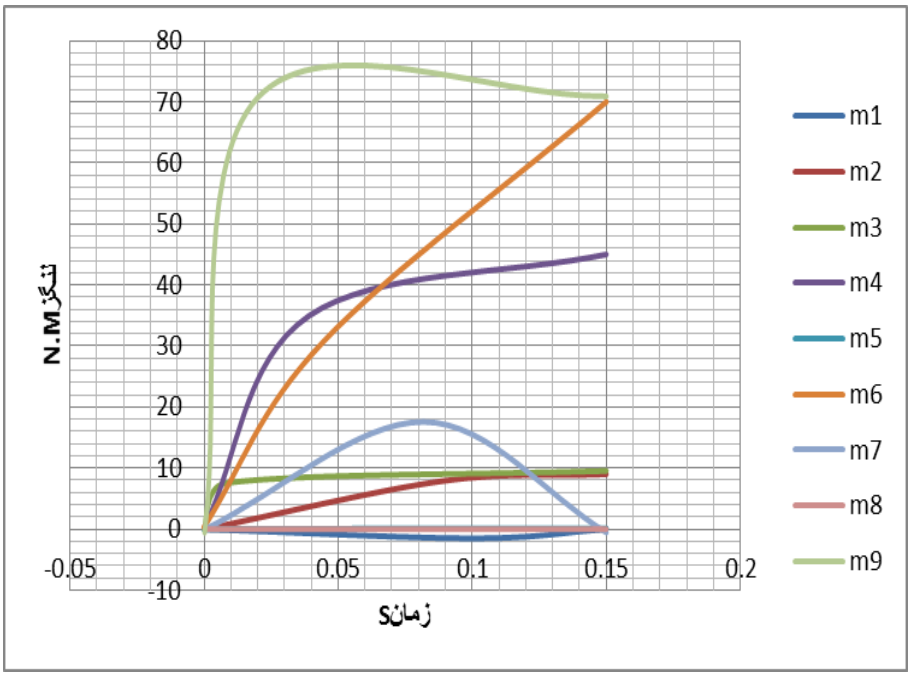
شکل۱۱- تغییر شکل های حداکثر در طول زلزله در سه شرایط سطح آب (عرض ستون ۳ متر)

۴-۳-اثرارتفاع آب برنیروی داخلی پایه پل

دراشکال زیربه بررسی افزایش ارتفاع آب برروی نیروی داخلی پایه پل می پردازیم.



شکل۱۲- نمودار نیرو به زمان درحالت کلی



شکل۱۳- نمودار لنگر به زمان درحالت کلی

بامشاهده وبررسی مدل های موجودوبررسی نمودارنیرو-زمان ولنگر-زمان برای آن ها مشخص می شود که افزایش ارتفاع آب سبب افزایش نیروهای داخلی می باشد که هرچه مقطع پل بزرگتر باشد این اثر تشدیدکنندگی نیز بیشتراست.

۵- مراجع

1. Gibbs, M. A., Kurth, B. N., & Bridges, C. D. (2013). Age and growth of the loricariid catfish Pterygoplichthys disjunctivus in Volusia Blue Spring, Florida. Aquatic Invasions, 8(2).

2. Liu, C. G., & Sun, G. S. (2014). Calculation and experiment for dynamic response of bridge in deep water under seismic excitation. China Ocean Engineering, 28(4), 445-456

۳. بررسی قابلیت اعتماد پل های بتن آرمه راه آهن رهگذر، رضا. اوحدی، علی‌رضا،۱۳۸۹

۴. قاسمی، سینا .سرایی، احمد، ۱۳۹۳، تحلیل و طراحی پل

۵. شریعتمدار، هاشم، دلاوری، پژمان، ۱۳۸۹، بررسی سختی و مقاومت تسلیم جداساز بر پاسخ لرزه ای پل ها، نشریه مهندسی عمران، شماره ۲

6. Smith, J. V., & Sullivan, L. A. (2014). Construction and maintenance of embankments using highly erodible soils in the Pilbara, north-western Australia. International Journal of GEOMATE, 6(2), 897-902.

7. Zeng, Q., Dimitrakopoulos, E. G., Guo, K., & Peng, B. (2015). Seismic Response Analysis of an Interacting (Highway) Bridge-Vehicle (Trucks) System under Frequent Earthquakes. In The Third International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Infrastructure (ICCEASI 2015), Hong Kong.

۸. مستوفی نژاد، داوود، ۱۳۹۳، بارگذاری سازه ها، انتشارات ارکان دانش

9. Yu, J., Tahmasebi, A., Han, Y., Yin, F., & Li, X. (2013). A review on water in low rank coals: the existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization. Fuel Processing Technology, 106, 9-20.

10. Wang, Z. H., Gu, C. S., & Chen, G. X. (2011). Seismic Response of Bridge Pier in Deep Water Considering Close Fluid-structure Interaction Effects. In Advanced Materials Research (Vol. 243, pp. 1803-1810). Trans Tech Publications.

11. Bai de-gui , Chen guo – xing ,Wang zhi – hua , seismic response analysis of the large bridge supported by group pile foundation considering the effect of wave and current action , WCEE ,2008

12.Yang, J. N., He, X. J., & Liu, J. (2016). Study on the impact of water depth on dynamic characteristics of bridge. In Mechanics and Mechanical Engineering: Proceedings of the 2015 International Conference (MME2015) (pp. 219-225).

۱۳. شاهوردی زاده، عقیل، **۱۳۹۰**، بررسی روش های طراحی پل های با عرشه صندوقه ای رایج در ایران و مقایسه آن با سایر آیین نامه های معتبر دنیا، دانشگاه تبریز.