مجله مهندسی عمران هورین، اردیبهشت ۱۴۰۲، دوره ۱، شماره ۳، ص ص ۱۲-۱۸

مجله علمی مطالعات پژوهشی

در مهندسی عمران آینده

Journalhi.com/com

اندرکنش سازه های هیدرولیکی و مهندسی خاک و پی

احد باقر زاده خلخالی *[۱]، فهیمه عارفیان شهربابکی [۲]، علی شهابی [۳]

۱- استادیار گروه ژئوتکنیک ، دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات ، تهران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی ، دانشکده عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات ، تهران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک ، دانشکده عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات ، تهران.

* تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، a_bagherzadeh@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۲ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۷ فروردین ۱۴۰۲

ارائه در سایت: ۶ اردیبهشت ۱۴۰۲

کلید واژگان:

اندرکنش سازه های هیدرولیکی

مهندسی خاک و پی

سد

دیوار حائل

لوله مدفون

چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه T شکل مورب پر شده از نانوسیال آب و مس تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت به روش عددی بررسی شده است. دیوار بالائی محفظه در دمای سرد و سایر دیواره‌ها عایق می‌باشند. یک منبع حرارتی با دمای ثابت در کف محفظه تعبیه شده است. معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل به طور همزمان حل می‌گردد. عدد هارتمن از ۰ تا ۸۰ تغییر داده شده و محفظه تحت زوایای ۰ تا ۹۰ درجه چرخیده است. نتایج نشان می‌دهند، اثر میدان مغناطیسی بر نوسلت متوسط در ریلی‌های بالا بیشتر است. در $Ra=10^5$، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن ۲۰، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن ۴۰ به بالا، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود. در $Ra=10^6$، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن ۲۰، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن ۴۰ به بالا، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد، بیشترین انتقال حرارت در اعداد ریلی $۱۰^۵$ و $۱۰^۶$، در زاویه ۶۷/۵ درجه رخ می‌دهد و کمترین انتقال حرارت در اعداد ریلی $۱۰^۵$ و $۱۰^۶$، به ترتیب در زاویه صفر و ۲۲/۵ درجه رخ می‌دهد.

Interaction of hydraulic structures and soil and foundation engineering

Ahad BagherzadehKhalkhali[1*], Fahime ArefianShahrbabaki[2], Ali Shahabi[3]

1- Assistant Professor, Department of Geotechnics, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran.
2- Master's student in water engineering and hydraulic structures, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran
3- Master's student in Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran
* Tehran, Islamic Azad University, Science and Research . a_bagherzadeh@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 2023-03-03
Accepted 2023-04-06
Available Online 2023-04-26

Keywords:
Interaction of hydraulic structures
Soil and foundation engineering
Dam
Retaining wall
Buried pipe

Abstract

In the seismic analysis of structures that are in contact with water and soil, various factors influence the final response of the structure. One of these factors is taking into account the direct effect of fluid and soil, which can be important especially during severe earthquakes and in tall structures. Due to this, various studies have been presented in the field of structure-fluid and structure-soil interaction analysis in various engineering sciences. In this research, firstly, different methods of analysis of structure-fluid interaction problems are examined, and then examples of the application of these methods using case studies conducted in the field of investigating the effect of the presence of fluid on structures such as retaining walls, concrete dams, gravel dams with Concrete cover and earthen dams and buried pipes were provided.

۱- مقدمه

تحلیل اندرکنش بین اجسام تغییر شکل پذیر جایگاه برجسته ای هم در مباحث مرتبط با ریاضیات کاربردی و هم در مباحث مرتبط با علوم مهندسی دارد. جدا از مباحث ریاضیاتی، بحث اندرکنش یکی از مسائل مهم در عرصه مهندسی میباشد. این مسائل شامل سازه های شناور، پی سازه ها، مسائل مرتبط با پدیده های خستگی و ترک خوردگی، مصالح لایه ای و کامپوزیت و همچنین سازه های زیر زمینی میباشد. اندرکنش خاک و سازه، اثرات انعطاف پذیری تکیه گاه سازه را که همان خاک است در پاسخ های سازه اعمال می کند. در روش های طراحی مرسوم مهندسی عمران، آنچه که معمولا در نظر گرفته نمی شود، اثرات انعطاف پذیری خاک است. از این جهت اهمیت بررسی های بیشتر پیرامون این مسئله مشخص است. کارهای تحقیقاتی انجام گرفته در زمینه اندرکنش از چندین دهه پیش به طور جدی شروع شده است و فرآیند مذکور در عصر حاضر نیز در حال پیگیری است [۱].

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 پشت آن 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 [۲] . در روش های قدیمی این نیروی هیدرودینامیک با فرض رفتار غیر قابل تراکم سیال، به صورت نیرویی شبه استاتیک و مستقل از فرکانس بارگذاری در محاسبات مربوط به طراحی سازه منظور می شد. اما به مرور مشخص شد تأثیر تراکم پذیری سیال بر پاسخ دینامیک سیستم تابعی از نسبت فرکانس طبیعی مخزن به سازه، عمق مخزن و فرکانس بارگذاری است و بنابراین محاسبه نیروی هیدرودینامیک ناشی از اثر سیال تراکم پذیر و ارتباط آن با محتوای فرکانسی بار و خصوصیات سازه مورد توجه قرار گرفت [۳].

۲- روش های حل مسائل اندرکنش سازه های هیدرولیکی

برای حل معادلات اندرکنش سازه-سیال، از شیوه های مختلفی استفاده شده است. این روش ها را می توان از دو دیدگاه کلی طبقه بندی نمود. در طبقه بندی نوع اول که بر مبنای تکنیک تحلیل مسأله می باشد، به منظور بررسی فشار هیدرودینامیک وارد بر بدنه سد از دو دسته کلی روش های تحلیلی و عددی استفاده شده است. از نظر تاریخچه ادبیات فنی، ابتدا مسأله اندرکنش سازه هیدرولیکی با روش های تحلیلی در بعضی حالات خاص و برای فرضیات ساده تر، بررسی شد. در سال های اخیر با پیشرفت امکانات رایانه ای و گسترش روش های عددی، تحلیل مسأله اندرکنش سازه های هیدرولیکی با فرضیات، شرایط مرزی، شرایط هندسی و مدل های رفتاری پیچیده تر امکان پذیر شده است [۴].

نوع دوم طبقه بندی روش های تحلیل مسائل اندرکنش سازه های هیدرولیکی، بر مبنای نوع مجهولات مسأله استوار است. در این راستا تاکنون دو شیوه متفاوت از نظر انتخاب مجهول گرهی در محیط سیال به کار رفته است. در شیوه نخست که به فرمولاسیون اویلر موسوم است، متغیر محیط سازه از نوع جا به جایی و مجهول گرهی در محیط سیال فشار هیدرودینامیک یا نرخ تغییرات سرعت انتخاب می شود. در شیوه دوم که به فرمولاسیون لاگرانژ موسوم است، مجهول گرهی محیط سیال همانند محیط سازه همان تغییر مکان در نظر گرفته می شود، با این تفاوت که مدول برشی سیال مساوی صفر منظور می گردد.

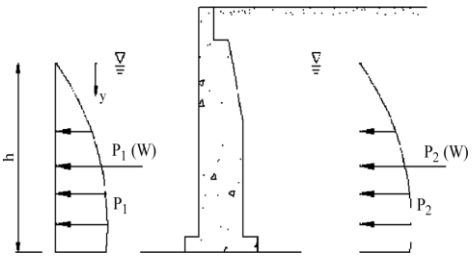
محدودیت عمده روش اویلر در معادلات اجزاء محدود، متقارن و غیر باندی شدن ماتریس های جرم و میرایی و سختی سیستم است که باعث می شود حل دستگاه معادلات سیستم به حجم بالایی از محاسبات نیاز داشته باشد. البته این اشکال با اعمال روش های خاصی قابل اصلاح می باشد. در روش اویلر، هر یک از دو محیط سازه و سیال به صورت جداگانه و غیرکوپل تحلیل می شوند. تأثیر فشار هیدرودینامیک ناشی از محیط سیال بر بدنه سد به صورت اعمال یک بار خارجی بر بدنه بالا دست سد اعمال می گردد و سپس با تحلیل محیط بدنه سد، پاسخ جابه جایی های دینامیکی بدنه سد محاسبه خواهد شد. بخش کوپل آنالیز در فصل مشترک سازه و سیال برای در نظرگرفتن نیروهای اندرکنش سد و مخزن استفاده می شود [۵].

از آ نجایی که در روش های با مبنای لاگرانژ کلیه مغیرها از نوع جا به جایی هستند، این روش ها در نرم افزارهای اجزاء محدود به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند با این وجود این روش ها نیز در بعضی موارد با مشکلات عددی نظیر مود انرژی صفر مواجه می شوند. بزرگترین عیب این روش حجم زیاد حافظه مورد نیاز برای محیط سیال و نیز مشکل اعمال شرط مرزی مناسب برای مرز مشترک بین آب و سازه است. در راستای کاهش مشکلات عددی و محاسباتی روش لاگرانژ، مطالعاتی انجام شده است که منجر به بهبود و اصلاح نوع لاگرانژی المان های سیال شده است. روش لاگرانژ قابلیت در نظر گرفتن آب در هر دو حالت سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر را داراست [۵].

در چند دهه اخیر در دسترس قرار گرفتن کامپیوترها، باعث گسترش استفاده از روش های عددی در مسائل تحقیقاتی و کاربردی شده است که به عنوان نمونه می توان به روش های اجزاء محدود، تفاضل محدود و اجزاء مرزی اشاره نمود. در زمینه تحلیل دینامیکی سیستم های سازه های هیدرولیکی نیز مطالعات گسترده ای با استفاده از روش های عددی انجام پذیرفته است. به کمک این روش ها طراحان بر محدودیت های عمده روش های تحلیلی فائق آمده و سیستم های سد و مخزن با هندسه دلخواه و شرایط مرزی پیچیده را آنالیز کرده اند. در روش های عددی، هر دو نوع شیوه حل معادلات اویلرین و لاگرانژین را برای حل معادلات تعادل سیستم کوپل سازه-سیال به کار برده اند. در ادامه این بخش نمونه هایی از مطالعات انجام گرفته در زمینه تحلیل اندرکنش دینامیکی انواع مختلف سازه ها با محیط سیال ارائه خواهد شد.

۳- دیوارهای حائل

به منظور تحلیل دینامیکی دیوارهای حائل در ساده ترین حالت، از روش شبه استاتیکی مشابه با روش جرم افزوده وسترگارد در تعیین فشارهای جانبی ناشی از زلزله بر دیوار حائل استفاده می شود [۷].



شکل ۱ نیروهای هیدرودینامیکی اعمالی بر دیوارهای حائل در سمت آب و خاک

چنانچه در شکل ۱ مشاهده می‌شود مشابه با رابطه وسترگارد، فشار هیدرودینامیک در سمت آب از را بطه زیر محاسبه می شود.

$$P_1 = \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hy} \qquad (۱)$$

مقدار فشار هیدرودینامیک آب در سمت خاک P2 برابر با ۷۰ درصد فشار P1 است. در رابطه بالا ضریب زلزله استاتیکی معادل، h ارتفاع مخزن و y فاصله از مخزن می باشد.

با گسترش روش های عددی مطالعات زیادی در زمینه تحلیل کوپل دیوارهای حائل در مجاورت آب انجام شده است که در راستا به یک نمونه اشاره می شود. منزز و فرناندز تحلیل اندرکنش دیوار حائل، آب و خاک را با روش المان محدود لاگرانژین بررسی نمودند. آن ها دیوار حائلی با ارتفاع ۶ متر و دارای میل مهار مدل سازی نمودند. تحلیل در دو حالت اجرای میل مهارها بالاتر از تراز آب و در حالت اجرای آنها به صورت مستغرق انجام گرفت. بر مبنای نتایج حاصل، اثر اندرکنش آب در هر دو حالت باعث افزایش نیروی مهارها و لنگر اعمالی بر دیوار بوده است. در حالتی که مهار در پایین خط فریاتیک قرار دارد، تأثیر اندرکنش آب بر نیروها چشمگیرتر است.

۴- سدهای بتنی

در زمینه تحلیل دینامیکی سدهای بتنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش، مطالعات بسیار گسترده ای انجام گرفته است. به طور خلاصه می توان این مطالعات را در سه محور زیر جمع بندی کرد [۸]:

مدل سازی سیستم کوپل و روش تحلیل مسأله (نوع المان ها، نوع مجهولات، نوع روش عددی مورد استفاده در تحلیل).

مدل سازی شرایط مرزی (فونداسیون مخزن، شرایط مرزی کف و شرایط مرزی انتهای دور مخزن).

مدل سازی رفتار مصالح سد که در این زمینه رفتار غیرخطی مصالح بتنی با دو دیدگاه تئوری پلاستیسیته و مکانیزم گسیختگی و ترک بررسی شده است.

۴-۱- مدل سازی سیستم کوپل

در دهه ۷۰ میلادی، چوپرا نتایج روش تحلیلی خود را به حوزه روش های عددی بسط داد و روش زیر سازه را برای تحلیل مسأله اندرکنش سدهای بتنی- مخزن- فونداسیون ارائه نمود. در روش زیر سازه که جزء روش های با مبنای اویلرین طبقه بندی می گردد، محیط کوپل سد- مخزن- فونداسیون به صورت سه محیط مجزا در نظر گرفته می شود و نیروهای حاصل از زیر سازه های مخزن و فونداسیون بر بدنه سد اعمال می شود. چوپرا و همکارانش در ادامه طی دهه ۸۰ و ۹۰ میلادی، روش زیر سازه و برنامه کامپیوتری مرتبط با آن را برای سدهای بتنی وزنی و قوسی و شرایط مرزی مختلف کف مخزن بسط و گسترش دادند. یکی از مهمترین نتایج این مطالعات تعیین محدوده تأثیر اندرکنش مخزن بر مبنای پارامتر برای سدهای بتنی وزنی بود. بر این مبنا چنانچه باشد، در نظر گرفتن تراکمپذیری سیال، تأثیر چندانی بر پاسخ سدهایبتنی وزنی نخواهد گذاشت. در رابطه فوق فرکانس طبیعی مخزن و فرکانس طبیعی سازه هستند [۹].

کالایر و همکارانش، تحلیل دو بعدی لرزه ای سد بتنی وزنی پاین فلت را با استفاده از هر دو روش اویلر و لاگرانژ انجام دادند و پاسخ ها را با یکدیگر مقایسه نمودند. ژائو و همکارانش، یک روش دینامیکی صریح را بر ای تحلیل اندرکنش سیستم سه گانه سد - مخزن -لایه آبرفتی، کف مخزن- لایه آبرفتی و کف مخزن- فونداسیون به کار بردند. از خصوصیات این روش سرعت حل بالا و نیاز به حافظه کامپیوتری کمتر می باشد که به ویژه در تحلیل مسائل غیرخطی حائز اهمیت است. مطابق با نظر نویسندگان این تحقیق، اشکال عمده روش ارائه شده ایجاد حالت خطاهای ناشی از ناپایداری عددی است [۱۰].

۴-۲- مدل سازی شرایط مرزی

مقدار نیروی هیدرودینامیک به عوامل مختلفی نظیر ارتفاع مخزن، شیب بدنه سد، تراکم پذیری سیال و محتوای فرکانسی بار بستگی دارد. مقدار این نیرو همچنین به شر ایط مرز ی محیط اطراف، یعنی کف و کناره های مخزن بستگی دارد. از سویی مقادیر حداکثر پاسخ های سد به میرایی مصالح سازه نیز وابسته است. هر چند این میرایی در سدهای بتنی نسبت به بسیاری از سازه ها اهمیت کمتری دارد، اما انواع دیگر ی از میرایی در این مسأله قابل توجه هستند. میرایی ناشی از انتشار موج در راستای نامحدود بالا دست مخزن و یا جذب موج در لایه رسوبی کف مخزن می تواند باعث کاهش قابل توجهی در مقادیر پاسخ های سد بتنی شود. همچنین فونداسیون سد بخشی از ارتعاش آن را به محیط دور منتقل می کند. این میرایی وابسته به شرایط هندسی را می توان با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب در مسائل مدل سازی نمود [۱۱].

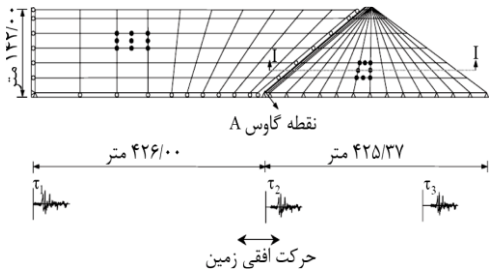
برای تعریف شر ایط مرزی کف و انتهای دور مخزن، روش های مختلفی در هر دو حوزه زمان و فرکانس توسط محققین ارائه شده است. مرسومترین روش مدلسازی مرزهای جاذب انتهای مخزن در حوزه زمان، استفاده از شرط مرز ی مرتبه اول سامرفیلد است که توسط میراگرهای ویسکوز و در حوزه زمان تعریف می شود. در صورت استفاده از مرزهای سامرفیلد، برای رسیدن به پاسخ های دقیق بایستی طول مخزن به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. برای کاهش طول مخزن در مدل سازی، بایستی از شرایط مرزی پیچیده تری با مرتبه بالاتر استفاده نمود. همچنین شر ایط مرزی کف و انتهای دور مخزن وابسته به محتوای فرکانسی بار اعمالی نیز می باشد که در حوزه زمان قابل تعریف نمی باشد.

۵- سدهای سنگریزه ای با پوشش بتنی

وان دان و هریس تأثیر وجود مخزن بر پاسخ جابه جایی سد های سنگریزه ای با پوشش بتنی (cfrd) را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش بررسی نمودند و در پایان انجام تحلیل های بیشتر در این زمینه را پیشنهاد نمودند [۱۲] سید و همکاران بر اساس تحلیل های خود نتیجه گیری نمودند که در سدهای cfrd اثر اندرکنش دینامیکی بین سد و مخزن ناچیز است و در نظر گرفتن نیروی هیدرودینامیک مخزن نیز مانند سدهای خاکی تأثیر چندانی بر پاسخ سیستم ندارد. سکو پینتو معتقد است که صحت استدلال سید و همکاران در مورد کم اهمیت بودن تأثیر اندرکنش مخزن بر پاسخ نهایی

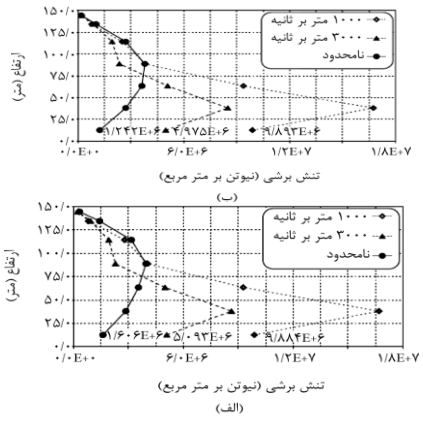
سدهای cfrd بایستی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. بیرکتار، هاسیفندیوگلو و موافیک، تأثیر تحریک غیر همفاز سد سنگریزهای با پوشش بتنی با نام تورول را با در نظر گرفتن اندرکنش مخزن و با روش لاگرانژ برای دو حالت مخزن پر و خالی مورد بررسی قرار دادند. محرک ورودی از نوع جابه جایی تکیه گاهی در راستای افقی می باشد که با دو بار انتگرال گیری از رکورد زمانی شتاب فیلتر شده و اصلاح شده مؤلفه شرقی- غربی ارزینکان به دست آمده است [۱۳].

مطابق شکل۲، تحریک غیر هم فاز در سه نقطه در قسمت پایین مخزن و سد در سه زمان مختلف به مدل انتخاب اعمال می شود. زمان رسیدن موج به این نقاط به سرعت موج و فاصله نقطه از مبدأ بستگی دارد. در این تحقیق سه سرعت مختلف موج برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و بینهایت در نظر گرفته شده است .



شکل ۲ مدل سازی اجزاء محدود سیستم اندرکنش سد و مخزن

شکل۳ توزیع تنش های برشی حداکثر در رویه بتنی در ارتفاع را برای سرعت های مختلف موج ورودی نشان می دهد . چنانچه مشاهده می شود کاهش سرعت انتقال موج در تکیه گاه باعث افز ایش مقادیر تنش ها در رویه بتنی و مصالح سنگریزه ای سد می گردد. همچنین تحریک غیر همفاز باعث تغییر چشمگیری در محتوای فرکانسی پاسخ تنش در پاشنه سد شده است. با این حال وجود مخزن تأثیری بر مقاد یر و محتوای فر کانسی پاسخ ها ندارد. بیرکتار و همکاران بر اساس پاسخ های به دست آمده نتیجه گرفتند که در این سد خاص و برای تحریک غیرهم فاز، در نظر گرفتن اندرکنش مخزن ضرورت چندانی ندارد. با این حال نتایج بایستی برای سدهای مختلف و تحریک های ورودی متفاوت بررسی گردند تا امکان نتیجه گیری منطقی تری فراهم گردد.



شکل ۳ تنش برشی در رویه بتنی در حالت الف) مخزن خالی و ب) مخزن پر

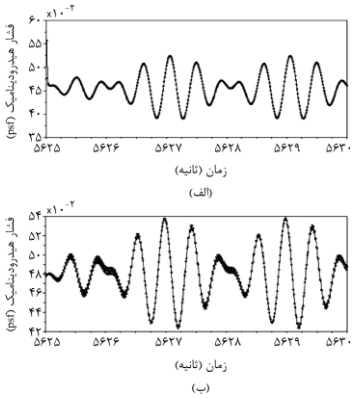
۵-۱- سدهای خاکی

حجم مطالعات موجود در زمینه اندرکنش سدهای خاکی بسیار محدودتر از سدهای بتنی می باشد. با این حال صحت این استدلال ها به دلایل زیادی بایستی مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد. نخست آن که در هنگام اعمال بارهای لرزه ای، بالا رفتن فشار آب حفره ای در مصالح نفوذ پذیر پوسته و در نتیجه کاهش تنش مؤثر در آن، میتواند پاسخ های دینامیکی سد نظیر حداکثر شتاب، حداکثر تغییرمکان ها و کرنش های تاج سد و یا پایداری شیب بالا دست را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر تا کنون تحقیقی در زمینه اثر طیف گسترده ای از تغییرات مقادیر نفوذ پذیری مصالح پوسته بر پاسخ نهایی سد خاکی منتشر نشده است. دلیل دیگر گسترش ساخت سدهای خاکی بلند در مناطق با لرزه خیزی بالاتر است که هر دو عامل افزایش ارتفاع و افزایش شدت محرک ورودی می تواند میزان تأثیر مدلسازی مستقیم مخزن را افزایش دهد . از سویی ویژگی های خاص زلزله های حوزه نزدیک نظیر اثر جهت پذیری، اثرات تغییر مکان ماندگار، اثر فرا دیواره و اثر مؤلفه قائم، می تواند باعث افزایش میزان تأثیر وجود مخزن بر پاسخ نهایی سیستم کوپل گردد. همچنین تأثیر وجود محرک تکیه گاهی غیرهمسان نیز می تواند مد نظر باشد. با توجه به جمیع نکات فوق، اهمیت بررسی اندرکنش دینامیکی سدهای خاکی آشکار می گردد. در ادامه دو تحقیق موجود در این زمینه با تفصیل بیشتری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در تحقیق نخست که توسط گوان و مور منتشر شد، تحلیل سد خاکی لاویلیتا تحت اثر زلزله السنترو با روش زیر سازه در حوزه فرکانس انجام شده و درصد تأثیر آب مخزن و فونداسیون بر پاسخ سد در دو حالت مخزن پر و خالی بررسی گردید. در تحلیل محیط مخزن با استفاده از توابع گرین، روش جدیدی برای محاسبه جرم های اضافه وابسته به فرکانس ناشی از مخزن بر بدنه سد ارائهشد. به دلیل استفاده از روش زیر سازه، تنها بدنه سد مدل سازی و مش بندی شد و نیروهای ناشی از فونداسیون و مخزن بر آن اعمال گردید. بر مبنای نتایج حاصل از این تحقیق مشاهده شد که در مدل سد لاویلیت ا اختلاف پاسخ های مخزن پر و خالی به ویژه در محدوه فرکانسهای بارگذاری چشمگیرتر است که فرکانس طبیعی پایه مدل سد است. همچنین افزایش شیب بدنه بالادست سد، باعث افزایش اختلاف پاسخهای مخزن پر و خالی می شود [۱۴].

در تحقیق دوم، وانگ و وانگ مطالعه ای را بر ای تحقیق صحت برآورد خطر روانگرایی در سدهای خاکی بر مبنای مطالعات اصلاح شده بر اساس اندرکنش سیستم مخزن- سد خاکی- فونداسیون انجام دادند. در این مطالعه از نرمافزار ADINA استفاده شد. آب پشت سد و آب موجود در بدنه سد خاکی و ساختگاه به صورت هم زمان تعریف و به صورت تمام کوپل در تحلیل منظور شدند. آب مخزن با استفاده از دو نوع از المانهای سیال با مبنای پتانسیل که در نرم افزار موجود هستند، مدلسازی شد. اولین نوع این المان ها دارای تراکم پذیری کم و نوع دوم دارای تراکم پذیری بالا می باشند. این دو نوع المان مصالح خاکی با استفاده از مدل دراگر- پراگر تعریف شدند. بر مبنای فرضیات فوق، تحلیل دینامیکی سدی شبیه به سد سن فرناندو بالایی انجام شده است و پاسخ های نهایی سد نظیر فشار هیدرودینامیکی آب بر مرزهای مشترک ، فشار آب حفره ای در بدنه سد، تنش های عمودی ایجاد شده در المان های خاک و جابه جایی های افقی در زمان های مختلف تحلیل دینامیکی و برای هر دو نوع المان سیال با تراکم پذیری کم و تراکم پذیری بالا محاسبه و ارائه شد. مؤلفین نتیجه گرفتند که پاسخ های حاصل از تحلیل با این دو نوع المان سیال تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و می توان با دقت

مناسبی از هر دو نوع این المان های سیال در تحلیل مسائل اندرکنش سد خاکی- مخزن استفاده نمود . نمونه ای از پاسخهای ارائه شده مربوط به فشار در پنجه سد برای هر دو نوع المان سیال در شکل ۴ مشاهده می شود . همچنین محققین بر این عقیده اند که علیرغم این که پاسخ ها در محدوده منطقی و قابل قبولی قرار گرفته اند، در صورت استفاده از یک مدل رفتار ی کارآمدتر و کامل تر به جای مدل دراگر- پراگر و همچنین اصلاح روش تعریف میرایی، نتایج به نحو چشمگیری بهبود می یابد [۱۵].



شکل ۴ پاسخ تاریخچه زمانی فشار در پنجه سد الف) المان با تراکم پذیری کم و ب) المان با تراکم پذیری زیاد

۵-۲- لوله های مدفون

لوله های مدفون در جوامع مدرن از شریان های حیاتی به شمار می آید که نقشی حیاتی و اساسی را در چرخه زندگی بشری ایفا می نماید. خدمات شهری، کشاورزی، صنعتی و مخابراتی به این نوع از سازه ها وابسته است. توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورهای توسعه یافته مرهون بعضی پارامترهای اساسی توسعه، نظیر شریان های حیاتی می باشد [۱۶].

در سال های اخیر استفاده از لوله های فرا ساحل در مناطق ساحلی افزایش زیادی داشته است. این افزایش به دلیل نیاز روبه رشد برای انرژی و پیشرفت در ساخت و استفاده از منابع نفت و گاز در دریاها می باشد. با افزایش استفاده از لوله های فرا ساحل، نیاز به بررسی کارآیی این لوله ها هنگام وقوع زلزله بیشتر شده است. پتانسیل خرابی در این لوله ها هنگام زلزله در اثر سه عامل حرکات زمین ناشی از موج زلزله، زمین لغزش و تغییر شکل های دائمی زمین ناشی از گسیختگی گسل نزدیک سطح، نشست ها و روانگرایی می باشد. این سه عامل به ترتیب کمترین و بیشترین اثر را بر روی این لوله ها دارند. جابجایی های بزرگ مربوط به چنین پدیده ای می تواند با توجه به هندسه خط لوله و سازه های متصل، تغییرشکل های جدی پلاستیک و یا حتی گسیختگی در خط لوله ایجاد کنند و جمعیت انسانی، تاسیسات صنعتی و محیط زیست را در معرض خطر قابل توجهی قرار دهند. به منظور اطمینان از ایمنی خط لوله در برابر یک جابجایی بزرگ و دائمی گسل، وضعیت متناظر تنش و تغییرشکل خط لوله باید ارزیابی گردد[۱۷]. برخی از حالات خرابی در لوله ها و تکیه گاه های مربوطه در اثر زلزله، شناخته شده تر هستند. این حالات که به عنوان مودهای خرابی نامیده می شوند در لوله های سطحی و مدفون تفاوت دارند. به همین علت در دو بخش، مودهای خرابی در لوله های سطحی و مدفون بررسی می شوند [۱۸]. در لوله های سطحی مودهای خرابی را می توان به شرح زیر نام برد [۱۹]:

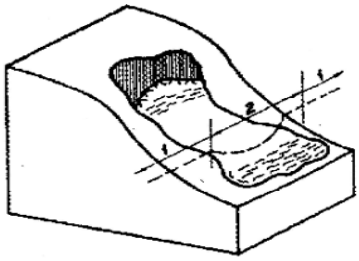
۱- شکست لوله اتصال دهنده تجهیزات مهار نشده
۲- شکست لوله های متصل به مخازن
۳- شکست در اتصالات مکانیکی
۴- لغزش لوله ها از روی تکیه گاه
۵- لغزش لوله های معلق
۶- شکست لوله های متصل در محل اتصال
۷- اتصالات اصطکاکی ناکافی
۸- عدم کفایت اتصالات جوشی
۹- لغزش تکیه گاه های مهار نشده

۵-۳- مودهای خرابی لوله های مدفون

عمده مودهای خرابی در لوله های مدفون ناشی از تغییر مکان و خرابی ناشی از اندرکنش با خاک شامل لغزش، جابجایی های افقی، جابجایی های افقی و عمودی، نشست ناشی از تحکیم خاک و مهمتر از همه روانگرایی می باشد [۲۰].

۵-۴- خرابی ناشی از لغزش زمین

باید تا حد امکان از احداث خطوط لوله در مناطقی که احتمال جابجایی در اثر زلزله یا دیگر عوامل محیطی وجود دارد، اجتناب شود. در صورت اجبار به احداث خط لوله در این نواحی، با تمهیدات مناسب (تثبیت خاک، مسلح نمودن خاک و ...) جلوی خرابی لوله ناشی از لغزش خاک گرفته شود. در شکل ۵ نحوه خرابی لوله در اثر لغزش زمین نشان داده شده است.



شکل ۵ سازوکار خرابی لوله در اثر نشست ناشی از لغزش شیب

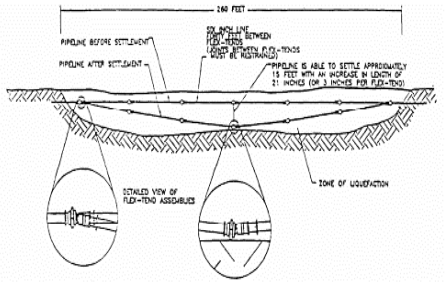
۵-۵- خرابی ناشی از جابجایی

در اثر جابجایی خاک اطراف لوله به علت نیروهای ناشی از زلزله، تنش های کششی و فشاری به جدار لوله وارد می آید. در صورتی که لوله دارای مقاومت کافی باشد، قادر به تحمل این تنش هاست. همچنین در صورتی که لوله یا اتصالات آن شکل پذیر باشد، قادر به جابجایی به همراه خاک پیرامون خود بوده و بنابراین تنش های ایجاد شده در جدار لوله کاهش می یابد. اگر لوله واجد هیچ یک از دو ویژگی فوق (مقاومت یا شکل پذیری) نباشد، احتمال آسیب دیدگی آن به علت جابجایی خاک اطرافش افزایش می یابد. در شکل ۶ نمونه ای از خرابی لوله در اثر جابجایی خاک مجاور نشان داده شده است.

شکل ۶ ساز وکار خرابی لوله در اثر جابجایی خاک مجاور

۵-۶- خرابی در محل اتصال

همانند لوله های سطحی، محل های اتصال در لوله های مدفون نیز به علت تاثیرات ناشی از جابجایی، نشست یا لغزش خاک و روانگرایی از آسیب پذیری بالایی برخوردارند. استفاده از اتصالات انعطاف پذیر در لوله های مدفون نیز باعث کاهش احتمال آسیب دیدگی لوله ها در زمان زلزله می گردد. در شکل ۷ نحوه رفتار لوله دارای اتصالات انعطاف پذیر در زمان زلزله نشان داده شده است. در شکل ۸ نیز رفتار مناسب یک لوله مدفون که دارای اتصالات انعطاف پذیر است در زمان زلزله کوبه ژاپن آورده شده است.



شکل ۷ نحوه عملکرد اتصالات انعطاف پذیر در برابر نشست ناشی از روانگرایی

شکل ۸ رفتار مناسب لوله با اتصالات انعطاف پذیر در زلزله کوبه

۵-۷- خرابی ناشی از روانگرایی

روانگرایی در خاک های فاقد چسبیدگی یکی از مهمترین دلایل خرابی لوله های مدفون می باشد. در لوله های سطحی نیز پایه های نگهدارنده لوله در معرض تخریب ناشی از روانگرایی می باشند. با روانگرا شدن خاک، مقاومت آن در برابر بارهای ثقلی و جانبی به شدت کاهش می یابد و لوله در معرض نشست قرار می گیرد. با افزایش شکل پذیری لوله توسط تعبیه اتصالات انعطاف پذیر، می توان از وارد آمدن آسیب به آن به علت تغییر مکان های ناشی از روانگرایی جلوگیری نمود. مشخص کردن نواحی مستعد روانگرایی و اجتناب از احداث لوله در آن مناطق یا بکارگیری تمهیدات ویژه مانند افزایش چسبندگی خاک، راه های دیگری برای اجتناب از آسیب دیدگی لوله ناشی از روانگرایی می باشند. در شکل ۹ دریچه بازدید تخریب شده به علت رونگرایی خاک نشان داده شده است.

شکل ۹ نشست دریچه بازدید به علت روانگرایی

۵-۸- خرابی تحت اثر زلزله

پارامتر متعددی در آسیب پذیری شبکه های لوله خطوط مدفون تحت زلزله دخالت دارند. به طور کلی ویژگی شبکه های خط لوله، خاک و زلزله بر رفتار لرزهای خطوط لوله موثرند لذا تعداد عوامل موثر بر رفتار لرزه های لوله ای مدفون قابل توجه می باشد. اثر زلزله بر روی خطوط لوله مدفون و خطرات لرزه در لوله یا های مدفون را میتوان به دو دسته کلی خطر انتشار امواج و خطر تغییر شکل دائمی زمین (مخاطرات ژئوتکنیکی) طبقه بندی نمود. به عنوان نمونه می توان از زلزله سانفرانسیسکو در سال ۱۹۰۶ نام برد. در این زلزله نیمی از شکستگی در لوله ها مربوط بر اثر روان گرایی خاک محل و نیمی دیگر در اثر انتشار امواج رخ داده است. بررسی های انجام شده توسط اگوچی و همکاران بر روی خرابی هایی زلزله سانفرانسیسکو مشخص نمود که اثرات خرابی ناشی از گسلش به مراتب بیشتر از اعوجاج ناشی از حرکات زمین لرزه می باشد و هر چه به گسل نزدیک باشد اثر تخریب بیشتر خواهد بود. عموما خطر مربوط به انتشار موج زلزله بیشتر و پراکنده تر می باشد؛ اما خطر مربوط به مخاطرات ژئوتکنیکی کمتر و شدیدتر می باشد. این اثر به دو صورت رخ می دهد.

ناگهانی که ممکن است به سبب حرکت یک گسل فعال یا نشست حاصل از زمین لرزه باشد. توزیع مکانی تدریجی که ممکن است در اثر زمین لغزش یا روانگرایی باشد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر اندرکنش سازه های هیدرولیکی و خاک و پی پرداخته شد. قرار گرفتن سازه های هیدرولیکی در کنار آب و سیالات موجب تغییر رفتار آن ها می شود. لذا در این تحقیق تأثیر اندرکنش مخزن بر رفتار لرزه ای سازه های هیدرولیکی مختلف و روش های گوناگون تحلیل مسائل اندرکنش سازه- سیال، به صورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به بررسی برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه اندرکنش سازه های هیدرولیکی و خاک و پی مانند دیوارهای حائل، سدهای بتنی، سدهای سنگریزه ای با روکش بتنی، سدهای خاکی و لوله های مدفون در خاک پرداخته شد. با توجه به بررسی مطالعات پیشین، می توان نتیجه گرفت که میزان نیروی هیدرودینامیک ناشی از سیال تابع محتوای فرکانسی بارگذاری و نسبت فرکانس طبیعی سد به مخزن است و لذا نمی توان برای انواع سدهای مختلف محدوده ارتفاعی خاصی را تعیین نمود که در آن به صورت قطعی به تحلیل اندرکنش سازه - سیال نیاز باشد. همچنین تاثیر خاک بر رفتار لوله های مدفون و تاثیر آن بر انواع خرابی لوله ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۷- مراجع

[۱] احمدی، م، ت. قره باغی، ب. روش نوین تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر-لاگرانژ، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۲.

[۲] طباطبایی، س، م، ت. قدس، ع. دیودل، ن. قاسم زاده، م. بررسی تاثیر سطح آب درمخزن هوایی بتنی بر پاسخ دینامیکی بدنه درشرایط مختلف لرزه ای، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، ۱۳۹۳.

[۳] کلائی، ل. کلایی،س. نوایی نیا، ب. تحلیل مخازن بتنی هوایی آب با در نظر گرفتن اندر کنش سازه و سیال اثر تحت زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران.

[4] Chopra, A.K. Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes, PROC, ASCE, 93(EM6), 1967.

[5] Seed, H.B., et al . Seismic design of concrete faced rockfill dams, Proc. of Symposium Concrete Faced Rockfill Dams- Design, Construction and Performance, 459-478,1985.

[6] Wilson, E.L. and Khalvati, M. Finite element for the dynamic analysis of fluid-solid system, International Journal of Numerical Methods in Engineering, 19(11), 1657-1668, 1983.

[7] Menezes, J.E.T. and Matos Fernandes, M. The influence of water on the seismic response of waterfront retaining walls, Computers and Structures, 44(4), 859-862, 1992.

[8] Akkose, M., Adanur, S., Bayraktar, A., Aydın and Dumanoglu, A.A. Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the Lagrangian approach, Applied Mathematical Modelling, 32 (11), 2396-2412,2008.

[9] Bayraktar, A., Sevim, B., and Altunisik, A.C. Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch damreservoir- foundation systems, Finite Elements in Analysis and Design, 47 (2), 85-97, 2011.

[10] Calayar, Y., Dumanoglu, A.A., and Bayraktar, A. Earthquake analysis of gravity damreservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches, Computers and Structures, 59 (5), 877-890, 1996.

[11] Parrinello, F. and Borino, G. Lagrangian finite element modelling of dam-fluid interaction: accurate absorbing boundary conditions, Computers and Structures, 85(11-14), 932-943, 2007.

[12] Von Thun, L. and Harris, C.W. Estimation of displacements of rockfill dams to seismic shaking, Proc. ICRA GEESD. St. Louis, I, 417-423, 1981.

[13] Bayraktar, A., Haciefendioglu, K., and Muvafik, M. Asynchronous seismic analysis of concrete-faced rockfill dams including damreservoir interaction, Canadian Journal of Civil Engineering, 32 (5), 940-947, 2005.

[14] Guan, F. and Moore, I.D. New techniques for modelling reservoir-dam and foundation-dam interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16 (4), 285-293, 1997.

[15] Wang, X. and Wang, L.B. Dynamic analysis of a water-soil-pore water coupling system, Computers and Structures, 85 (11-14), 1020-1031, 2007.

[۱۶] پور شعبانی، پ. بررسی اثر زاویه گسل بر رفتار لرزه ای لوله های مدفون، پایاین نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، ۱۳۹۱.

[۱۷] خوش وطن، م. عقابی، م. تعیین پاسخ لرزه ای خطوط لوله مدفون فولادی تحت حرکت گسل امتداد لغز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد کرمانشاه، ۱۳۹۵.

[۱۸] میوه چی م. ر.، غفوری پور، ر. کریمی، ع. آسیب پذیری لرزه ای خطوط لوله مدفون تحت تاثیر تغییر شکل های دائمی زمین، اولین کنفرانس ملی مدیریت بحران، زلزله و آسیب پذیری اماکن و شریان های حیاتی، ۱۳۹۰.

[۱۹] بالو، م. نوری، غ. مطالعه تحلیلی رفتار لوله های فولادی مدفون عبوری از گسل به روش المان محدود، اولین کنفرانس بین المللی ساخت و ساز شهری در مجاورت گسلهای فعال، ۱۳۹۰.

[20] Rofooei, F.R., Hojat Jalali, H., Attari, Nader K.A., and Alavi, M. Full-Scale Laboratory Testing of Buried Pipelines Subjected to Permanent Ground Displacement Caused by Reverse Faulting. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, September 24-28, 2012,Paper No. 4381.