

ارزیابی همبستگی ریاضی بین پارامترهای شدت-انرژی زلزله و پاسخ های دینامیکی سد خاکی - مطالعه موردی: سد جامیشان

یزدان شمس ملکی^{۱*}

عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده

تا به حال رفتار لرزه ای سدهای خاکی در قالب تحلیل های زمانی و فرکانسی مورد مطالعه قرار گرفته است. در کنار این دو چارچوب، موضوعات انرژی و شدت موج لرزه ای نیز مفاهیمی بسیار تاثیرگذار هستند، که می توان رفتار لرزه ای سدهای خاکی را بر مبنای آنها نیز ارزیابی کرد. در این پژوهش، اثرات تغییرات چگالی انرژی ویژه و سنجه های شدت زلزله های ورودی همانند شدت های آریاس، مشخصه و هازنر بر مقادیر پاسخ های لرزه ای سد خاکی-سنگریزه ای جامیشان مطالعه شده است. از این رو، مدل سازی المان محدود دو بعدی سد در چارچوب منطق کرنش مسطح و روش تحلیل دینامیکی غیر-خطی تاریخچه زمانی اجرا شده است. جهت تقلیل و حذف اثرات ناخوشایند بازگشت امواج لرزه ای در مرزهای انتهایی دیواره مدل های دینامیکی، مفهوم المان نامحدود با تعریف نقطه قطب بکار برده شده است. تعداد ۹ رکورد مختلف مولفه های افقی طولی و عرضی زلزله های نزدیک-گسل با دامنه های شتاب مقیاس شده و نشده، با میزان انرژی و شدت های لرزه ای متفاوت به مدل سد اعمال شده است. مقادیر بزرگنمایی پاسخ های لرزه ای تاج سد نسبت به حرکات ورودی در بستر سنگی، در طی اعمال حرکات لرزه ای مختلف بررسی شده است. بر اساس یافته های این مطالعه، مابین پاسخ های لرزه ای تاج سد و پارامترهای انرژی و شدت حرکات لرزه ای ورودی، رابطه ای صعودی و نمایی با دقت برازش مناسب وجود دارد.

کلمات کلیدی

سد خاکی، چگالی انرژی، پارامترهای شدت زلزله، تحلیل لرزه ای، تحلیل المان محدود.

۱-مقدمه

سطح انرژی لرزه ای زلزله های مختلف، تفاوت های اساسی با یکدیگر دارند. این سطوح انرژی مختلف منجر به وقوع پاسخ های لرزه ای متفاوتی در اغلب سازه های مهندسی می شوند. از جمله مهم ترین سازه هایی که ممکن است تحت تاثیر اثرات ویرانگر تغییرات انرژی و شدت امواج لرزه ای قرار بگیرند، سدهای خاکی-سنگریزه ای هستند. خرابی سدهای خاکی در اثر زلزله، می تواند توأم با عواقب مالی و جانی جبران ناپذیری به ویژه در پایین دست سد باشد. در زمینه بررسی و مدلسازی این موضوع مهم، رویکرد عمده مقالات قبلی، بر انجام تحلیل های دینامیکی در حوزه زمان استوار بوده است. روش های گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف، در طول چند دهه اخیر برای بررسی رفتار دینامیکی سدها و شیب های خاکی ارائه شده است، که بیشتر آن ها بر اساس تجارب گسیختگی های دینامیکی واقعی وقوع یافته قبلی در سدهای خاکی، در خلال سالیان گذشته بوده است. یکی از نخستین رویکردها برای تحلیل دینامیکی سیستم های ژئوتکنیکی دو بعدی، روش تحلیل تیر برشی است، که توسط مونونوبه و همکاران^۲ [۱-۲] به مدل سدهای خاکی اعمال شده است. بازبینی جامعی توسط گزتاس^۳ [۳] روی این روش انجام شده است. رهیافت تیر برشی بر اساس این فرض است که تغییر شکل های سد در برش ساده، تنها جابه جایی های افقی ایجاد می کند. به طوری که هاتاناکا^۴ [۴] این فرض را حداقل برای شرایط شالوده های صلب، صحت سنجی کرده است. فرض مهم دیگر روش تیر برشی آن است که توزیع تنش و کرنش برشی در طول صفحات افقی، یکنواخت است. یکی از پرکاربردترین روش های تحلیلی در برآورد جابه جایی های ماندگار ناشی از گسترش جانبی، روش بلوک لغزان نیومارک است. با در نظر گرفتن این فرض که حرکت بلوک تنها زمانی رخ می دهد که ضریب اطمینان لغزش کمتر از یک گردد [۵].

* نویسنده عهده دار مکاتبات: y.shamsmaleki@kut.ac.ir

² Mononobe et al.

³ Gazetas

⁴ Hatanaka

همچنین غالب روش های تحلیل دینامیکی سدهای خاکی بر پایه دو روش اصلی تحلیل غیر-خطی^۵ و تحلیل معادل-خطی^۶ استوار هستند و این دو روش، در بیشتر تحلیل های دو بعدی یا سه بعدی بکار رفته اند. به طور کلی تحلیل های معادل-خطی برای ایجاد وابستگی بین رفتار دینامیکی مصالح از نظر سختی (کاهش مدول برشی و نسبت میرایی) به سطح کرنش های برشی ایجاد شده در آنها است. در واقع با افزایش سطح کرنش های برشی، سختی برشی دینامیکی مواد، بنابر تعریف منحنی های افت مدول برشی کاهش می یابد. تحلیل های غیر-خطی نیز به منظور برآورد رفتار واقعی و غیر-خطی خاک، به کمک توسعه مدل های عددی ایجاد شده اند [۶-۷]. کاربرد منحنی تنش-کرنش غیر-خطی هذلولوی و شیب آن در هر سطح کرنش برشی، مبنای روش عددی غیر-خطی را تشکیل می دهد. مدول برشی مماسی^۷ پارامتر سختی اصلی لحاظ شده برای مدلسازی رفتار دینامیکی محیط های خاکی، در روش غیر-خطی است. روش معادل-خطی^۸ شباهت زیادی به مدل ارتجاعی-خطی دارد. تفاوت اصلی در این است که مدول برشی G در این روش در پاسخ به کرنش های برشی محاسبه شده، در طول انجام تحلیل دینامیکی اصلاح می گردد. این روش عددی پاسخ های ساختگاه مناسبی فراهم می آورد، اما از طرفی به خوبی با رفتار تولید اضافه فشارهای آب حفره ای در محیط خاک و در زمان بارگذاری لرزه ای همبسته نمی گردد. در ادامه به تعدادی از مطالعات معتبر انجام شده در طول دو دهه اخیر، در زمینه تحلیل لرزه ای سدهای خاکی و دستاوردهای عمده آنها اشاره می شود. نمونه ای از تحقیقات عددی مدلسازی دینامیکی سدهای خاکی، مطالعه چاراتپانگون^۹ و همکاران [۸] است. به طوریکه آنها به بررسی عددی علت رخداد شکست در سد فوجینوما^{۱۰} طی رخداد زلزله ۲۰۱۱ توهوکو^{۱۱} ژاپن پرداخته اند [۸]. در مطالعه آنها تحلیل های فرکانسی و دینامیکی انجام شده و پدیده های شکست ممکن ارائه شده اند. در این تحقیق مشخص شده که ویرانی سد در اثر وقوع روانگرایی نبوده، زیرا نشانه ای از رخداد روانگرایی همانند جوشش ماسه در مصالح بدنه سد مشاهده نشده است. در حالی که دلیل اصلی تخریب سد، مدت زمان طولانی ۳۰۰ ثانیه ای وقوع زلزله بوده است [۸]. همچنین فنگ و همکاران^{۱۲} به بررسی پاسخ دینامیکی سد خاکی لیوتان^{۱۳} در تایوان به کمک تحلیل دینامیکی دو بعدی در برنامه *FLAC* پرداخته اند [۹]. تحلیل تابع انتقال و تبدیل هیلبرت-هوانگ^{۱۴} برای مقایسه نتایج و درک مشخصه های پاسخ لرزه ای سد بکار گرفته شده است. در مقاله گزتاس و داکولاس^{۱۵} تحلیل لرزه ای و دینامیکی سدهای خاکریز با لحاظ اثر شکل دره احداث سد انجام شده است [۱۰]. نتایج مطالعه آنها منجر به ارائه نمودارها و روابطی جهت محاسبه پیوند طبیعی نوسان سدهای خاکی با شکل های دره سد مختلف شد. مطابق مطالعه روش های بکاربرده شده، برخی از مطالعات از تحلیل های دینامیکی غیر-خطی، تعدادی دیگر از تحلیل دینامیکی معادل-خطی و شماری نیز از هر دوی این روش ها استفاده کرده اند [۶-۱۰].

ژائو و همکاران^{۱۶} به بررسی اثر اعضای نفوذ ناپذیر و رسوب کف مخزن بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکریز پرداخته اند [۱۱]. نتایج عددی تحقیق آنها نشان می دهد که رسوب کف مخزن سد اثر قابل توجهی روی ضرایب بزرگنمایی^{۱۷} سدهای خاکریز در حالت انتشار موج فشاری P دارد، اما اثر کمی روی این ضرایب، در حالت انتشار عمودی موج برشی قائم SV دارد. در مطالعه جو^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] اندازه گیری سرعت موج برشی (سختی) هسته سد سنگریزه ای به روش غیرمخرب تحلیل موج-سطحی و ارائه معادلات تجربی انجام شده است. در مطالعه آنها از المان های نامحدود در مرزهای مدل دینامیکی سد استفاده شده است [۱۲]. همچنین ژانگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۹) [۱۳] اثرات بزرگنمایی پاسخ لرزه ای سد واقع در دره نیمه-استوانه ای را تحت تاثیر انتشار امواج برشی افقی SH به روش

⁵ Non-linear analysis: NLA

⁶ Equivalent-linear analysis

⁷ Tangent shear modulus

⁸ Equivalent-Linear Method: ELM

⁹ Charatpangoon et al.

¹⁰ Fujinuma

¹¹ Tohoku

¹² Feng et al.

¹³ Liyutan

¹⁴ Hilbert-Huang transform (HHT)

¹⁵ Gazetas and Dakoulas

¹⁶ Zhao et al.

¹⁷ Amplification

¹⁸ Joh et al.

¹⁹ Zhang et al.

تحلیلی بررسی کرده اند. در نتایج آنها نمودارهای مختلف ضرایب بزرگنمایی AF دامنه جابه جایی در طول تاج سد، به روش تحلیلی و حل معادلات انتشار امواج ارائه شده است. علاوه بر آن، بیلوتا^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۰) [۱۴] اثر غیرهمزمانی حرکات لرزه ای در نقاط مختلف مدل سد خاکی بر شتاب معادل سدها را به روش پیش بینی های نظری برای دو سد در مکزیک و ایتالیا ارزیابی کرده اند. به طوری که در بیشتر موارد، مقادیر ضرایب لرزه ای معادل افقی $K_{h(t)}$ از شتاب بیشینه در بستر سد a_{max} فراتر نمی روند.

در پژوهش مرتضوی زنجانی و همکاران (۲۰۱۶) [۱۵] مدل های اجزای محدود دو بعدی برای بررسی اثرات انتشار گسیختگی گسل در بستر سدهای خاکی، تحت اثر نشت حالت ماندگار ایجاد شده است. در مطالعه آنها، زاویه های گسل از ۳۰ تا ۹۰ درجه نسبت به راستای افقی، متغیر شبیه سازی شده است. در تحقیقی دیگر، پلکانوس^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۶) [۱۶] جنبه های اندرکنش لرزه ای سد-مخزن را با ارائه نمودارهای مختلف ضرایب بزرگنمایی شتاب پاسخ ارائه کرده اند. به همین منظور، نمودارهای بزرگنمایی پاسخ شتاب در تاج سد ترسیم شده اند. در مقاله وو^{۲۲} و همکاران (۲۰۲۱) [۱۷] عملکرد لرزه ای سدهای خاکی با اعمال حرکات لرزه ای پالس-گونه، در مدل اجزای محدود دو بعدی در برنامه OpenSees با برآورد مقادیر نشست های تاج سد، تا آستانه ۳ متر محاسبه شده است.

در حال حاضر، مطالعات ارزشمندی در جنبه های گوناگون تحلیل لرزه ای سدهای خاکی انجام شده است. برای مثال، مطالعه اثرات بارگذاری دینامیکی بر گسیختگی سدهای خاکی-سنگریزه ای بلند [۱۸-۱۹]، ارزیابی لرزه ای سدهای کوتاه به کمک روش های آزمایشگاهی همانند مدل سازی سانتریفیوژ ژئوتکنیکی [۲۰-۲۲]، اثرات مصالح و اجزای نوین افزوده همانند دیوارهای ضد-نشست پلیمری [۲۳]، زهکش های داخلی ژئوکامپوزیت [۲۴] به بخش های مختلف بدنه سد خاکی بر رفتار لرزه ای آن، تاثیر زلزله های بزرگ و شکست گسل معکوس بر گسیختگی و پاسخ لرزه ای غیر-خطی سدهای خاکی [۲۵-۲۷]، اثرات لرزه ای شامل روانگرایی دینامیکی مصالح در پی سد خاکی [۲۸-۲۹]، بررسی تغییرات مکانی در خصوصیات خاک [۳۰]، تغییرات هندسی سد [۳۱]، مطالعه امواج سطحی در محل سد [۳۲] و اثر آنها بر پاسخ دینامیکی سد خاکی، همگی از عناوین مهم مطالعات معتبر انجام شده مرتبط با موضوع این مقاله، در چند سال اخیر بوده اند. علاوه بر این در تحقیقی مشابه موضوع مقاله حاضر، ارزیابی تاثیر سنجه شدت^{۲۳} حرکت زمین بهینه در پیش بینی آسیب پذیری لرزه ای سدهای خاکی، توسط رجینا و همکاران^{۲۴} [۳۳] ارائه شده است. در مطالعه آنها آسیب پذیری لرزه ای دو سد با استفاده از توابع شکنندگی تحلیلی، برای مکانیسم های آسیب مختلف و سنجه های شدت حرکت زمین (IMs) بر اساس تحلیل خطر زلزله احتمالاتی محاسبه شده است.

به هر حال، مطابق مطالعات جامع انجام شده در مقاله حاضر، معیارهای اصلی بررسی اغلب شبیه سازی های دینامیکی سدهای خاکی-سنگریزه ای، دو معیار عمده مشخصه های زمانی و فرکانسی رکوردهای زلزله بوده و اثرات ناشی از معیارهای انرژی حرکات لرزه ای ورودی و شدت آنها، کمتر پژوهش شده است. لذا در این مطالعه، مشخصه های بارهای لرزه ای از دیدگاه محتوای انرژی ورودی-شدت و اثرات آنها بر پاسخ لرزه ای سد خاکی مورد تحقیق قرار گرفته است. بررسی اثرات مستقیم و جنبی پارامترهای انرژی-شدت موج لرزه ای ورودی بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکی، می تواند همراه با نتایج بسیار مفید و راهگشا باشد. بنابراین به عنوان یک هدف مهم در مطالعه حاضر، به کمک نتایج حاصل از تحلیل های اجزای محدود دو بعدی غیر-خطی، روابط ریاضی مابین پارامترهای انرژی و شدت زلزله ورودی و پاسخ های لرزه ای سد خاکی-سنگریزه ای تعریف شده است.

۲- مدل های عددی المان محدود سد

هدف اساسی این مطالعه بررسی اثرات پارامترهای مرتبط با سطح انرژی و شدت بارگذاری زلزله ورودی بر پاسخ های لرزه ای سدهای خاکی-سنگریزه ای است. بر این اساس، شار انرژی یک زلزله در چارچوب تعاریف نظری برابر انرژی جنبشی نهفته در کل طول بازه زمانی وقوع یک زلزله است. در این مقاله تحلیل های اجزای محدود دو بعدی در برنامه نرم افزاری *Quake/w* [۳۴] مبنای انجام شبیه سازی

²⁰ Bilotta et al.

²¹ Pelecanos et al.

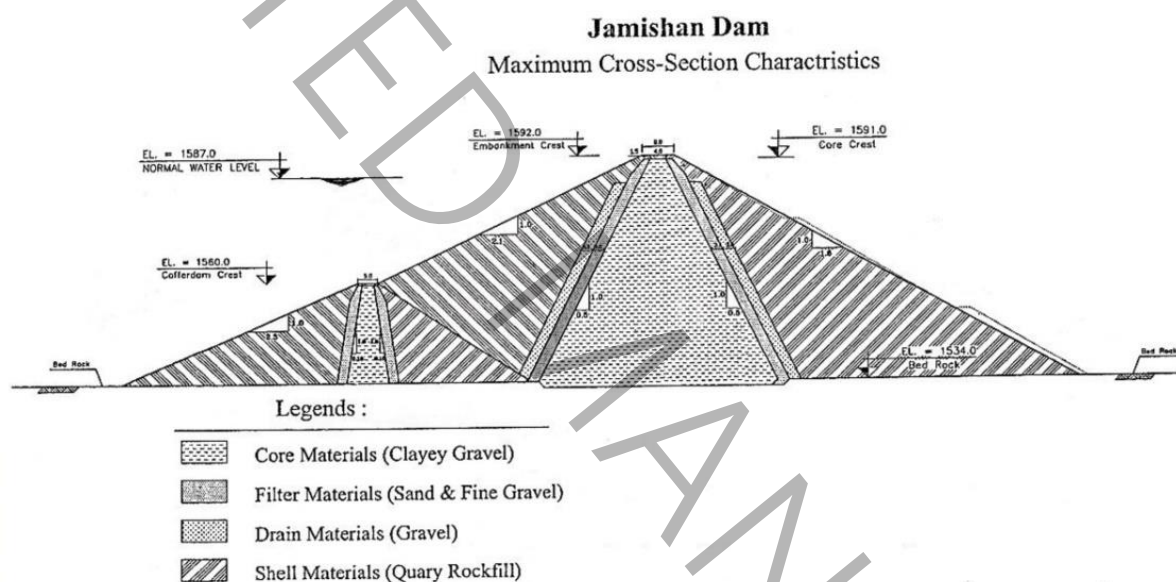
²² Wu et al.

²³ Intensity Measures: IMs

²⁴ Regina et al.

های عددی موضوع تحقیق هستند. مدل دو بعدی کرنش مسطح سد خاکی-سنگریزه ای جامیشان [۳۵]، با توجه به نسبت هندسی مابین ارتفاع تاج و طول سد (بین دو تکیه گاه جانبی دره U شکل)، در مراحل محاسبات عددی پژوهش حاضر منظور شده است. شرایط مرزی مدل عددی سد در مراحل بارگذاری گرانشی (پیش تحلیل استاتیکی اولیه) و نیز بارگذاری لرزه ای، کاملاً متفاوت از یکدیگر تعریف شده است، به طوری که در مرحله نخست از مرزهای غلتکی در کناره ها و مرزهای گیردار در کف مدل استفاده شده است. اما در مرحله بارگذاری دینامیکی، به منظور عبور موفق امواج لرزه ای با حدود فرکانسی مختلف، ضمن استفاده از مش بندی المان محدود با ابعاد بسیار ریز (شکل ۲) شرایط مرزی المان نامحدود و قطب [۳۴] در دیواره های مدل عددی تعریف شده است.

برای انجام مطالعات پارامتری این مقاله در قالب یک نمونه واقعی و کاربرد مطالعه موردی، پاسخ لرزه ای مقطع عرضی بیشینه سد خاکی-سنگریزه ای جامیشان در استان کرمانشاه (شهرستان سنقر و کلیایی)، ارائه شده توسط شرکت مهندسی مشاور آبدان فراز [۳۵]، در مرحله مطالعات تکمیلی آن مورد استفاده قرار گرفته است. این سد، بر اساس مقطع عرضی انتخاب شده، مطابق شکل ۱، دارای ارتفاع ۵۸ متر از سنگ بستر تا تراز ارتفاعی تاج است. تراز عادی آب^{۲۵} دریاچه سد از سطح دریای آزاد ۱۵۸۷ متر و تراز خاکریز در تاج ۱۵۹۲ متر است. همچنین پارامتر مهم ارتفاع آزاد^{۲۶} برای این سد معادل ۵ متر منظور شده است [۳۵].



شکل ۱: ابعاد هندسی و مقطع عرضی بیشینه تیب سد خاکی-سنگریزه ای مخزنی جامیشان [۳۵].

Figure 1: Geometric dimensions and the typical maximum cross-section of Jamishan reservoir earth-rockfill dam [35].

۲-۱- معرفی روش عددی مدل سازی

در این مقاله به منظور مدل سازی نرم افزاری بدنه و پی سد سنگریزه ای جامیشان و بررسی پاسخ های دینامیکی آن در قبال بارگذاری تاریخیچه زمانی شتاب از نرم افزار با مبنای عددی اجزای محدود دو بعدی 2D-FEA با نام تجاری *Quake/w* [۳۴]، استفاده شده است. این برنامه بخشی از گروه نرم افزاری *Geo-studio* [۳۴]، برای مدل سازی دینامیکی-لرزه ای محیط های خاکی و سنگی است. جهت مدل سازی، مراحل کار در دو گام پیوسته جداگانه انجام شده است. گام اول (مرحله پیش نیاز) مدل سازی استاتیکی مدل و برقراری تنش های برجای-استاتیکی اولیه و گام دوم مدل سازی دینامیکی سد با اعمال بارهای شتاب زلزله است. در ایجاد مدل پیش تحلیل استاتیکی جهت تعریف تنش-کرنش مصالح، پارامترهای مدل رفتاری ارتجاعی خطی-خمیری کامل "مور-کولمب" بکار گرفته شده است، به طوری که مابین مراحل مختلف ساخت و بهره برداری از سد، مجموعه پارامترهای تنش-کرنش در مرحله پایان زمان ساخت بدنه (یعنی

²⁵ Normal water level: NWL

²⁶ Free Board

شرایط تنش- کرنش کوتاه مدت)، مطابق جدول ۱، بکار رفته است. برای ایجاد مدل پیش تحلیل استاتیکی در نرم افزار *Quake/w* از ابزارهای داخلی این نرم افزار و تعریف فایل مدل اولیه از نوع *initial static* بهره برده شده است [۳۴].

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی تحلیل تنش - کرنش کوتاه مدت (پایان زمان ساخت بدنه سد) [۳۵].

Table 1: Values of geomechanical parameters of short-term stress-strain analysis (end of construction time of the dam body) [35].

ضریب فشار جانبی $K_0 = \nu / (1 - \nu)$	نسبت بواسون ν	مدول ارتجاعی $E (MPa)$	پارامترهای مقاومت برشی		چگالی γ (kN/m^3)	پارامترهای المان های بدنه سد
			ϕ (deg)	C (kPa)		
۰/۸۲	۰/۴۵	۲۴	۱۲	۱۰۰	۲۱/۵	هسته قائم مرکزی
۰/۶۱	۰/۳۸	۴۰	۳۴	۰	۲۱/۰	فیلتر
۰/۵۴	۰/۳۵	۵۰	۳۶	۰	۲۲/۰	زهکش
۰/۴۳	۰/۳۰	۷۵	۴۰	۰	۲۳/۰	پوسته سنگریز
۰/۳۹	۰/۲۸	۲۰۰۰	۳۰	۵۰۰	۲۵/۵	سنگ بستر (تا ۲۰ متری)
۰/۳۵	۰/۲۶	۲۵۰۰	۳۰	۱۰۰۰	۲۶/۰	سنگ بستر (پس از ۲۰ متری)

۳- معرفی بارگذاری های زلزله

برای انجام تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب در این مطالعه از تاریخچه زمانی واقعی ثبت شده زلزله های داخل کشور و خارجی که دارای دو مولفه در صفحه افقی انتقالی طولی و عرضی است، استفاده شده است و در مجموع ۹ شتابنگاشت مجزا بکار گرفته شده است. هر یک از شتاب نگاشت ها به قسمت انتهایی سنگ بستر مدل عددی دو بعدی ایجاد شده در نرم افزار اجزای محدود *Quake/w* [۳۴] مربوط به سد جامیشان [۳۵] اعمال شده و پاسخ های لرزه ای کلیدی نقاط مهم بدنه و پی سد، بر اساس برون داد بارگذاری آن ها استخراج شده اند. ویژگی های اصلی سه گانه زمانی-فرکانسی-چگالی انرژی این شتاب نگاشت ها، در ادامه مقاله ارائه شده است. جهت اعمال رکوردهای زلزله به کف سنگ بستر مدل عددی، از مقیاس کردن مولفه های مختلف رکوردها مطابق تاریخچه لرزه ای ساختگاه سد استفاده شده است و بر این مبنا، شتاب اولیه یا خام رکورد زلزله ها (۴ رکورد زلزله نزدیک-گسل) با ضرب در عدد ۰/۳۵ برابر شتاب ثقل (0.35g) مقیاس شده اند. این مقیاس با توجه به بیشینه شتاب در شتابنگاشت های انتخاب شده بر حسب تحلیل های پاسخ ساختگاه انجام شده توسط مهندسی مشاور طراح پروژه منظور گردیده است [۳۵].

همچنین جهت ایجاد تنوع زمانی-فرکانسی در بارگذاری های دینامیکی، علاوه بر چهار رکورد مقیاس شده، از تعداد ۵ رکورد مقیاس نشده هم استفاده شده است. بر این مبنا گستردگی محدوده شتاب اعمالی در دسترس از ۱/۶۷ تا ۷/۱۱ متر بر مجذورثانیه (بازه با تفاوت ۴ برابری مقادیر)، چگالی انرژی ویژه از ۰/۰۰۵ تا ۲ مترمربع بر ثانیه (تفاوت ۴۰۰ برابری)، شدت آریاس از ۰/۳۳ تا ۶/۹۷ متر بر ثانیه (تفاوت ۲۱ برابری)، شدت مشخصه از ۰/۴۱۶ تا ۶/۴۳۶ (اختلاف ۱۵/۵۰ برابری) و شدت هازنر از ۰/۲۲۹ تا ۲/۰۹۸ متر (تمایز ۹ برابری) لحاظ شده است. این تفاوت معنادار در مقادیر کمی رکوردها باعث می شود که روابط ریاضی برازش داده شده بر نتایج و پاسخ های لرزه ای حاصل از اعمال این زلزله ها، از دقت قابل قبولی برخوردار باشند. افزون بر این، به منظور افزایش جامعیت بارگذاری های لرزه ای، نوع و سازوکار رخداد و گسلش زلزله ها و موقعیت مکانی آنها نیز کاملاً متفاوت از یکدیگر انتخاب شده است.

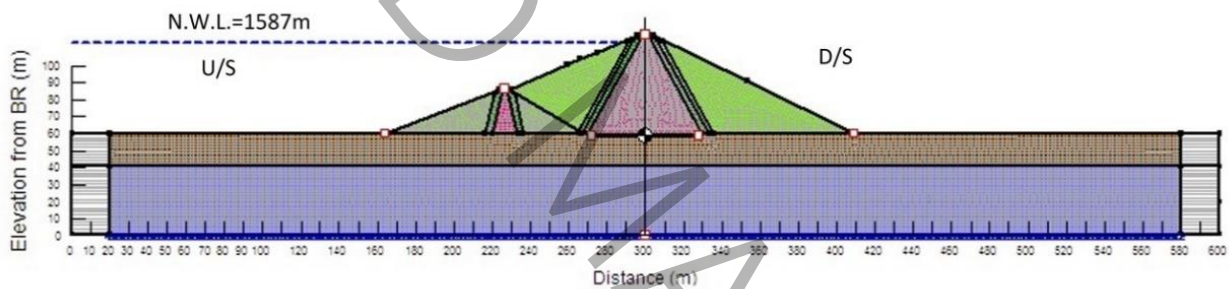
در این مطالعه از روش اعمال تاریخچه زمانی شتاب به مرز انتهایی در بستر مدل عددی، جهت تعریف بارگذاری لرزه ای استفاده شده است. گام های کلیدی قبل از بارگذاری مدل های عددی با رکورد زلزله، همانند مقیاس سازی دامنه شتاب زلزله ورودی و اصلاح خط پایه رکوردها^{۲۷} بکار برده شده است. مقیاس سازی شتاب ورودی بر حسب ضرب تمامی دامنه های شتاب زلزله در ضرایبی از شتاب ثقل زمین g که مقدار آن معادل $9/81 \text{ m/s}^2$ است، انجام می شود. این اصلاحات اولیه روی رکورد زلزله ها از آن جهت مفید است که به طور کلی، پاسخ حرکات لرزه ای ورودی در محیط های سنگی و آبرفتی (لایه های خاکی) کاملاً متفاوت از یکدیگر است [۳۶-۳۷].

²⁷ Base-line correction

همچنین در کلیه تحلیل ها، کمینه نسبت میرایی مصالح زمینی (خاکی و سنگی) بر اساس میرایی تابع فرکانس رایلی معادل ۰.۵ منظور شده است.

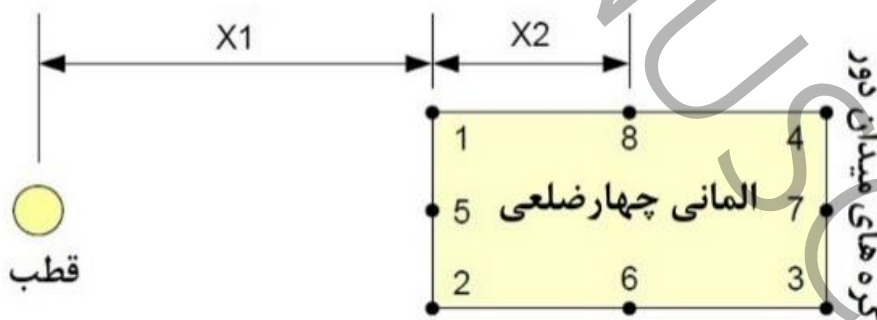
۳-۱- بررسی جزئیات مدل های عددی و بارگذاری های لرزه ای ورودی

در پیش رو و در شکل ۲ مدل المان محدود دو بعدی کرنش مستوی (مسطح) سد جامشان [۳۵]، به همراه مرزهای جانبی المان نامحدود آن، در مدل های تحلیل دینامیکی، نشان داده شده است. در این مطالعه، جهت تعریف شرایط مرزی دینامیکی جوانب مدل عددی، از روش المان های (اجزای) نامحدود^{۲۸} و تعریف نقطه قطب^{۲۹} بهره برده شده است [۳۴]. در این مدل برای شبیه سازی دقیق شرایط مرزی دینامیکی کناره های مدل عددی، از اجزای نامحدود (نواحی سفید رنگ جوانب مدل) و قطب (دایره سیاه و سفید در کف هسته مدل سد) مطابق شکل ۲ استفاده شده است. کاربرد اجزای نامحدود، شبیه سازی فواصل دور و بسیار دور مجازی جهت کاهش اثرات مرزی امواج لرزه ای در مدل عددی، بدون تولید مش بندی اجزای محدود اضافی است. مطابق شکل ۲ از مش بندی المان محدود بسیار ریز (ابعاد تقریبی کمتر از ۲ متر) به تعداد ۱۱۳۵۰ المان استفاده شده است. انتخاب ابعاد مش بسیار ریز، جهت تسهیل هر چه بهتر عبور امواج لرزه ای (دارای طول موج های گوناگون) با فرکانس های مختلف، از درون مدل عددی است. در این مطالعه از المان های دو بعدی چهارضلعی ۸ گره ای برای گسسته سازی محیط بدنه و پی سد استفاده شده است. در شکل ۳ نمونه نمایش تصویری تعریف قطب و اجزای نامحدود نسبت به سه گره از المان مستطیلی ۸ گره ای ارائه شده است.



شکل ۲: محل نقاط تاریخچه زمانی در تاج و سنگ بستر و المان های نامحدود در مرزهای جانبی.

Figure 2: Location of time history points in crest and bedrock and infinite elements in lateral boundaries.



شکل ۳: تعریف مفهوم قطب نسبت به سه گره از یک المان مستطیلی در مرزهای کناری مدل عددی [۳۴].

Figure 3: Definition of the concept of pole in relation to three nodes of a rectangular element in the lateral boundaries of the numerical model [34].

²⁸ Infinite element

²⁹ Pole-definition

جدول ۲: مشخصات اصلی پارامترهای لرزه ای مرتبط با انرژی و شدت رکوردهای نزدیک-گسل مقیاس شده و نشده [۳۸].

Table 2: The main characteristics of the seismic parameters related to the energy and intensity of scaled and unscaled near-fault records [38].

ردیف	رکوردهای زلزله مقیاس شده و نشده	سال وقوع، محل وقوع	شتاب زمین پیشینه ^{۳۰} PGA (m/s ²)	چگالی انرژی ویژه ^{۳۱}	شدت آریاس ^{۳۲} I _A (m/s)	شدت مشخصه ^{۳۳} I _C (-)	شدت هازنر ^{۳۴} I _H (m)	سازوکار امتداد گسلش
رکوردهای مقیاس شده (مقیاس 0.35g)								
۱	طیس LN	ایران، ۱۹۷۸	۳/۴۳۴	۰/۲۴۹	۲/۰۲۴	۲/۸۰۰	۱/۳۵۸	معکوس
۲	طیس TR	ایران، ۱۹۷۸	۳/۴۳۴	۰/۵۷۵	۱/۹۴۵	۲/۷۱۸	۱/۳۰۸	معکوس
۳	امپریال ولی ^{۳۵} LN	آمریکا، ۱۹۴۰	۳/۴۳۴	۰/۵۲۴	۳/۱۶۵	۳/۷۳۴	۱/۸۱۹	امتداد لغز
۴	امپریال ولی TR	آمریکا، ۱۹۴۰	۳/۴۳۴	۰/۱۹۹	۲/۱۳۳	۲/۷۷۲	۱/۴۴۳	امتداد لغز
رکوردهای مقیاس نشده								
۵	لندرز ^{۳۶}	آمریکا، ۱۹۹۲	۷/۱۱۴	۲/۰۰۸	۶/۹۷۲	۶/۴۳۶	۲/۰۹۸	امتداد لغز
۶	کورینس ^{۳۷}	یونان، ۱۹۸۱	۲/۳۲۳	۰/۰۸۵	۰/۶۹۲	۱/۱۸۲	۰/۹۶۲	نرمال مایل
۷	جیاشی ^{۳۸}	چین، ۱۹۹۷	۲/۶۸۴	۰/۰۰۵	۰/۴۹۱	۰/۸۹۵	۰/۲۲۹	نرمال
۸	کالاماتا ^{۳۹}	یونان، ۱۹۸۶	۲/۶۷۲	۰/۰۴۵	۰/۷۳۳	۱/۳۴۴	۰/۸۷۸	نرمال
۹	نیگاتا ^{۴۰}	ژاپن، ۱۹۶۴	۱/۶۷۱	۰/۰۲۲	۰/۳۳۲	۰/۴۱۶	۰/۴۶۲	معکوس

۳-۲- معرفی پارامترهای شدت و انرژی زلزله های ورودی

در این بخش روابط ریاضی تعریف پارامترهای مختلف معرف شدت یک زلزله، همانند شدت های آریاس [۳۹]، مشخصه [۴۰] و هازنر [۴۱] و نیز انرژی (چگالی انرژی ویژه) [۴۲-۴۴] آن تعریف شده است. از این رو، روابط ریاضی جهت محاسبه شدت های گفته شده و چگالی انرژی لرزه ای یک رکورد زلزله دلخواه، بر اساس معادلات ذیل بیان می شود:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{\max}} [a(t)]^2 dt \quad (۱) \text{ شدت آریاس}$$

$$I_C = (RMS_a)^{1.5} \sqrt{t_{\max}} \quad (۲) \text{ شدت مشخصه}$$

$$RMS_a = \left(\frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} [a(t)]^2 dt \right)^{0.5} \quad (۳) \text{ جذر میانگین مربع شتاب}$$

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi = 0.05, T) dT \quad (۴) \text{ شدت هازنر}$$

$$SED = \int_0^{t_{\max}} |v(t)|^2 dt \quad (۵) \text{ چگالی انرژی ویژه}$$

³⁰ Peak ground acceleration: PGA

³¹ Specific energy density: SED

³² Arias intensity: I_A

³³ Characteristic intensity: I_C

³⁴ Housner intensity: I_H

³⁵ Imperial valley

³⁶ Landers

³⁷ Corinth

³⁸ Jiashi

³⁹ Kalamata

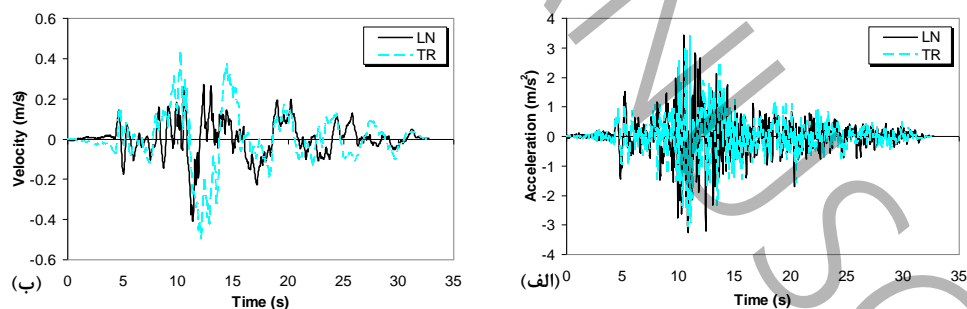
⁴⁰ Niigata

که در روابط فوق I_A شدت آریاس بر حسب یکای m/s ، I_C شدت مشخصه (بدون بعد)، I_H شدت هازنر بر حسب متر، π ضریب ثابت پی و معادل $3/14$ ، g شتاب گرانش و برابر $9/81 m/s^2$ ، t_{max} کل زمان تداوم^{۴۱} یا رخداد یک زلزله بر حسب ثانیه، $a(t)$ دامنه تاریخچه زمانی رکورد شتاب زلزله بر حسب m/s^2 یا g ، RMS_a جذر (ریشه دوم) میانگین مربعات شتاب زلزله، که طبق رابطه (۳) محاسبه می شود (بر حسب m/s^2)، PSV سرعت شبه-طیفی^{۴۲}، T پریود بر حسب ثانیه، SED چگالی انرژی ویژه بر حسب m^2/s ، $v(t)$ دامنه زمانی رکورد سرعت یک زلزله، ξ نسبت میرایی مصالح و معادل 5% و t زمان بر حسب ثانیه است. شدت آریاس (I_A) سنجی جهت اندازه گیری قدرت حرکت زمین است. این سنجی، شدت لرزش زمین را با اندازه گیری شتاب امواج لرزه ای گذرا تعیین می کند.

در تفسیر بیشتر علت کاربرد این شدت ها بایستی خاطر نشان کرد که شدت آریاس پارامتری نسبتاً قابل اعتماد برای توصیف حرکت لرزه ای لازم برای ایجاد زمین لغزش است [۳۹]. همچنین شدت مشخصه (I_C) معیار شدتی است که به طور همزمان وابسته به شتاب (عامل زمانی) و فرکانس یک بارگذاری لرزه ای است [۴۰]. از سویی شدت هازنر (I_H) نیز معیاری از شدت سطحی حرکت زمین در هنگام وقوع زلزله است، که متناسب با بیشینه تنش های تولید شده در سازه ها (از جمله سازه سد خاکی) است [۴۱].

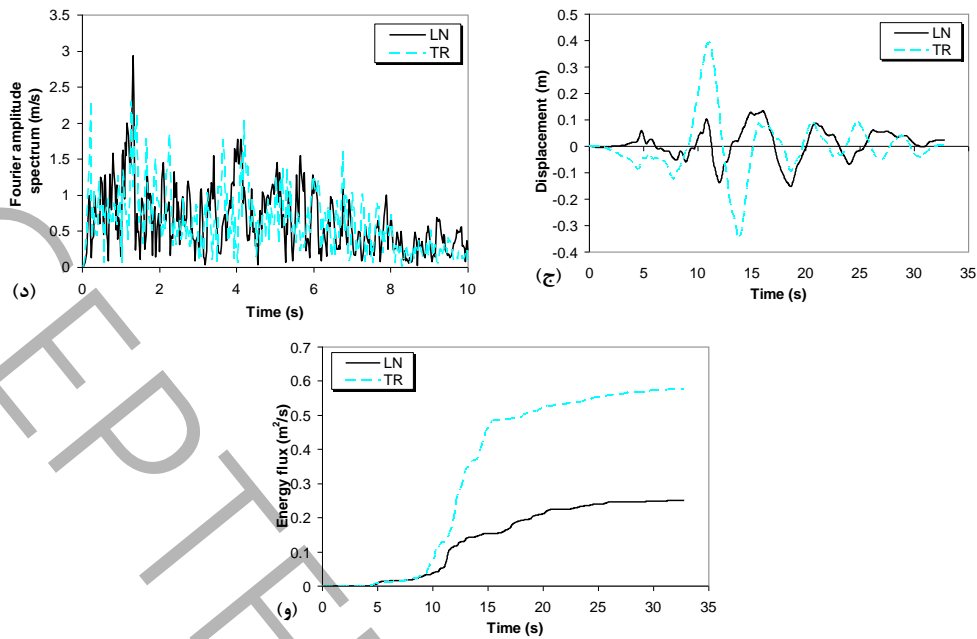
بر اساس روابط بالا، شار (آهنگ زمانی) توزیع انرژی یک رکورد زلزله دلخواه برابر سطح زیر نمودار قدرمطلق توان دوم تاریخچه زمانی رکورد سرعت همان زلزله در تمام طول بازه زمانی وقوع زلزله یعنی t_{max} است. بر این مبنا، شار انرژی یک زلزله مبین انرژی جنبشی موجود در رکورد آن زلزله در طول زمان وقوع آن است [۴۲-۴۴]. شکل ۴ توزیع زمانی و فرکانسی رکورد انتخابی زلزله طبس را نمایش می دهد. در ادامه شکل ۴-الف نمودار تاریخچه زمانی رکورد شتاب مولفه های طولی LN و عرضی TR این زلزله، به عنوان بارگذاری ورودی را نشان می دهد. بر حسب این شکل، مقیاس سازی دامنه شتاب بر مبنای مطالعات لرزه خیزی ساختگاه سد توسط شرکت مهندسی مشاور سد جامیشان معادل ضریب $0/35$ شتاب گرانش زمین، انجام شده است. شکل ۴-ب تاریخچه نگاشت زمانی سرعت مولفه های طولی و عرضی این زلزله و شکل ۴-ج تاریخچه زمانی جابه جایی افقی مولفه های افقی آن را ارائه می کند و سرانجام شکل ۴-د طیف فوریه جهت تعیین توزیع فرکانسی و فرکانس غالب مولفه های طولی و عرضی زلزله طبس را ارائه می کند. بر این مبنا، مطابق شکل های ۴-ب و ۴-ج در هر دوی رکوردهای سرعت و جابه جایی این زلزله، یک پالس نزدیک-گسل کاملاً واضح در بازه زمانی بین ۱۰ تا ۲۰ ثانیه میانی نمودارهای زمانی این زلزله دیده می شود.

در انتها، شکل ۴-و تاریخچه زمانی شار انرژی مولفه های افقی طولی و عرضی زلزله طبس را ارائه می کند. مطابق مقایسه و همسنجی این دو نمودار، شار انرژی لرزه ای مولفه عرضی زلزله بیش از دو برابر بزرگ تر از شار مولفه طولی آن است. علت اصلی وقوع این موضوع نیز وجود اثرات پالس گونه نزدیک-گسل در مولفه افقی عرضی این زلزله نسبت به مولفه طولی آن است.



⁴¹ Duration

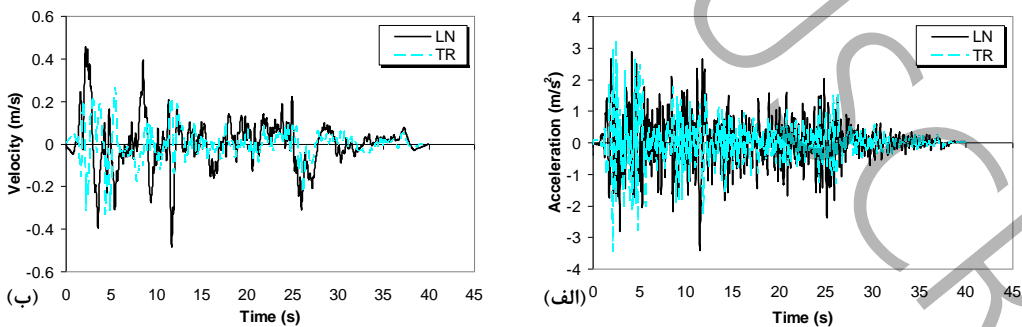
⁴² Pseudo-spectral velocity: PSV

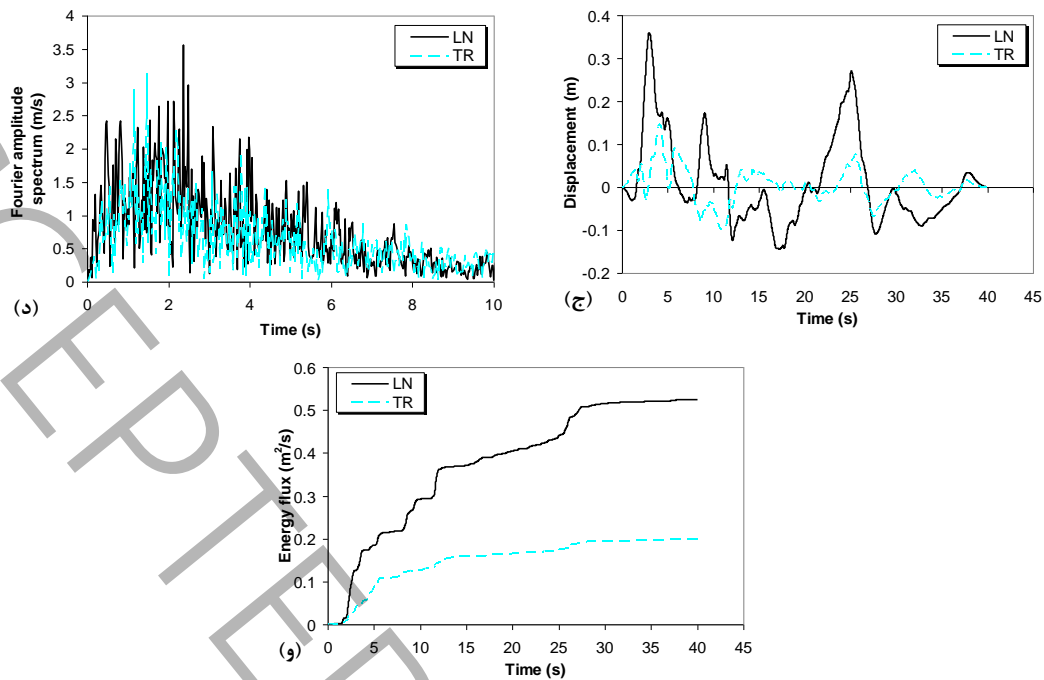


شکل ۴: تاریخچه زمانی: (الف) شتاب، (ب) سرعت، (ج) جابه جایی، (د) طیف فوریه و (و) شار انرژی مولفه طولی LN و عرضی TR زلزله طبس [۳۸].

Figure 4: Time history of: (a) acceleration, (b) velocity, (c) displacement, (d) Fourier spectrum and (f) energy flux of longitudinal, LN, and transverse, TR, component of Tabas earthquake [38].

در شکل ۵ تاریخچه های زمانی و فرکانسی مولفه های طولی و عرضی رکورد زلزله امپریال ولی ارائه شده است. به طوری که در شکل ۵-الف تاریخچه زمانی رکورد شتاب مولفه های طولی LN و عرضی TR زلزله امپریال ولی، شکل ۵-ب تاریخچه زمانی سرعت این مولفه ها، شکل ۵-ج تاریخچه زمانی جابه جایی آنها و شکل ۵-د طیف فوریه این دو مولفه به عنوان بخشی از بارگذاری ورودی مدل ها را نمایش می دهد. همچنین مطابق شکل ۵-الف بیشترین دامنه شتاب این زلزله در ۳ ثانیه نخست آن و یک مجموعه پالس سرعت نزدیک-گسل در شکل ۵-ب در لحظات اولیه آن دیده می شود. شکل ۵-و تاریخچه زمانی شار انرژی مولفه های طولی و عرضی این زلزله را بدست می دهد. بنابر مقایسه این دو نمودار در شکل ۵-و، دامنه شار انرژی لرزه ای مولفه طولی (شکل ۵-و) حدود دو برابر شار مولفه عرضی (TR) است.

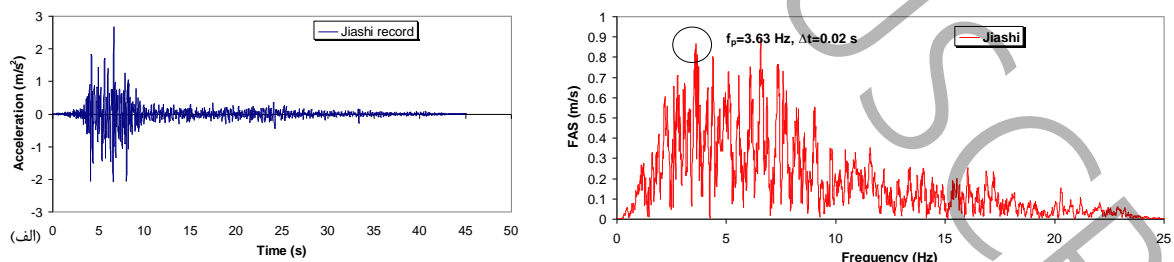




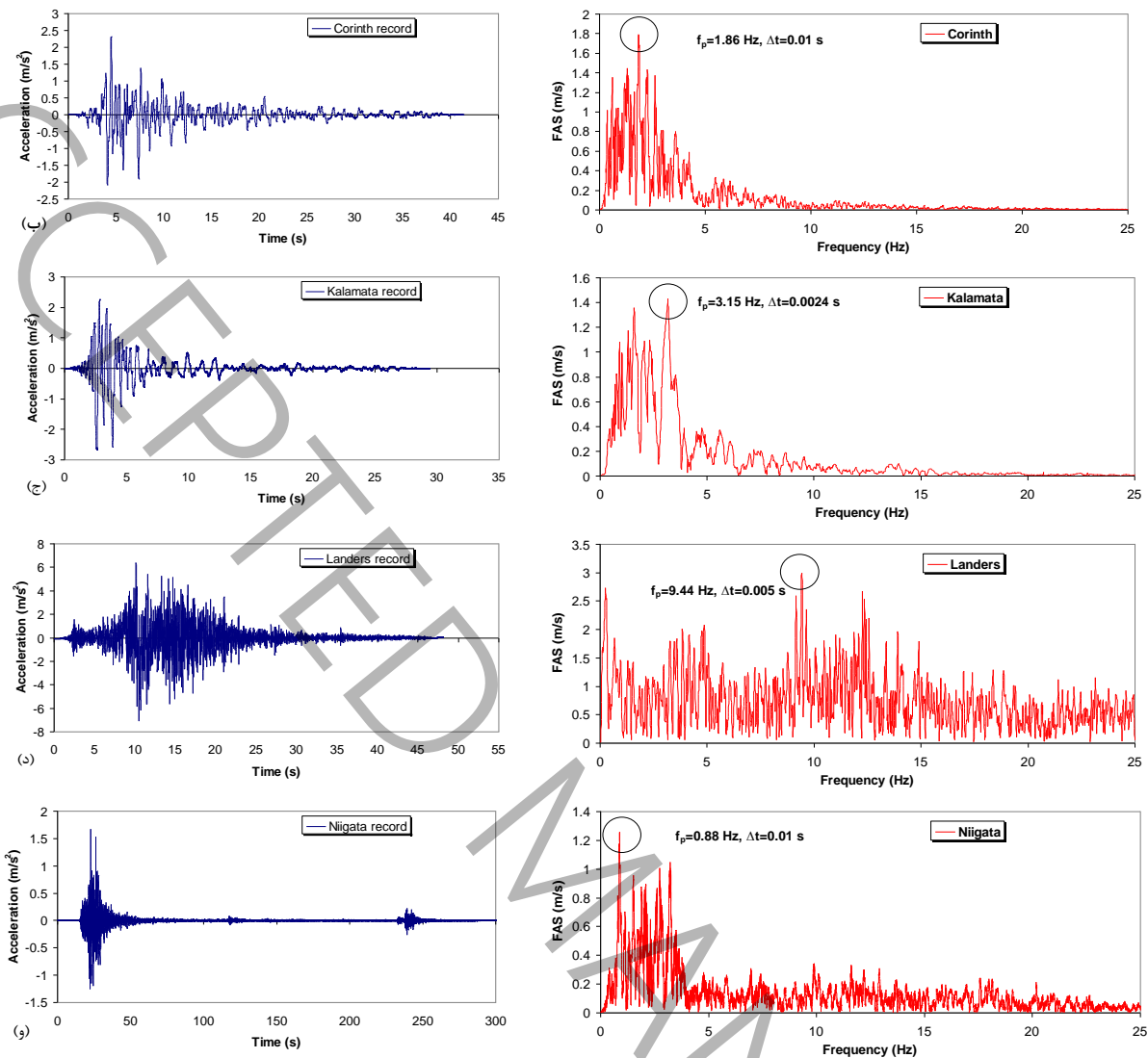
شکل ۵: تاریخچه زمانی: (الف) شتاب، (ب) سرعت، (ج) جابه جایی، (د) طیف فوری و (و) شار انرژی مولفه طولی LN و عرضی TR زلزله امپریال ولی [۳۸].

Figure 5: Time history of: (a) acceleration, (b) velocity, (c) displacement, (d) Fourier spectrum and (f) energy flux of longitudinal, LN, and transverse, TR, components of the Imperial Valley earthquake [38].

همچنین شکل ۶ توزیع زمانی و فرکانسی دیگر رکوردهای زلزله نزدیک-گسل مقیاس نشده مورد استفاده این مطالعه را نشان می دهد. به نحوی که شکل های ۶-الف تا ۶-و دربرگیرنده نمودار تاریخچه زمانی شتاب و طیف (فرکانسی) دامنه فوریه^{۴۳} FAS مولفه های افقی زلزله های نزدیک-گسل مختلف به عنوان بارگذاری لرزه ای ورودی است. مطابق مطالب گفته شده در بخش های قبلی، خاطر نشان می گردد که دامنه شتاب این پنج زلزله مختلف، مقیاس نشده است و همان شتاب های واقعی بکار برده شده اند. همچنین در شکل های سمت راست، مقادیر فرکانس غالب f_p هر یک از رکوردها و نمو زمانی Δt ثبت داده های شتاب توسط شتاب نگار (وارون بیشینه حدود دامنه فرکانسی قابل حصول در طیف فوریه) در محل ایستگاه های ثبت زلزله ها داده شده است، که به طور مستقیم نمایانگر شفافیت فرکانسی قابل دستیابی در طیف های فوریه هر یک از آنها است.



⁴³ Fourier amplitude spectrum (FAS)



شکل ۶: نمایش تاریخچه های زمانی شتاب و طیف های فوریه (توزیع فرکانسی) بارگذاری های زلزله مقیاس نشده [۳۸].

Figure 6: Display of acceleration time histories and Fourier spectra (frequency distribution) of unscaled earthquake loadings [38].

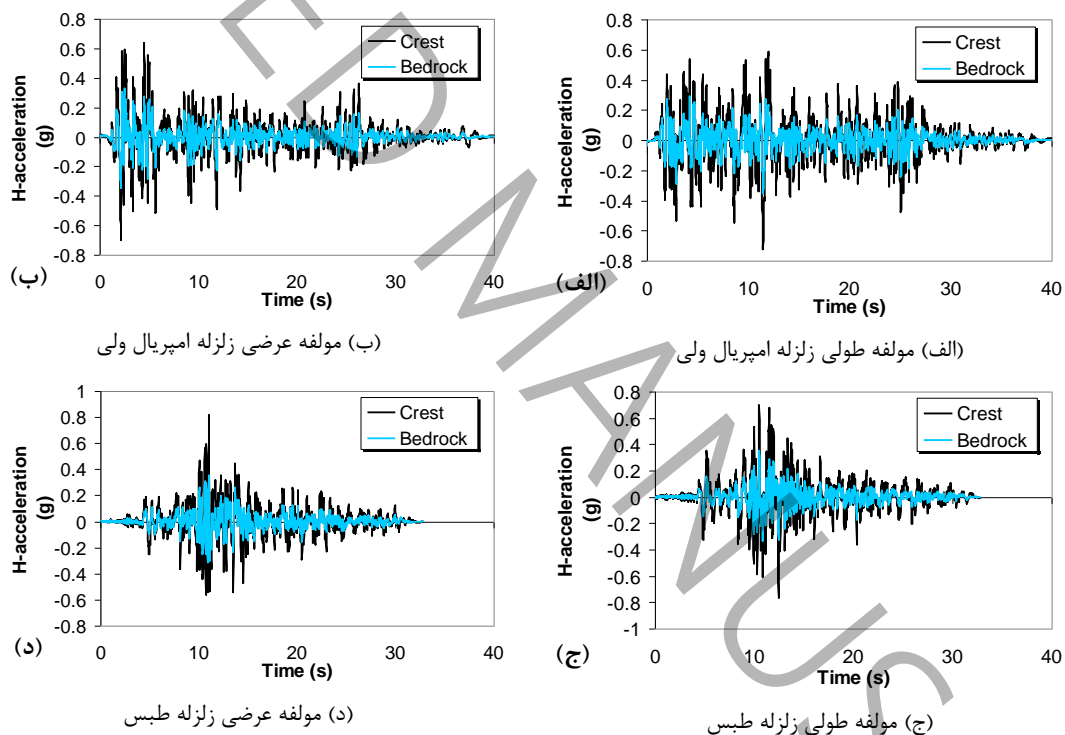
۴- بررسی پاسخ های لرزه ای سد جامیشان با تغییر چگالی انرژی و سنجه های شدت امواج ورودی

در این بخش، ارزیابی نمودارهای حاصل از تحلیل های دینامیکی غیر-خطی تاریخچه زمانی پاسخ مقطع عرضی بیشینه سد جامیشان، بر حسب اعمال رکوردهای زلزله، با چگالی های انرژی مختلف ارائه شده است. نمودارهای پاسخ زمانی تاج برای پارامترهای کلیدی از قبیل شتاب افقی، جابه جایی افقی و قائم ارائه شده است. افزون بر آن پاسخ های تاج در خصوص هر کدام از متغیرهای شتاب و جابه جایی سد با پاسخ لرزه ای بستر سنگی (حرکت ورودی) همسنجی و مقایسه شده است. شکل ۷ نمونه پاسخ شتاب افقی تاج و سنگ بستر سد را نمایش می دهد. به طوری که شکل ۷-الف مقایسه پاسخ شتاب تاج و سنگ بستر تحت بارگذاری مولفه طولی زلزله امپریال ولی را نشان می دهد. پدیده بزرگنمایی دامنه شتاب تاج سد نسبت به شتاب ورودی در سنگ بستر، در تمام مدت لرزش (۴۰ ثانیه) در این شکل کاملاً واضح و مشخص است.

در ادامه آن و در شکل ۷-ب مقایسه پاسخ شتاب تاج و سنگ بستر تحت بارگذاری مولفه عرضی زلزله امپریال ولی داده شده است. مطابق این شکل نیز، بزرگنمایی در پاسخ شتاب تاج، به خوبی دیده می شود. شکل ۷-ج مقایسه پاسخ شتاب افقی تحت بارگذاری مولفه عرضی و شکل ۷-د مقایسه این پاسخ ها برای مولفه طولی زلزله طیس را ارائه می کند. بر اساس این دو شکل، بزرگنمایی دامنه شتاب پاسخ

تاج نسبت به سنگ بستر، برای مولفه های زلزله طیس هم به طور واضحی قابل مشاهده است. مطابق شکل ۷ تفاوت عمده دو زلزله انتخابی طیس و امپریال ولی، در توزیع زمانی دامنه های شتاب آنها و نیز شکل گستردگی (توزیع) زمانی دامنه های شتاب (بیشینه) آنها است. بر این اساس، رخداد شتاب بیشینه رکورد زلزله طیس در بازه زمانی مترامی در حدود ۵ ثانیه اتفاق افتاده، حال آنکه این مقدار برای زلزله امپریال ولی به ویژه برای مولفه طولی مابین ۱۰ تا ۱۵ ثانیه ادامه داشته است.

در واقع رکوردهای زلزله طیس در مقایسه با رکوردهای زلزله امپریال ولی، به رخداد یک ضربه کوتاه شبیه تر است. در حالت وقوع بارگذاری های تند (شوک های ناگهانی) و رخداد زمانی سریع کرنش های لرزه ای برشی و محوری، مقداری اضافه مقاومت در مصالح ایجاد می شود [۳۷] که مانع از کاهش بیشتر مقاومت (و سختی) مصالح بدنه و پی سد در بازه زمانی کوتاه اعمال بار زلزله می شود [۳۷]. در اصل این اضافه مقاومت ناشی از نرخ بارگذاری سریع، به نوعی اختلاف بین مقاومت (و حتی سختی) دینامیکی و استاتیکی مصالح بدنه و پی سد به شمار می رود [۳۷]. همچنین جدول ۳ مقایسه پاسخ شتاب بیشینه و بزرگنمایی کمی آن، مربوط به هر یک از رکوردها در سنگ بستر و تاج سد جامیشان را ارائه می کند. مطابق این جدول، مقادیر ضریب بزرگنمایی زمانی شتاب در حدود عدد میانگین ۲/۱۳ و بیشترین مقدار مربوط به زلزله نیگاتا ژاپن و کمترین مقدار بزرگنمایی برای رکورد مولفه عرضی زلزله امپریال ولی آمریکا محاسبه شده است. علت این موضوع هم پی شک به مشخصه های زمانی-فرکانسی و انرژی-شدت این زلزله ها بر می گردد.



شکل ۷: تاریخچه زمانی پاسخ های شتاب جانبی نقاط تاج و سنگ بستر سد به ازای ورودی های لرزه ای مقیاس شده مختلف.

Figure 7: Time history of lateral acceleration responses of dam's crest and bedrock points for different scaled seismic inputs.

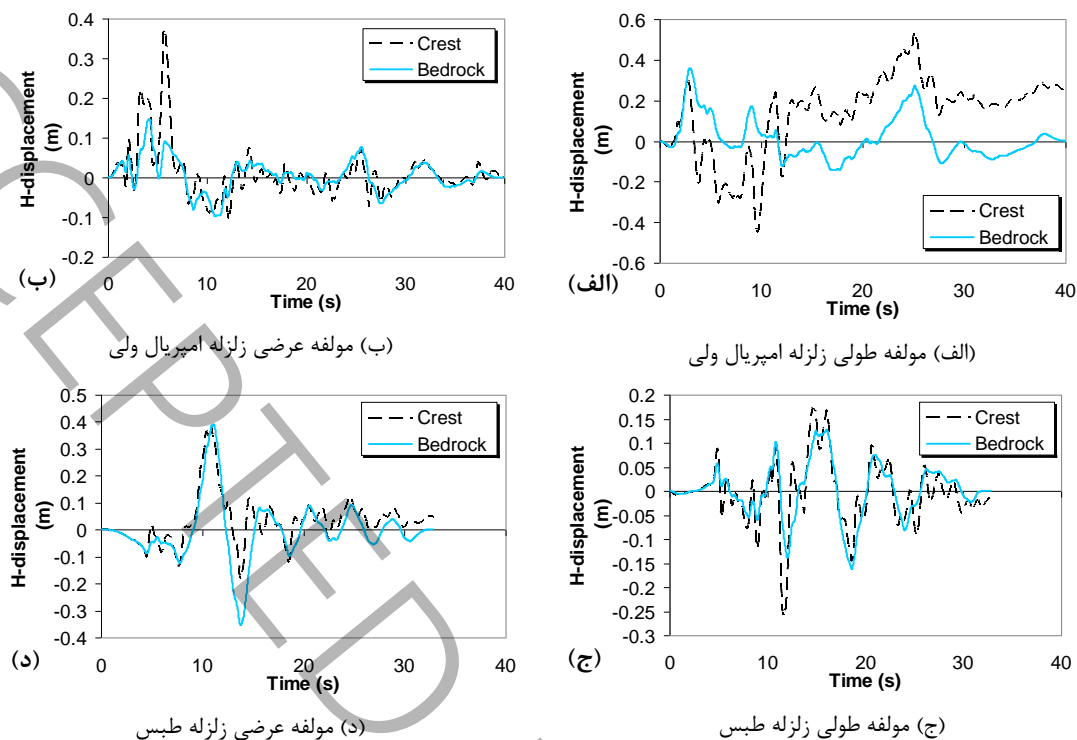
جدول ۳: مقایسه پاسخ شتاب بیشینه و بزرگنمایی کمی آن مربوط به هر یک از رکوردها در سنگ بستر و تاج سد جامیشان.
 Table 3: Comparison of the response of the maximum acceleration and its quantitative magnification related to each record in the bedrock and crest of the Jamishan dam.

ضریب بزرگنمایی ^{۴۴}	زمانی شتاب AF (بدون بُعد)	پاسخ شتاب تاج (m/s ²)	شتاب زمین بیشینه PGA (m/s ²) ورودی در سنگ بستر	رکورد زلزله مقیاس شده و نشده
رکوردهای زلزله مقیاس شده				
	۲/۲۰	۷/۵۴۴	۳/۴۳۴	۱ طبس LN
	۲/۳۲	۷/۹۶۶	۳/۴۳۴	۲ طبس TR
	۲/۰۵	۷/۰۳۳	۳/۴۳۴	۳ امپریال ولی LN
	۱/۹۹	۶/۸۳۸	۳/۴۳۴	۴ امپریال ولی TR
رکوردهای زلزله مقیاس نشده				
	۲/۰۳	۱۴/۴۷۰	۷/۱۱۴	۵ لندرز
	۲/۰۵	۴/۷۵۸	۲/۳۲۳	۶ کورینس
	۱/۹۸	۵/۳۱۷	۲/۶۸۴	۷ جیاشی
	۲/۱۳	۵/۶۹۹	۲/۶۷۲	۸ کالاماتا
	۲/۴۱	۴/۰۳۱	۱/۶۷۱	۹ نیگاتا
	۲/۱۳	۷/۰۷۲	۳/۳۵۵	میانگین مقادیر

در شکل ۸ پاسخ های جابه جایی افقی (جانبی) نقاط کلیدی تاج و سنگ بستر سد تحت اثر مولفه های طولی و عرضی زلزله های امپریال ولی و طبس ترسیم شده است. بر این اساس مطابق شکل ۸-الف نمودارهای مقایسه پاسخ جابه جایی افقی تاج و سنگ بستر سد تحت بارگذاری مولفه طولی زلزله امپریال ولی ارائه شده است. مطابق این شکل پس از ثانیه دهم بارگذاری، به طور ناگهانی علامت و نیز جهت پاسخ جابه جایی تغییر کرده است. تغییر علامت عموماً به دلیل اثرات فرکانس بارگذاری لرزه ای یا به علت تغییرات زمانی سطح انرژی لرزه ای زلزله ورودی است. مطابق نتایج، در تمام بازه زمانی بارگذاری، پاسخ جابه جایی تاج بزرگ تر از پاسخ بستر سنگی است. علاوه بر آن مقادیری جابه جایی ماندگار در انتهای پاسخ این مولفه (ثانیه ۴۰م بارگذاری) مشاهده می شود. این جابه جایی ماندگار، در اثر برهم نهدی سازنده اثرات فرکانسی بین فرکانس های طبیعی بدنه و پی سد و فرکانس غالب بارگذاری لرزه ای است. در واقع شرایط کمی حدود فرکانس طبیعی بدنه سد و فرکانس غالب بارگذاری این مولفه، طوری بوده که منجر به تغییر شکل های ماندگار غیربرگشت پذیر شده است. شکل ۸-ب گراف های مقایسه پاسخ جابه جایی افقی تاج و سنگ بستر سد تحت بارگذاری مولفه افقی عرضی زلزله امپریال ولی را نشان می دهد. بر اساس این شکل، پاسخ جابه جایی افقی تاج فقط در ۱۰ ثانیه ابتدای بارگذاری، بزرگنمایی مشخصی نسبت به پاسخ بستر سنگی از خود نشان می دهد.

در سایر زمان ها به ویژه بعد از ثانیه دهم، پاسخ جابه جایی جانبی ماندگاری مشاهده نمی شود و روند زمانی آن نوسانی و غیرماندگار است. شکل ۸-ج مقایسه پاسخ جابه جایی افقی تاج و سنگ بستر تحت بارگذاری مولفه افقی طولی زلزله طبس و شکل ۸-د مقایسه پاسخ لرزه ای همین نقاط تحت اثر مولفه عرضی زلزله طبس را ارائه می کند. نکته جالب توجه آن است که در شکل های ۸-ج و ۸-د دامنه جابه جایی جانبی بزرگ متناسب با محل زمانی پالس سرعت نزدیک-گسل (از شروع تا انتهای ظهور پالس)، دقیقاً در پاسخ جابه جایی تاج سد نیز تکرار شده است. در شکل های ۸-ج و ۸-د اثرات وجود پالس مشهودتر از اثرات جابه جایی ماندگار در پایان لرزش است. در این دو شکل، جابه جایی ماندگار در انتهای بارگذاری لرزه ای مخالف صفر و ناچیز است. همچنین در شکل های ۸-ج و ۸-د به علت اثرات پالس سرعت و محتوای انرژی لرزه ای بالا، همزمانی و تکرار الگوی پاسخ های تاج و سنگ بستر در زمینه وقوع قله ها و قعرهای پاسخ، در اغلب لحظات بارگذاری لرزه ای به ویژه در نقاط وقوع پاسخ بیشینه به خوبی دیده می شود.

⁴⁴ Amplification factor: AF



شکل ۸: پاسخ های لرزه ای جابه جایی افقی نقاط تاج و سنگ بستر سد تحت اثر رکوردهای مقیاس شده مختلف.

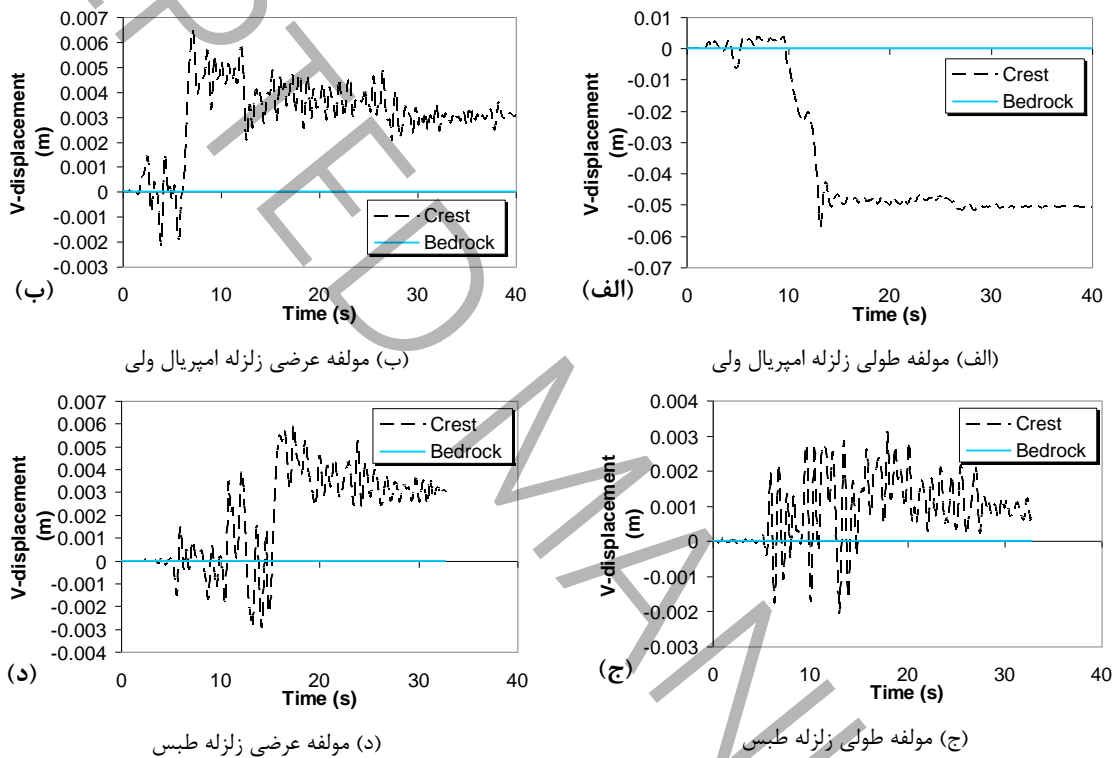
Figure 8: Seismic responses of horizontal displacement of crest and dam's bedrock points under the effect of different scaled records.

شکل ۹ نمونه پاسخ های لرزه ای جابه جایی قائم تاج و سنگ بستر سد، در اثر اعمال مولفه های افقی (و نیز تعریف شده در راستای افقی) رکوردهای مقیاس شده زلزله های امپریال ولی و طبس را نشان می دهد. برای مثال، در شکل ۹-الف مقیاسه پاسخ جابه جایی قائم تاج و بستر سنگی سد ناشی بارگذاری مولفه افقی طولی زلزله امپریال ولی ارائه شده است. نکته قابل توجه آنست که این میزان از جابه جایی های قائم، صرفا به دلیل اعمال بارگذاری زلزله در جهت افقی (جهت خلاف و متعامد با راستای قرائت جابه جایی های قائم) حاصل شده است. افزون بر آن شکل ۹-ب مقیاسه پاسخ جابه جایی قائم تاج و سنگ بستر سد تحت اثر بارگذاری مولفه عرضی زلزله امپریال ولی را نشان می دهد. بیشینه جابه جایی عمودی قابل مشاهده در این نمودار حدود ۷ mm است. شکل ۹-ج مقیاسه پاسخ جابه جایی قائم تاج و بستر سنگی سد در اثر بارگذاری با مولفه طولی زلزله طبس و از سوی دیگر، شکل ۹-د همین مقیاسه برای بارگذاری با مولفه عرضی زلزله طبس را ترسیم می نماید. مطابق این دو شکل، مقادیر مشخصی جابه جایی ماندگار در راستای قائم، در هر دو مورد ایجاد شده است. همچنین پاسخ جابه جایی قائم نقطه ورودی یعنی در انتهای بستر سنگی سد (نمودار آبی رنگ) در تمام موارد معادل مقدار صفر است، زیرا در این راستا جابه جایی اولیه ای ناشی از بارگذاری خارجی ورودی وجود ندارد.

علت اصلی اختلاف نتایج شکل ۹-الف با نتایج بخش های ب تا د این شکل، در مرحله اول به دلیل وضعیت خاص توزیع زمانی متفاوت شتاب مولفه طولی زلزله امپریال ولی نسبت به سایر رکوردها است.

به طوری که تداوم مقدار شتاب بیشینه PGA و سایر دامنه های شتاب بزرگ نزدیک به آن در مولفه طولی زلزله امپریال ولی، در بازه زمانی در حدود ۱۰ تا ۱۵ ثانیه بوده است، حال اینکه این پایداری زمانی مقادیر اوج (بیشینه شتاب) یا مقادیر شتاب نزدیک به مقدار اوج، برای رکوردهای مقیاس شده زلزله طبس و مولفه عرضی زلزله امپریال ولی در حدود ۵ ثانیه است. تکرار زمانی طولانی تر مقادیر شتاب بیشینه یا نزدیک به آنها، باعث افزایش جمعیتی مقادیر جابه جایی های قائم تاج سد شده است. در واقع در سیکل های بارگذاری لرزه ای متوالی، افت دامنه شتاب ورودی در این رکورد در یک بازه زمانی دست کم ۱۰ ثانیه ای ناچیز بوده است. همچنین مطابق شکل

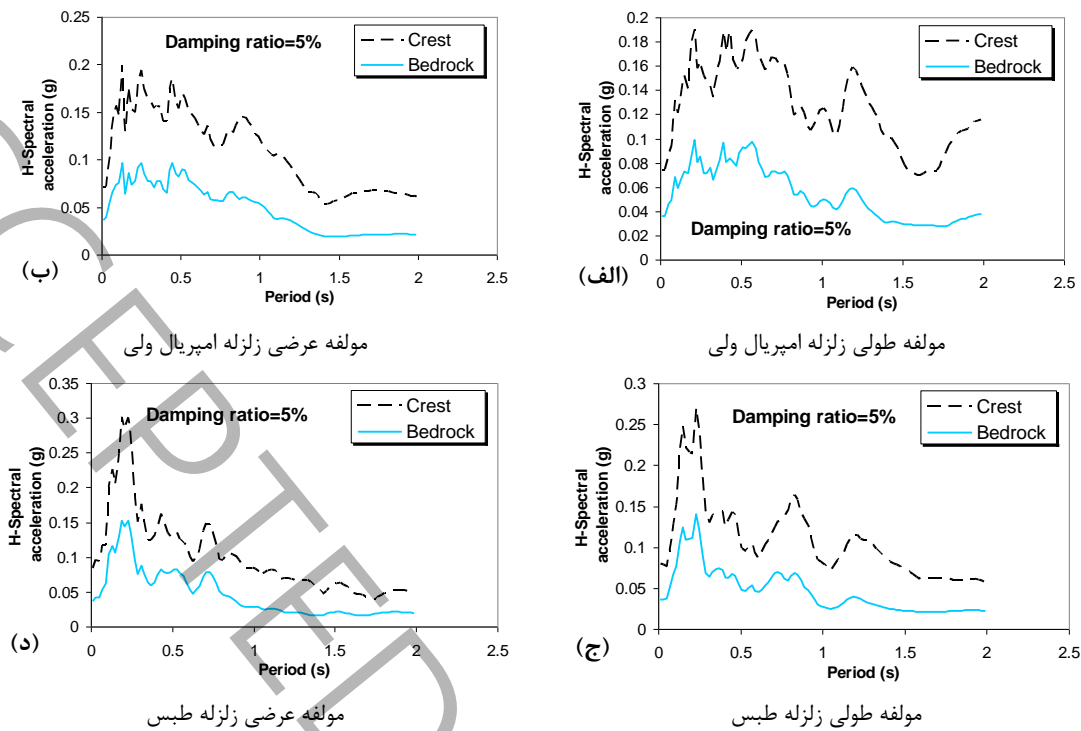
۸ در قبل، این مولفه بزرگ ترین پاسخ جابه جایی جانبی (افقی) و بیشینه پاسخ ماندگار (خمیری) را نیز بدست می دهد. به عنوان یک دلیل دیگر، در واقع توزیع زمانی رکوردهای زلزله طبس در مقایسه با رکوردهای زلزله امپریال ولی به ویژه مولفه طولی آن، به رخداد یک ضربه کوتاه شبیه تر است. در حالت وقوع بارگذاری های لرزه ای تند (شوک های ناگهانی) و رخداد زمانی سریع کرنش های لرزه ای برشی و محوری، مقداری اضافه مقاومت در مصالح ایجاد می شود [۳۷] که مانع از کاهش بیشتر مقاومت (و سختی) مصالح بدنه و پی سد در بازه زمانی کوتاه اعمال بار زلزله می شود [۳۷]. در اصل این اضافه مقاومت ناشی از نرخ بارگذاری دینامیکی سریع، به نوعی اختلاف بین مقاومت دینامیکی و استاتیکی مصالح بدنه و یا پی سد است [۳۷]. پس اگر اضافه مقاومتی در مصالح رخ ندهد، همانند مولفه طولی زلزله امپریال ولی (به دلیل آهسته تر بودن بازه زمانی بارگذاری لرزه ای و طولانی تر بودن زمان اعمال شوک زلزله به مدل-حدود ۱۰ ثانیه)، به طور طبیعی مقادیر تغییرشکل ها و پاسخ ها به دلیل ضعف مصالح بدنه سد و عدم بسیج اضافه سختی دینامیکی ناشی از شوک بارگذاری دینامیکی کوتاه تر) بیشتر می شود.



شکل ۹: پاسخ های جابه جایی قائم ناشی از اعمال مولفه های افقی مختلف زلزله های مقیاس شده امپریال ولی و طبس.

Figure 9: Responses of vertical displacement caused by the application of different horizontal components of scaled Imperial Valley and Tabas earthquakes.

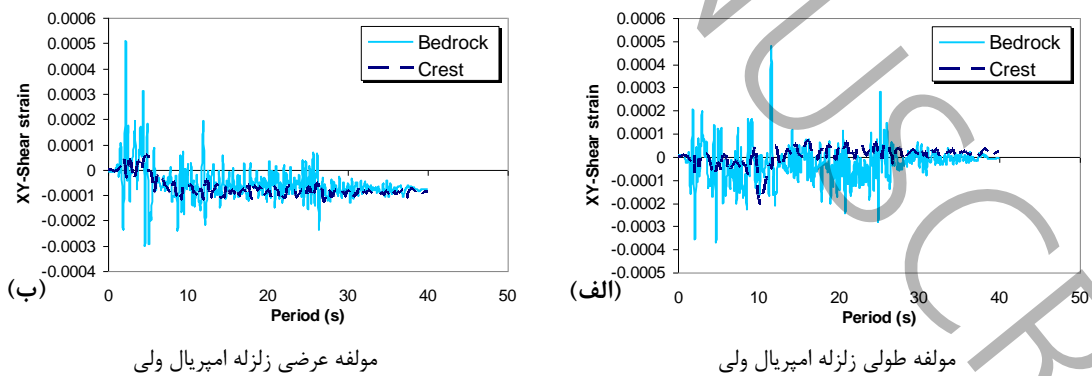
شکل ۱۰ پاسخ های طیفی شتاب در محل ورودی شتاب در سنگ بستر و تاج سد را ارائه می کند. یادآوری می شود که نسبت میرایی ۰.۵٪ برای محاسبه این پاسخ های طیفی شتاب منظور شده است. از طرفی، بزرگنمایی (افزایش دامنه) پاسخ شتاب طیفی افقی در نقطه تاج نسبت به پاسخ سنگ بستر، در تمامی نتایج این شکل مشهود است. همچنین پریودهای بزرگنمایی شده پاسخ طیفی شتاب تاج و سنگ بستر به هم نزدیک هستند، که این نمایانگر سختی و تراکم بالای مصالح سنگریز بدنه سد تا حدود وضعیت تراکمی مصالح لایه های مقاوم زیرین سنگ بستر است. در واقع به دلیل شرایط سختی و تراکمی مصالح بدنه سد تا محل تاج آن، دامنه شتاب طیفی در پریودهای یکسانی در نقاط تاج و سنگ بستر، دچار بزرگنمایی شده است.

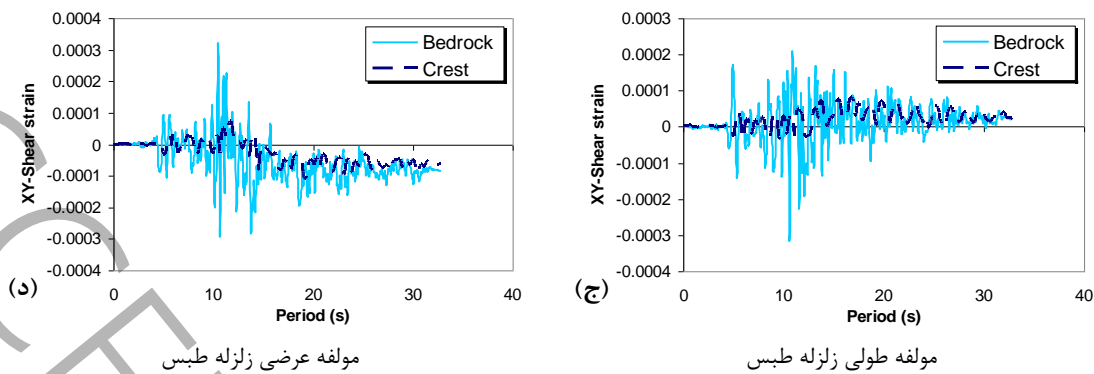


شکل ۱۰: پاسخ های شتاب طیفی افقی ناشی از اعمال مولفه های مختلف زلزله های امپریال ولی و طبس.

Figure 10: Responses of horizontal spectral acceleration caused by the application of different components of the Imperial Valley and Tabas earthquakes.

در شکل ۱۱ پاسخ های کرنش های برشی در تاج سد، حاصل از اعمال مولفه های مختلف زلزله های امپریال ولی و طبس نشان داده شده است. مطابق این شکل مقادیر کرنش برشی در تاج در غالب موارد کمتر از پاسخ کرنش برشی دینامیکی سنگ بستر است. علت کاهش آن هم به دلیل استهلاک دامنه امواج برشی از محل انتشار سنگ بستر تا محل تاج سد است. به دلیل اثر میرایی مصالح مختلف بدنه سد، این عامل در مسیر حرکت رو به بالای امواج زلزله منتشر شده از محل سنگ بستر، باعث کاهش سختی مصالح و افت مقاومت آنها می شود. همچنین مقادیر مشخصی کرنش برشی پسماند (کرنش ماندگار) در انتهای تاریخچه زمانی کرنش ها، به علت رفتار خمیری و غیر-خطی مصالح دیده می شود.



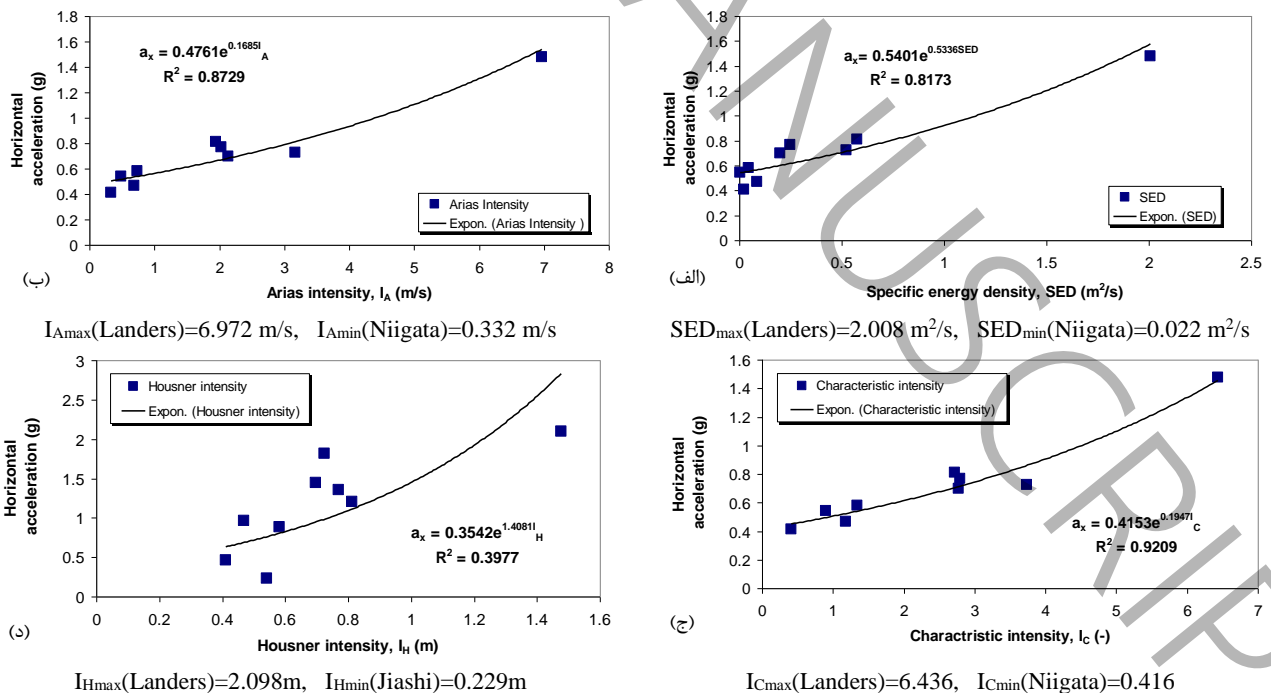


شکل ۱۱: پاسخ های کرنش های برشی تاج حاصل از اعمال مولفه های مختلف زلزله های امپریال ولی و طبس.

Figure 11: Crest's shear strain responses resulting from the application of various components of the Imperial Valley and Tabas earthquakes.

۴-۱- بررسی رابطه مابین پارامترهای شدت-انرژی و پاسخ های لرزه ای تاج سد

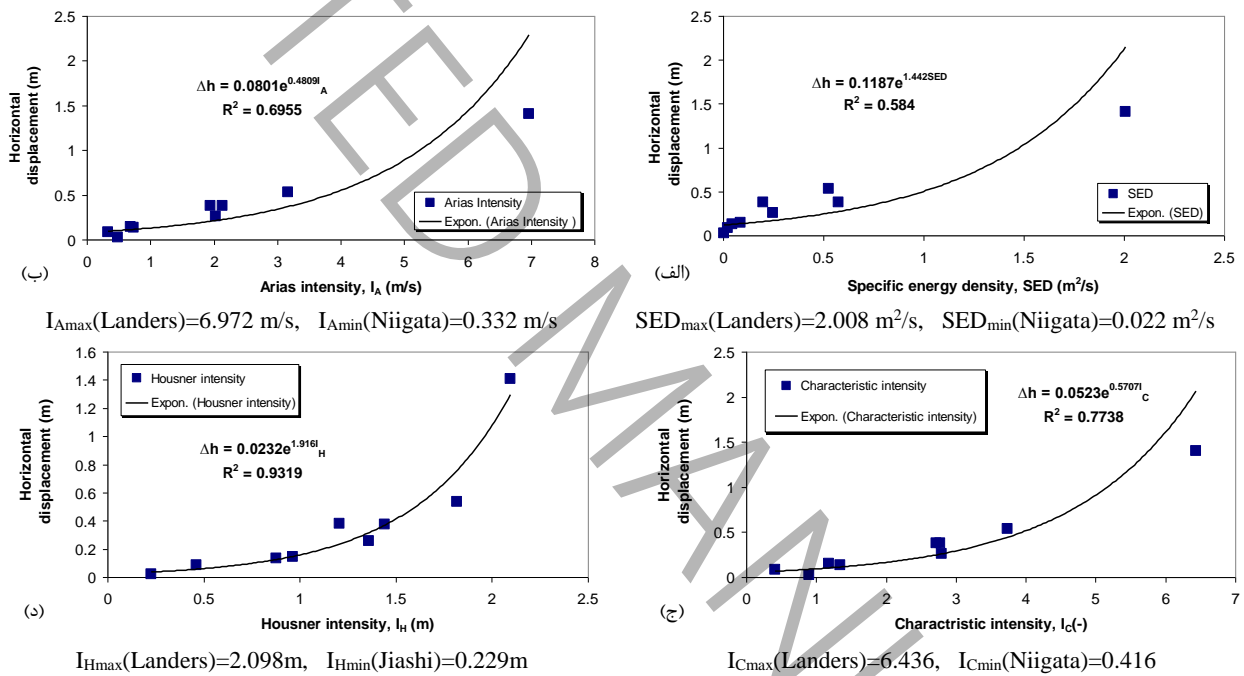
در این بخش نمودارهای حاصل از ترسیم تغییرات پارامترهای شدت و مقدار شار انرژی لرزه ای بارگذاری لرزه ای ورودی در برابر پاسخ های لرزه ای تاج سد ارائه شده است. مطابق شکل های ۱۲ تا ۱۶ روند تغییرات مابین پاسخ زلزله ها با تغییرات مقادیر پارامترهای انرژی یا شدت لرزه ای تاج سد، همانند پاسخ های شتاب و جابه جایی تاج، رابطه ای غیر-خطی، صعودی (افزایشی) و نمایی است. برای نمونه در شکل ۱۲ نمودار تغییرات پاسخ شتاب افقی تاج در مقابل پارامترهای انرژی و شدت زلزله ورودی، برای تمامی موارد، متشکل از روابط نمایی است. بر حسب شکل ۱۲ (بخش های ب و ج) بالاترین ضریب تعیین R^2 (ضریب معرف دقت رگرسیون) مربوط به نمودارهای مابین پاسخ شتاب افقی تاج و شدت مشخصه و شدت آریاس است و شدت هازنر و چگالی انرژی ویژه برای تابع نمایی پیشنهادی، دقت برازش کمتری دارند. علت دقت برازش کم شدت هازنر برای شتاب آن است که شدت هازنر از جنس جابه جایی و بر حسب یکای متر و به طور ذاتی ناسازگار با کمیت شتاب (جابه جایی بر مجذور زمان) است. همچنین از آنجا که کمیت شدت مشخصه بدون یکا و مستقل از بُعد است، همبستگی خوبی با شتاب جانبی تاج از خود نشان داده است.



شکل ۱۲: نمودارهای تغییرات پاسخ شتاب افقی تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای.

Figure 12: Graphs of changes in horizontal acceleration response of the dam's crest versus parameters related to energy criteria and seismic intensity measures.

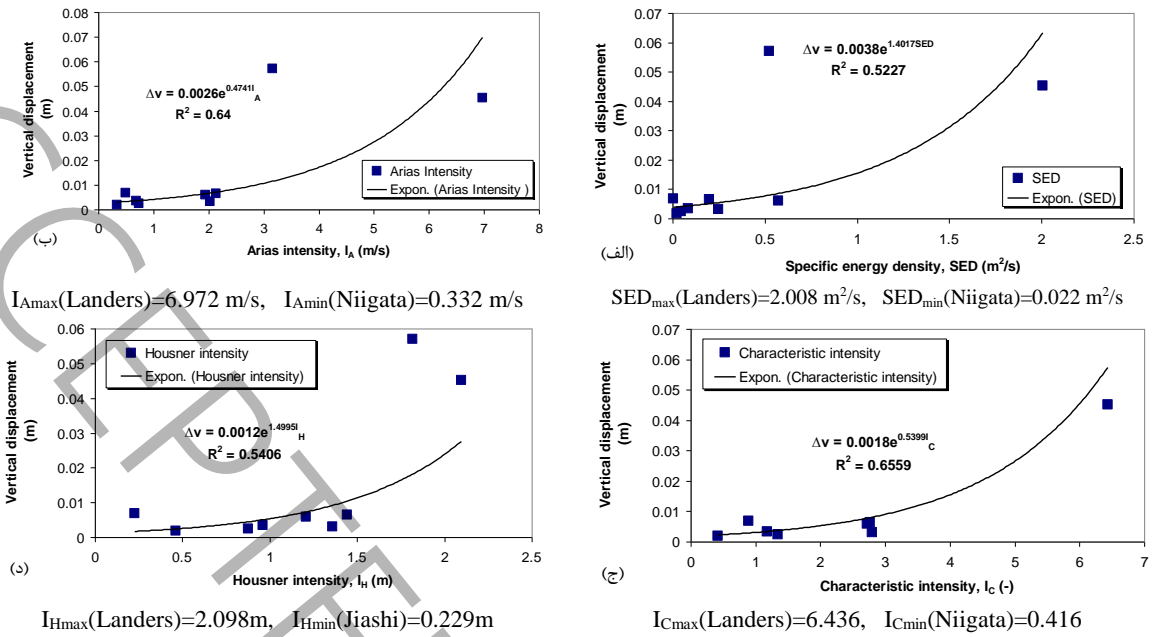
در این بخش در شکل ۱۳ نمودارهای تغییرات پارامترهای انرژی و شدت زلزله ورودی در برابر تغییرات پاسخ جابه جایی جانبی (افقی) تاج سد ارائه شده است. مطابق مقایسه تمامی نتایج نشان داده شده در قسمت های الف تا د این شکل، روند تغییرات جابه جایی افقی تاج بر حسب میزان شدت هازنر (شکل ۱۳-د)، دارای بیشترین دقت رگرسیون (برازش) است. علت اساسی وقوع این موضوع آنست که شدت هازنر و جابه جایی افقی هر دو دارای یکایی مشابه و هم جنس و از نوع طول-جابه جایی (بر حسب متر) هستند. همچنین مقدار شدت هازنر موج لرزه ای ورودی به طور مستقیم بر مقادیر جابه جایی افقی ناشی از بارگذاری دینامیکی افقی تاثیرگذار است. علاوه بر این، شدت مشخصه که یک معیار شدت بدون بعد است، دقت برازش بالایی با جابه جایی افقی تاج سد را بدست می دهد (شکل ۱۳-ج). به دلیل بدون بعد بودن این معیار، همخوانی مناسبی با پاسخ جابه جایی جانبی دارد و به نحوی مستقل از اثر مقیاس و یکای جابه جایی است. علت این موضوع سازگاری ذاتی این سنجه شدت، با پاسخ جابه جایی بر حسب یکای طول است. همچنین مطابق شکل های ۱۳-الف و ۱۳-ب چگالی انرژی ویژه و شدت آریاس از آنجایی که شامل حداقل یک یکای معرف طول (یا به نوعی جابه جایی) در تعریف ریاضی خود هستند، همبستگی تقریباً خوبی با جابه جایی افقی تاج سد که آنهم از جنس یکای طول است، بدست داده اند.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات پاسخ جابه جایی افقی تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای.

Figure 13: The graph of changes in the response of the horizontal displacement of the dam's crest against the parameters related to energy criteria and seismic intensity measures.

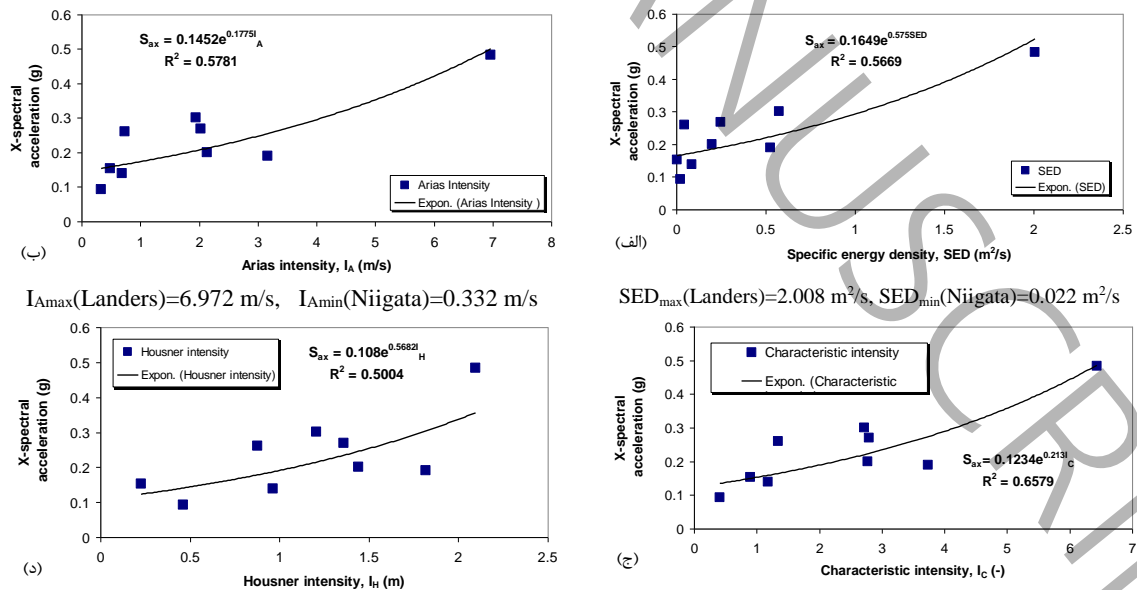
شکل ۱۴ نمودارهای تغییرات پاسخ جابه جایی قائم تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت بارگذاری لرزه ای ورودی را ارائه می نماید. مطابق این شکل، چگالی انرژی ویژه SED و شدت های آریاس، مشخصه و هازنر دقت قابل قبولی را بر حسب تابع نمایی پیشنهادی نشان می دهند، در حالیکه شدت مشخصه بالاترین دقت برازش را دارد. در واقع سنجه شدت بدون بعد شدت مشخصه I_C همانند سه سنجه انرژی-شدت I_C ، SED و I_A و I_H روندی صعودی (با جهت تقعر رو به بالا) با افزایش مقادیر پاسخ جابه جایی لرزه ای قائم تاج سد، از خود نشان می دهد. دلیل اصلی این موضوع آن است که افزایش این سنجه های شدت و انرژی، به طور تقریباً مستقیم و در یک روند صعودی منجر به افزایش تغییر شکل های قائم تاج سد می شود.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات پاسخ جابه جایی قائم تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای.

Figure 14: The diagram of changes in the vertical displacement response of the dam's crest versus parameters related to energy criteria and seismic intensity measures.

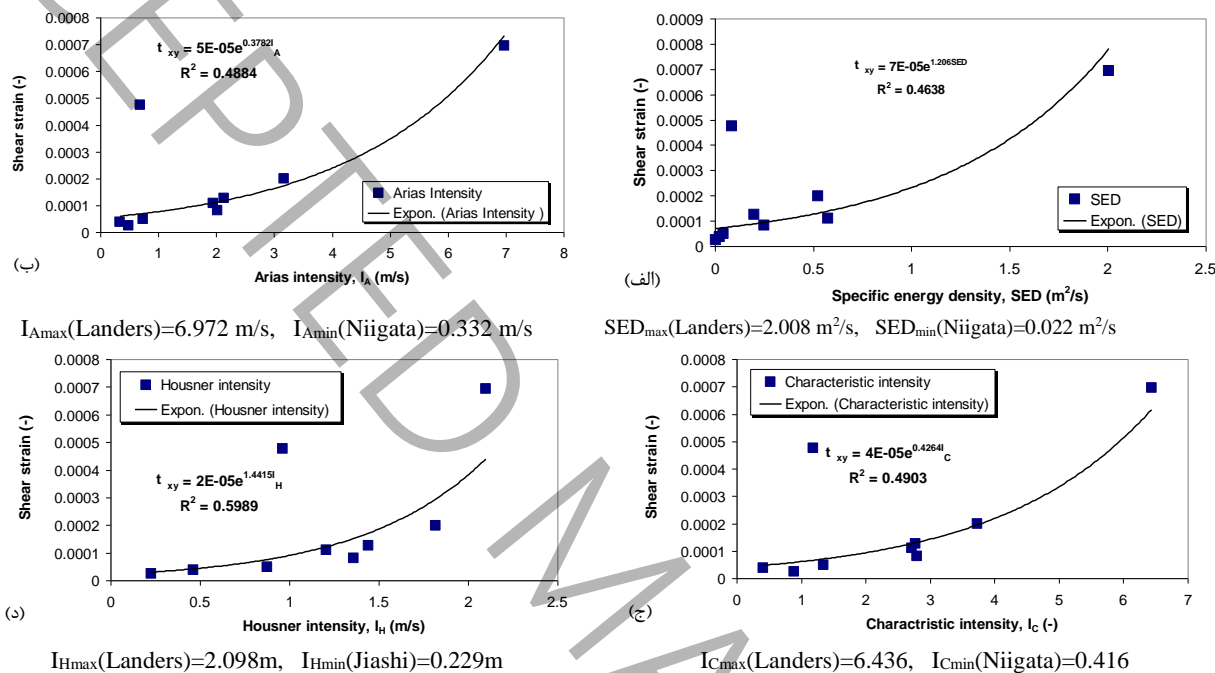
شکل ۱۵ نمودارهای تغییرات پاسخ شتاب طیفی افقی (جانبی) تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای را نمایش می دهد. مطابق این شکل، بیشینه دقت برازش مابین شتاب طیفی افقی تاج و سنجه شدت، مربوط به شدت مشخصه است و کمترین دقت برازش مربوط به شدت هازنر است. دلیل عمده رخداد این موضوع آنست که شدت هازنر در دیدگاه ریاضی تعریف آن، خود تابعی از سرعت طیفی PSV است، که به طور اساسی با شتاب طیفی PSA متفاوت است و به ویژه در خصوص تابع زمانی امواج نامنظم و بدون الگویی همانند تاریخچه زمانی زلزله ها، مغایرت و ناهماهنگی کلی بین سرعت و شتاب طیفی و حتی سرعت ها و شتاب های زمانی وجود دارد.



شکل ۱۵: نمودار تغییرات پاسخ شتاب طیفی افقی تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای.

Figure 15: The diagram of changes in response of the horizontal spectral acceleration of the dam's crest versus parameters related to energy criteria and seismic intensity measures.

شکل ۱۶ تغییرات پاسخ کرنش برشی تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای را نشان می دهد. مطابق این شکل، بهترین برازش داده ها مابین تغییرات کرنش برشی و شدت هازنر برقرار شده است. همچنین ضعیف ترین برازش نیز بین کرنش برشی و چگالی انرژی ویژه رکوردها بدست آمده است. علت این موضوع آنست که در این نمودارها کرنش های برشی تاج سد مدنظر قرار گرفته اند، که فاصله زیادی از کف سنگ بستر که محل اندازه گیری چگالی انرژی ویژه لرزه ورودی است، دارد. انرژی لرزه ای در ارتفاع سد، از محل انتشار اولیه در سنگ بستر تا محل تاج سد، به دلیل اثرات انکارناشدنی میرایی مادی مصالح و کاهش انرژی و دامنه امواج لرزه ای، به شدت مستهلک و زایل می گردد.



شکل ۱۶: نمودار تغییرات پاسخ کرنش برشی تاج سد در مقابل پارامترهای مرتبط با معیارهای انرژی و شدت لرزه ای.
Figure 16: The diagram of changes in shear strain response of the dam's crest versus parameters related to energy criteria and seismic intensity measures.

۵- نتیجه گیری

بر اساس مفاهیم لرزه شناختی [۳۶-۳۷]، محتوای انرژی آزاد شده زلزله های مختلف در نقاط گوناگون دنیا بسته به عوامل مختلفی از قبیل عمق کانونی زلزله، سازوکار گسلش حاکم در پوسته زمین، جنس لایه های خاک، مقادیر مشخصه های فرکانس و دامنه زمانی، لایه بندی، محل سنگ بستر و عوامل متعدد دیگری، ممکن بسیار متفاوت با یکدیگر باشد. از این رو دو زلزله کاملاً مشابه از نظر شتاب و بزرگا، ممکن است انرژی های آزاد شده متفاوتی داشته باشند. بر همین اساس، در این مطالعه مولفه های مختلف زلزله های نزدیک-گسل به عنوان بارگذاری های لرزه ای ورودی، به بستر سنگی مدل عددی سد خاکی-سنگریزه ای جامیشان اعمال شده است. هر کدام از این رکوردها، سطوح انرژی لرزه ای و شدت های مختلفی نسبت به هم دارند. در این مطالعه، رابطه ریاضی مابین (۱) پارامترهای انرژی و شدت زلزله های ورودی و (۲) پاسخ های تاریخچه زمانی شتاب، جابه جایی جانبی و قائم، پاسخ طیفی شتاب و کرنش های برشی دینامیکی بخش های تاج و سنگ بستر سد، توسط انجام تحلیل اجزای محدود دو بعدی غیر-خطی مورد محاسبه قرار گرفته است. بر اساس یافته های مطالعات عددی این مقاله، نتایج زیر قابل بیان است:

۱- بر حسب نتایج این مطالعه، سنجه های شدت و انرژی زلزله های ورودی مختلف با پاسخ های گوناگون لرزه ای سد، روندی صعودی و همواره افزایشی دارند. این افزایش، اغلب تابع یک معادله ریاضی نمایی بر پایه توانی عدد e است.

۲- بنابر همسنجی تاریخچه زمانی شار انرژی لرزه ای مولفه های افقی طولی و عرضی زلزله های مختلف، شار انرژی و سنجه های شدت یک مولفه (افقی یا قائم) یک زلزله می تواند متفاوت از شار انرژی یا سنجه های شدت مولفه (افقی یا قائم) دیگر آن زلزله باشد، که این مساله ممکن است به سبب اثرات نزدیک-گسل یا وجود پالس سرعت باشد. برای مثال، مقایسه تاریخچه زمانی شار انرژی مولفه های طولی و عرضی زلزله طبس مبین آن است که شار انرژی مولفه عرضی آن حدوداً دو برابر شار مولفه طولی است. علت اصلی این موضوع، ادغام اثرات نزدیک-گسل و تاثیر مشهود پالس سرعت (اثرات ساختگاه و جهت پذیری) در مولفه عرضی این رکورد زلزله است.

۳- هر دوی پاسخ های شتاب جانبی زمانی و طیفی تاج سد تحت اثر اعمال اغلب مولفه های زلزله های اعمالی، در مقایسه با شتاب های ورودی در تراز سنگ بستر، دچار افزایش دامنه (بزرگنمایی) شده اند. به گونه ای که این ظهور بزرگنمایی شتاب پاسخ در محدوده تاج سد، دقت مناسب مدلسازی های این مطالعه را نشان می دهد. از سویی اغلب پاسخ های جابه جایی جانبی و قائم تاج سد نیز، تحت اثر اعمال همه مولفه های زلزله ی بکاربرده شده در این مطالعه، نسبت به مقادیر جابه جایی های ورودی در تراز سنگ بستر، بزرگنمایی پیدا کرده اند.

۴- همچنین نمودارهای تغییرات شار انرژی لرزه ای حرکات ورودی، در برابر پاسخ های لرزه ای تاج سد رسم گردیده است. بر حسب نتایج حاصله، تابع ریاضی تغییرات شار انرژی موج های لرزه ای ورودی، با تغییرات پاسخ های لرزه ای تاج سد خاکی-سنگریزه ای از قبیل پاسخ های تاریخچه زمانی شتاب و یا جابه جایی سد، یک رابطه غیر-خطی و از نوع نمایی است.

۵- مطابق یافته های این مطالعه، نمودار تغییرات چگالی انرژی ویژه و سنجه های شدت بارگذاری ورودی در برابر مقادیر پاسخ شتاب افقی (جانبی) تاج سد، در اغلب موارد توابع نمایی با دقت برازش بالاست. نکته مهم و جالب توجه آن است که در همه مجموعه نمودارهای بدست آمده، تغییرات پاسخ های لرزه ای با تغییرات انرژی و شدت های بارگذاری لرزه ای ورودی، یک منحنی نمایی صعودی با ضریب تعیین R^2 مناسب (قابل قبول) بدست می دهد.

۶- یکی از کنترل های اولیه و اساسی جهت تعیین دقت برازش پاسخ های لرزه ای سد بر حسب پارامترهای انرژی و نیز شدت بارگذاری های لرزه ای ورودی، توجه به هماهنگی و قرابت یکای (تشابه ابعادی) مابین پارامترهای انرژی-شدت و پاسخ های لرزه ای موردنظر سد است. به طوری که مطابق یافته های این مطالعه، پارامترهای شدت-انرژی و پاسخ های لرزه ای سدی که یکایی مشابه هم، یا نزدیک به هم دارند، دقت برازش منحنی نمایی بالاتری هم بدست داده اند.

۷- وضعیت توزیع زمانی دامنه های مثبت و منفی شتاب یک زلزله بر پاسخ نهایی آن پس از اعمال بر سد خاکی، تاثیر بسیار زیادی دارد. برای مثال، رکوردهای زلزله ای که تاریخچه زمانی شتاب های آنها کوتاه و در حد یک ضربه ناگهانی است، باعث افزایش مقاومت مصالح بدنه سد در اثر نرخ تند بارگذاری دینامیکی (وقوع کرنش سریع) می شوند و گاهی تغییرشکل های ناشی از اعمال آنها به دلیل افزایش مقاومت و سختی مصالح بدنه سد، نسبتاً کوچک تر بدست می آید.

۸- نتیجه نهایی این مطالعه نشان می دهد که بین پارامترهای انرژی-شدت زلزله های ورودی و پاسخ های لرزه ای سد بررسی شده، بیشترین همبستگی بین پاسخ های تاج شامل شتاب افقی، جابه جایی قائم، شتاب طیفی افقی و شدت مشخصه I_c (کمیت بدون بعد) برقرار است. همچنین برای جابه جایی جانبی تاج سد و کرنش های برشی آن نیز، شدت هازنر I_H (کمیت با بُعد جابه جایی) دقت برازش خوبی بدست می دهد. بنابراین هر چه پارامتر شدت انتخابی از یکای ساده تری برخوردار بوده، پاسخ های لرزه ای سد را در قالب رابطه نمایی صعودی، بهتر پیش بینی کرده اند.

۶- مراجع

- [1] N. Mononobe, H. Matsuo, On the determination of earth pressures during earthquakes, proceedings of World Enginnering Congress, 9p, (1929).
- [2] H.A. Mononobe, et al., Seismic stability of the earth dam, proceedings 2nd congress on large dams, Washington, D.C., 4 (1936).
- [3] G. Gazetas, Seismic response of earth dams: some recent developments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6(1) (1987) 3-47.
- [4] M. Hatanaka, 3-dimensional consideration on the vibration of earth dams, Journal of the Japanese Society of Civil Engineering, 37(10) (1952).

- [5] N.M. Newmark, Effect of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, 15(2) (1965) 139-60.
- [6] M. Vucetic, R. Dobry, Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (1991) 2208-22.
- [7] R. Noorzad, M. Omidvar, Seismic displacement analysis of embankment dams with reinforced cohesive shell, *Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 1149-1157.
- [8] B. Charatpangoon, J. Kiyono, A. Furukawa, C. Hansapinyo, Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64 (2014) 50-62.
- [9] Z. Feng, P.H. Tsai, and J.N. Li, Numerical earthquake response analysis of the Liyutan earth dam in Taiwan, *Journal Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10 (2010) 1269-1280.
- [10] G. Gazetas, P. Dakoulas, Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11 (1992) 27-61.
- [11] C. Zhao, S. Valliappan, J. Tabatabaie, Effect of impervious members and reservoir bottom sediment on dynamic response of embankment dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12 (1993) 199-208.
- [12] S.H. Joh, D.S. Park, K. Magno, J.H. Lee, Stress-based velocity correction for evaluating the shear-wave velocity of the earth core of a rockfill dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126 (2019) 105785.
- [13] N. Zhang, Y. Zhang, Y. Gao, R.Y.S. Pak, J. Yang, Site amplification effects of a radially multi-layered semi-cylindrical canyon on seismic response of an earth and rockfill dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116 (2019) 145-163.
- [14] E. Bilotta, L. Pagano, S. Sica, Effect of ground-motion asynchronism on the equivalent acceleration of earth dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 561-579.
- [15] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, M. Khoshini, Two-dimensional numerical modeling of fault rupture propagation Through earth dams under steady state seepage, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88 (2016) 60-71.
- [16] L. Pelecanos, S. Kontoe, L. Zdravković, Dam-reservoir interaction effects on the elastic dynamic response of concrete and earth dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82 (2016) 138-141.
- [17] Q. Wu, D.Q. Li, Y. Liu, W. Du, Seismic performance of earth dams founded on liquefiable soil layer subjected to near-fault pulse-like ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143 (2021) 106623.
- [18] S. Liu, W. He, Y. Sun, C. Shen, L. Wang, Analysis of the behavior of a high earth-core rockfill dam considering particle breakage, *Computers and Geotechnics*, 157 (2023) 105320.
- [19] M. Wang, S. Chi, Dynamic response analysis of high earth-rockfill dam subjected to P wave with arbitrary incoming angles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157 (2022) 107260.
- [20] A. Ciancimino, R.M. Cosentini, F. Figura, S. Foti, Simplified assessment of the seismic vulnerability of small earth dams, *Procedia Structural Integrity*, 44 (2023) 323-330.
- [21] A. Izumi, Y. Sawada, T. Hori, R. Maki, Centrifuge modelling of small earth dams subjected to the combined effects of rainfall and earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 151 (2021) 106963.
- [22] Y. Sawada, H. Nakazawa, W.A. Take, T. Kawabata, Effect of installation geometry on dynamic stability of small earth dams retrofitted with a geosynthetic clay liner, *Soils and Foundations*, 59 (2019) 1830-1844.
- [23] F. Wang, Y. Tulamaiti, H. Fang, X. Yu, C. Zhou, Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method, *Structures*, 47 (2023) 358-373.
- [24] P. Kumar, B.V.S. Viswanadham, Centrifuge model studies on the performance of earthen dams with geocomposite internal drain subjected to pseudostatic seismic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 170 (2023) 107907.
- [25] A. Ghaemi, J.M. Konrad, Empirical approaches to estimate the nonlinear dynamic responses of earth-core rockfill dams subjected to earthquake ground motions, *Soils and Foundations*, 62 (2) (2022) 101106.
- [26] M. Xiong, W. Wang, Y. Huang, System dynamic reliability evaluation of multiple failure modes of earth dams subjected to strong earthquake excitation, *Soils and Foundations*, 63 (2) (2023) 101298.
- [27] M. Aghamolaei, A. Saeedi Azizkandi, A. Ghalandarzadeh, Evaluation of fault rupture propagation through earth dams subjected to reverse faulting: Outcomes from centrifuge simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 174 (2023) 108167.
- [28] C.Y. Cui, Seismic behavior and reinforcement mechanisms of earth dam and liquefiable foundation system by shaking table tests and numerical simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173 (2023) 108083.
- [29] N.P. Doan, B.P. Nguyen, S.S. Park, Seismic deformation analysis of earth dams subject to liquefaction using UBCSAND2 model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172 (2023) 108003.
- [30] H. Hu, G. Gan, L. Cui, T. Xia, L. Wang, and X. Han, Nonparametric Representation for Seismic Fragility Assessment of Earth Dams with Spatially Variable Soil Properties, *International Journal of Geomechanics Archive*, 23 (8) (2023).
- [31] L. Mosadegh, S. Chakraborty, A.J. Puppala, Effect of geomaterial variability on seismic response analyses of earthen dams, *Engineering Geology*, 297 (2022) 106513.
- [32] V.J.C.B. Guedes, W.R. Borges, L.S.D. Cunha, S.T.R. Maciel, Characterization of an earth dam in Brazil from seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves, *Journal of Applied Geophysics*, 208 (2023) 104893.
- [33] G. Regina, P. Zimmaro, K. Ziotopoulou, R. Cairo, Evaluation of the optimal ground motion intensity measure in the prediction of the seismic vulnerability of earth dams, *Earthquake Spectra*, 39 (4) (2023).

- [34] Geo-SLOPE International Ltd., Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007, An Engineering Methodology, Fourth Edition, February 2010, Calgary, Alberta, Canada, (2010).
- [35] Abdan Faraz Consulting Engineers Co., Studies of the supplementary phase of Jamishan earthen dam. Kermanshah Regional Water Archive and Library, West Regional Water, Kermanshah City, Ministry of Energy, Tehran, Iran, (2010) (in Persian).
- [36] S.L. Kramer, Geotechnical earthquake engineering, The United States of America: Prentice Hall, Inc, (1996).
- [37] K. Ishihara, Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Clarendon Press Oxford, 1996, Reprinted 2003, 385p (2003).
- [38] PEER, strong ground motion database, NGA-West2, <http://peer.berkeley.edu>, (2024).
- [39] A. Arias, A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants (ed. R.J. Hansen), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, (1970) 438-483.
- [40] A.H.S. Ang, Reliability bases for seismic safety assessment and design, Proceeding of fourth US national conference on earthquake engineering, Earthquake engineering research institute, Palm Spring, 1 (1990) 29-45.
- [41] G.W. Housner, Characteristic of strong-motion earthquakes, Bull Seismol Soc Am, 37(1) (1947) 19-31.
- [42] G.W. Housner, Limit design of structures to resist earthquakes, Proceedings of the first world conference on earthquake engineering, Berkeley, CA, (1956) 5.1-5.13.
- [43] H. Sucuoglu, A. Nurtug, Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation, Earthq Eng Struct Dyn, 24 (9) (1995) 1195-214.
- [44] C.M. Uang, V.V. Bertero, Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design, Report No UCB/EERC-88/18 Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Nov. (1988).