

جمهوری اسلامی ایران  
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور

# راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها

نشریه شماره ۵۹۱

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

<http://seso.moe.org.ir>

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

۱۳۹۱



[omoorepeyman.ir](http://omoorepeyman.ir)



بسمه تعالی

ریاست جمهوری  
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

شماره: ۱۰۰/۸۲۱۰۷	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ: ۱۳۹۱/۱۰/۵	

موضوع: راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۹۱ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۱ اجباری است.

  
بهروز مرادی



## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه‌ی این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده‌ی هرگونه ایراد و اشکال فنی

مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- شماره‌ی بند و صفحه‌ی موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱ معاونت

برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: [info@nezamfanni.ir](mailto:info@nezamfanni.ir)

web: [nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)



## بسمه تعالی

### پیشگفتار

یکی از موارد مطرح در سدسازی، رفتار سدها و مخزن آن‌ها در برابر نیروهای دینامیکی زلزله است. بنابراین زمین‌لرزه‌های روی داده در اطراف منطقه سد باید به طور مستمر توسط دستگاه‌های لرزه‌نگار و شتاب‌نگار ثبت شوند. با نصب صحیح لرزه‌نگارها و شتاب‌نگارها و رکوردگیری از لرزه‌های اتفاق افتاده در منطقه سد می‌توان اطلاعاتی مانند مختصات کانون، بزرگای، عمق، زمان دقیق و شتاب لرزه را به دست آورد.

بنابراین لازم است با طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری پایش زلزله‌خیزی محدوده سدها انجام گرفته و با استفاده از شبکه‌های شتاب‌نگاری رفتار سد در برابر نیروهای دینامیکی وارده به بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به مطالب فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها» را با هماهنگی امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به این معاونت ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ ه مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید. هدف از تهیه این نشریه ارائه راهنمای طراحی، نصب و بهره‌برداری از تجهیزات شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری به منظور پایش لرزه‌ای سدها و گزارش‌دهی از نتایج قرائت‌ها است.

بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم نیا و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران را آرزومند می‌باشد.

امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود درخصوص این نشریه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

معاون نظارت راهبردی

پاییز ۱۳۹۱



## تهیه و کنترل راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها (نشریه شماره ۵۹۱)

مجری: دانشگاه صنعت آب و برق

مؤلف اصلی: عباس مهدویان  
همکار مؤلف: احمد نادرزاده  
دانشگاه صنعت آب و برق  
کارشناس آزاد  
دکترای مهندسی زلزله  
کارشناس سازه و مهندسی زلزله

### اعضای گروه نظارت:

رویا چایچی ملتشاهی  
رضا راستی اردکانی  
حبیب شاه نظری  
فرهاد قادری  
ابراهیم مالکی  
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب  
کشور- وزارت نیرو  
دانشگاه صنعت آب و برق  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب  
کشور- وزارت نیرو  
فوق لیسانس مهندسی عمران  
دکترای مهندسی عمران  
دکترای ژئوتکنیک  
فوق لیسانس مهندسی عمران  
فوق لیسانس ژئوفیزیک  
شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

### اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

دالی بندار  
مسعود حدیدی مود  
رضا راستی اردکانی  
فرزان رفیعا  
نوشین روان دوست  
محمدطاهر طاهری بهبهانی  
محمدرضا عسکری  
مجتبی غروی  
محمدرضا فرشباف رحیمی  
سیاوش لیتکوهی  
علی یوسفی  
دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا-  
وزارت نیرو  
شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس  
دانشگاه صنعت آب و برق  
شرکت مهندسی مشاور کاوشگران  
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور  
وزارت نیرو  
شرکت مهندسی مشاور توان آب  
شرکت مهندسی مشاور بندآب  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
شرکت مدیریت منابع آب ایران  
شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک  
شرکت مهندسی مشاور زمین، آب، پی  
دکترای مهندسی عمران  
فوق لیسانس مهندسی مکانیک  
دکترای مهندسی عمران  
فوق لیسانس مهندسی مکانیک سنگ و  
فوق لیسانس مهندسی معدن  
لیسانس مهندسی سازه  
فوق لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)  
دکترای مهندسی عمران  
دکترای مهندسی عمران  
کارشناس ارشد منابع آب  
دکترای ژئوتکنیک  
فوق لیسانس مهندسی معدن و زمین شناسی  
مهندسی

### اعضای گروه هدایت و راهبردی پروژه:

رییس گروه تدوین ضوابط فنی امور نظام فنی  
کارشناس منابع آب امور نظام فنی

فرزانه آقارمضانعلی  
ساناز سرافراز



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	فصل اول - کلیات
۵	۱-۱- ضرورت پایش لرزه ای سدها
۵	۲-۱- پایش لرزه‌ای گستره موثر به ساختگاه
۵	۳-۱- پایش پاسخ لرزه‌ای سد
۷	فصل دوم - شبکه لرزه‌نگاری
۹	۱-۲- طراحی شبکه پایش لرزه‌ای
۹	۱-۱-۲- اهداف شبکه
۹	۲-۱-۲- دامنه کاربرد
۹	۳-۱-۲- طراحی شبکه
۱۶	۴-۱-۲- تهیه گزارش ادواری
۱۸	۲-۲- نصب و بهره‌برداری از شبکه پایش لرزه‌نگاری
۱۸	۱-۲-۲- هدف
۱۸	۲-۲-۲- دامنه کاربرد
۱۸	۳-۲-۲- انواع دستگاه‌های لرزه‌نگار
۲۱	۴-۲-۲- نصب دستگاه‌ها
۲۳	۵-۲-۲- ملاحظات بهره‌برداری و نگهداری شبکه لرزه‌نگاری
۲۴	۶-۲-۲- پشتیبانی فنی در طول بهره‌برداری از دستگاه‌ها
۲۵	۷-۲-۲- نرم‌افزارهای همراه تجهیزات برای پردازش داده‌های حاصل از دستگاه‌ها
۲۵	۸-۲-۲- نحوه گردآوری و پردازش داده‌ها
۲۶	۹-۲-۲- نحوه گزارش دهی
۲۹	۱۰-۲-۲- تهیه و ارائه فهرست کامل مشخصات فنی لرزه‌نگارها
۳۱	فصل سوم - شبکه شتاب‌نگاری
۳۳	۱-۳- طراحی شبکه پایش شتاب‌نگاری
۳۳	۱-۱-۳- کلیات
۳۳	۲-۱-۳- اهداف شبکه
۳۴	۳-۱-۳- فواید تجهیزات شتاب‌نگاری
۳۸	۴-۱-۳- عوامل تاثیرگذار در نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴۰	۳-۱-۵- طراحی شبکه
۵۳	۳-۱-۶- تهیه گزارش ادواری و موردی
۵۶	۳-۱-۷- پردازش رکوردهای پاسخ سد
۵۷	۳-۱-۸- نتیجه گیری و ارائه گزارش
۵۸	۳-۲- نصب و بهره برداری از دستگاه های شتاب نگار
۵۸	۳-۲-۱- هدف
۵۸	۳-۲-۲- دامنه کاربرد
۵۸	۳-۲-۳- انواع دستگاه های شتاب نگار
۶۳	۳-۲-۴- نصب دستگاه های شتاب نگار
۶۷	۳-۲-۵- ملاحظات بهره برداری و نگهداری
۷۰	۳-۲-۶- پشتیبانی فنی در طول بهره برداری از دستگاه ها
۷۱	۳-۲-۷- نرم افزارهای همراه تجهیزات برای پردازش داده های حاصل از دستگاه ها
۷۱	۳-۲-۸- پردازش و استفاده از داده های ثبت شده
۷۲	۳-۲-۹- پردازش رکوردهای پاسخ سد
۷۲	۳-۲-۱۰- نحوه گزارش دهی
۷۳	۳-۲-۱۱- تهیه و ارائه فهرست کامل مشخصات فنی شتاب نگارها
۷۷	۳-۲-۱۲- نتیجه گیری
۸۱	منابع و مراجع



## فهرست شکل‌ها

### صفحه

### عنوان

۳۵	شکل ۱-۳- سد لانگ‌ولی، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
۳۶	شکل ۲-۳- سد لانگ‌ولی، مقایسه پاسخ‌های محاسبه شده با پاسخ‌های اندازه‌گیری شده
۳۸	شکل ۴-۳- شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه ۴ نوامبر ۲۰۰۵ خوزستان (ثبت شده توسط سه دستگاه شتاب‌نگاری سد کرخه)
۴۲	شکل ۵-۳- سد دریاچه کوه سوری در ایالت نیوهمپشایر (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
۴۳	شکل ۶-۳- سد هارت‌ول در ایالت جورجیا (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
۴۴	شکل ۷-۳- سد کاسیتاس در ایالت کالیفرنیا (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
۴۵	شکل ۸-۳- سد بُکا در کالیفرنیا، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
۴۷	شکل ۹-۳- سد مونته‌سلو در کالیفرنیا، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار
	شکل ۱۰-۳- مقایسه بیشینه شتاب مولفه عرضی رکوردها در نقاطی در سد لانگ‌ولی و رخنمون‌های بستر سنگی مجاور
۵۰	برای پنج زمین‌لرزه ماه مه ۱۹۸۰
۵۲	شکل ۱۱-۳- سد انگوری (Enguri) در گرجستان، نحوه اتصال دستگاه‌های شتاب‌نگار به یکدیگر
۶۶	شکل ۱۲-۳- کف بتنی برای دستگاه شتاب‌نگار و اتاقک بر روی مواد یا مصالح تحکیم نشده
۶۶	شکل ۱۳-۳- کف نمونه اتاقک دستگاه شتاب‌نگار
۶۷	شکل ۱۴-۳- نصب معمول دستگاه شتاب‌نگار بر روی تاج یک سد خاکی

## فهرست جدول‌ها

### صفحه

### عنوان

۱۴	جدول ۱-۲- حداقل فاصله از چشمه نوفه تا ایستگاه لرزه‌نگاری
۲۰	جدول ۲-۲- نمونه‌ای از برچسب روزانه مشخصات ایستگاه
۲۶	جدول ۳-۲- نمونه‌ای از نتیجه محاسبه مشخصه یک زمین‌لرزه
۲۷	جدول ۴-۲- نمونه‌ای از داده‌های مربوط به قرائت لرزه‌نگارها و نتایج آن
۲۹	جدول ۵-۲- حداقل وسایل مورد نیاز و مشخصات عمومی و پایه برای یک دستگاه لرزه‌نگار قابل حمل
۲۹	جدول ۶-۲- حداقل مشخصات فنی ثبات
۳۰	جدول ۷-۲- حداقل وسایل مورد نیاز و مشخصات عمومی و پایه برای یک دستگاه لرزه‌نگار قابل حمل و دیگر متعلقات وابسته
۵۰	جدول ۱-۳- بیشینه شتاب زمین (g) در نقاط مشخص شده در شکل (۱۰-۳)
۵۸	جدول ۲-۳- انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار
۵۹	جدول ۳-۳- ویژگی‌های مشترک انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار
۶۳	جدول ۴-۳- گزینه‌های اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر
۷۴	جدول ۵-۳- نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی شتاب‌نگارهای با توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین
۷۶	جدول ۶-۳- نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی متعلقات وابسته به شتاب‌نگارهای با توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین







## مقدمه

رفتار سدها و مخزن آن در برابر نیروهای دینامیکی زلزله همواره باید تحت نظر باشد. بنابراین زمین‌لرزه‌های روی داده در اطراف منطقه سد باید به طور مستمر توسط دستگاه‌های لرزه‌نگار و شتاب‌نگار ثبت شوند. ثبت لرزه‌ها توسط دستگاه‌هایی به نام لرزه‌نگار انجام می‌شود که مهم‌ترین قسمت‌های آن لرزه‌سنج، تقویت‌کننده، ثبات، باطری، تکرارکننده و آنتن‌ها هستند. با نصب صحیح آن‌ها و رکوردگیری می‌توان محاسبه مختصات کانون، بزرگا، عمق و زمان دقیق رویداد را از قرائت لرزه‌نگاشت‌ها برای زمین‌لرزه‌ها به دست آورد. دستگاه‌های شتاب‌نگار نیز شتاب حاصل از زمین‌لرزه را در محل نصب ثبت می‌کنند. معمولاً این تجهیزات به تعداد مورد نیاز در محل سد یا اطراف آن نصب می‌شوند. یک یا چند لرزه‌سنج در محلی به نام ایستگاه لرزه‌نگاری قرار می‌گیرند و مجموعه چند ایستگاه لرزه‌نگاری در یک منطقه، شبکه لرزه‌نگاری را به وجود می‌آورند.

معمولاً طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری را برای پایش (رفتارنگاری) زلزله‌خیزی محدوده سدها و در مناطقی که لرزه‌خیز است در نظر می‌گیرند، در صورتی که هدف از نصب دستگاه‌های شتاب‌نگاری بررسی رفتار سد در مقابل نیروهای دینامیکی وارده به بدنه سد است. در هنگام طراحی و نصب لرزه‌نگارها و شتاب‌نگارها و متعلقات وابسته به آن‌ها عواملی مانند مشخصات فنی، شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی، جاده‌های دسترسی، میزان نوفه محل و ... باید مد نظر قرار گیرد که در این راهنما به تشریح این عوامل پرداخته خواهد شد. پایش رفتار سدها دو هدف اصلی را دنبال می‌کند:

– تشخیص ایمنی سازه سد

– بهبود و افزایش دانسته‌ها در ارتباط با رفتار سازه‌ای سدها، منابع اصلی توسعه در طراحی و بهینه‌سازی شکل سدها.

این اهداف اصولی همچنین برای پایش لرزه‌ای سدها و تجهیزات لرزه‌ای مربوط به آن صادق است. نقش حیاتی پایش لرزه‌ای با توجه به امکانات محدود برای رفتارنگاری دقیق و طبیعت پیچیده پاسخ سد به تکان‌های ناشی از زلزله، بیش از پیش مورد تاکید است. این راهنما جنبه‌های اساسی ابزاربندی و پایش لرزه‌ای سدها را در برمی‌گیرد و دستورالعمل‌ها و معیارهایی را برای طراحی سامانه‌های پایش، نصب، بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها شامل پردازش و به کارگیری رکوردها و داده‌های حاصل از این سامانه‌ها را ارائه می‌دهد.

این راهنما از دو بخش مجزا تحت عنوان‌های «طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری سدها» و «طراحی شبکه‌های شتاب‌نگاری سدها» تشکیل شده و جنبه‌های اساسی پایش لرزه‌ای سدها را در بر می‌گیرد، همچنین معیارهایی را برای طراحی سامانه‌های پایش، نصب، بهره‌برداری و نگهداری آنها (شامل پردازش و به کارگیری رکوردها و داده‌های حاصل از این سامانه‌ها) ارائه می‌دهد. این مجموعه به عنوان راهنمای پایش لرزه‌ای سدها تهیه شده و هدف آن کمک به مجریان و کارشناسان در حرفه مهندسی سد است.

## – هدف

هدف این راهنما ارائه راهنمای طراحی، نصب و بهره‌برداری از تجهیزات شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری به منظور پایش لرزه‌ای سدها و گزارش‌دهی از نتایج قرائت‌ها می‌باشد که جزییات هر یک از شبکه‌ها در فصل مربوط ارائه شده است.



**- دامنه کاربرد**

این راهنما به منظور پایش لرزه‌ای سدها تهیه شده است. در این راهنما شبکه لرزه‌نگاری برای پایش لرزه‌خیزی سدها و گستره موثر بر آن‌ها و شبکه شتاب‌نگاری به عنوان پایش لرزه‌ای سازه سد، تجهیزات و تاسیسات وابسته به آن ارائه شده است. جزییات و دامنه کاربرد هر یک از شبکه‌ها اعم از، راهنمای طراحی، نصب و بهره‌برداری از تجهیزات شبکه به صورت مستقل و در فصل مربوط ارائه شده است.



# فصل ۱

---

---

## کلیات





## ۱-۱- ضرورت پایش لرزه‌ای سدها

در سال‌های اخیر ساخت سدهای بلند متناسب با نیاز آبی کشور و تاثیرات مثبت آن در عمران و توسعه پایدار رونق بسیار یافته است. از این رو چنانچه به هر دلیل پس از ساخت، شکستی در سد ایجاد شود، خسارات شدید جانی و مالی محتمل خواهد بود. بدین لحاظ شناخت رفتار و کارکرد واقعی سدها و اطمینان کامل از ایمنی و پایداری آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. به منظور شناخت صحیح، دقیق و به موقع از رفتار سد و سازه‌های وابسته و تصمیم‌گیری‌های فنی و مدیریتی، تجهیزات ضروری بر اساس نظر طراح در بخش‌هایی از سد نصب می‌شود. با اطلاعات به دست آمده از طریق این دستگاه‌ها در زمان‌های مختلف (از جمله در هنگام ساخت، اولین آب‌گیری، هنگام بهره‌برداری، پس از رویداد هر سیل یا هر زلزله بزرگ و تخلیه سریع مخزن) و ترسیم نتایج حاصل (پایش) و تحلیل و تفسیر آن‌ها (رفتارسنجی) رفتار سد و سازه‌های وابسته مورد کنترل و ارزیابی قرار می‌گیرد. نوع سد، ارتفاع و بخش‌های داخلی آن تعیین‌کننده نوع و سیستم‌های پایش مورد نیاز در یک سد است. سدها با توجه به نوع مصالح مصرفی در ساخت آن‌ها و هندسه سازه به دو دسته تقسیم می‌شود:

- سدهای بتنی<sup>۱</sup>

- سدهای خاکی<sup>۲</sup> و سنگریزه‌ای

پایش سدها یکی از مهم‌ترین امور مربوط به بهره‌برداری و نگهداری سدها است و در تامین شرایط ایمنی و شناخت رفتار سدها نقش مهمی را ایفا می‌کند. با تهیه و نصب ابزار دقیق در بدنه سدها و سازه‌های وابسته می‌توان آن‌ها را پایش نمود.

## ۱-۲- پایش لرزه‌ای گستره موثر به ساختگاه

پایش لرزه‌ای گستره موثر (محدوده‌ی مکانی که زلزله‌های رخ داده در آن می‌تواند بر بدنه سد و تاسیسات وابسته تاثیرگذار باشد) بر سدهای بزرگ یکی از مهم‌ترین امور مربوط به بهره‌برداری و نگهداری سدها است که در تامین شرایط ایمنی و شناخت رفتار سدها نقش مهمی را ایفا می‌کند. در چند دهه اخیر تکنولوژی تهیه و نصب ابزار دقیق این نوع پایش در بدنه و گستره موثر بر سدها و سازه‌های وابسته از اهمیت قابل توجهی برخوردار شده است. تنوع و گستردگی این گونه ابزار دقیق هر روزه بیش‌تر و با کیفیت بهتر ارائه شده است. بدین لحاظ ضرورت دارد که به منظور یکنواخت کردن طراحی، نصب، شیوه قرائت و ثبت نتایج داده‌های مربوط به ابزار دقیق لرزه‌ای و تجزیه و تحلیل آن‌ها در هنگام ساخت و به دنبال آن در دوران بهره‌برداری، دفترچه راهنمایی تدوین شود تا از این طریق عملیات پایش و تناوب قرائت‌ها از نظم و هماهنگی مطلوب بهره‌مند گردد.

## ۱-۳- پایش پاسخ لرزه‌ای سد

هدف اصلی از اندازه‌گیری پاسخ لرزه‌ای سد به دست آوردن مقادیر بیشینه پاسخ آن در برابر نیروی دینامیکی زلزله وارده به بدنه سد است. بنابراین دستگاه‌های مربوط باید در مناطق خاصی که پیش‌بینی می‌شوند، قرار داده شوند. این انتخاب باید به گونه‌ای باشد

1- Concrete dams

2- Fill dams / Embankment dams



که اطلاعات گردآوری شده کماکان قابل استفاده باشند، زیرا اندازه‌گیری پاسخ لرزه‌ای سد برای کنترل رفتار آن حیاتی است. از سوی دیگر به منظور کاستن هزینه‌ها افزایش بی‌رویه دستگاه‌ها توصیه نمی‌شود.

از آن‌جا که بسیاری از سدها به دلایلی از جمله عدم تقارن دره ممکن است نامتقارن باشند، مقطع بیشینه ممکن است در مرکز هندسی تاج سد قرار نگرفته باشد. این موضوع در هنگام طراحی باید مد نظر قرار گیرد.

نگاشت‌های حاصل از دستگاه‌های لرزه‌ای بهترین منبع را برای تحلیل در اختیار می‌گذارد. بر پایه این داده‌ها می‌توان پاسخ واقعی سد نسبت به بارهای لرزه‌ای را با مقادیر محاسبه شده مقایسه کرد. مولفه‌های ثبت شده جنبش زمین‌لرزه از اهمیت خاص برخوردارند. در ارتباط با پردازش داده‌ها، تحلیل پاسخ سد معمولاً با هدف تعیین عوامل تقویت‌کننده، همبستگی بین تحریک‌کننده‌ها و پاسخ‌ها و پارامترهای مُدی<sup>۱</sup> (معمولاً برای سدهای خاکی) انجام می‌شود. این کار معمولاً به وسیله تحلیل‌های پیچیده در محدوده فرکانسی یا زمانی با به کارگیری برنامه‌هایی خاص به صورت ناپیوسته<sup>۲</sup> انجام می‌شود.

تعدادی شتاب‌سنج بر روی تاج سد و به منظور مشخص کردن پریودهای طبیعی از طریق عملیات ساده تحلیل طیفی برای مراقبت از سد قرار داده می‌شود.

- 1- Modal
- 2- Off-line special programs



# فصل ۲

---

---

## شبکه لرنز هنجاری







## ۲-۱- طراحی شبکه پایش لرزه‌ای

### ۲-۱-۱- اهداف شبکه

هدف از طراحی و نصب شبکه‌های لرزه‌نگاری در گستره موثر بر سدها پایش لرزه‌خیزی محدوده آن و به منظور شناخت مناطق فعال و غیرفعال از یکدیگر است. این طراحی معمولاً در مناطقی که از نظر لرزه‌ای فعال می‌باشند در نظر گرفته می‌شود. بنابراین یکی از مهم‌ترین پارامترهای پایش سدها که به صورت مستمر انجام می‌شود، ثبت زمین‌لرزه‌های روی داده در اطراف منطقه سد است. محاسبه مختصات کانون، بزرگا، عمق و زمان دقیق رویداد، مهم‌ترین داده‌هایی است که از قرائت لرزه‌نگاشت‌ها برای یک زمین‌لرزه به دست می‌آید.

از آنجایی که در سدهای بزرگ امکان رخداد زلزله‌های القایی ناشی از آبیگری، تخلیه مخزن و ... وجود دارد اطلاعات لرزه‌نگارها کمک شایانی برای تشخیص و مطالعه چنین پدیده‌ای می‌کند.

### ۲-۱-۲- دامنه کاربرد

طراحی شبکه لرزه‌نگاری مورد نظر این راهنما پایش لرزه‌خیزی سدهاست. بنابراین، دامنه کاربرد این راهنما لرزه‌نگاری گستره موثر بر سدها می‌باشد که در زمان مطالعات باید طراحی آن انجام و قبل از شروع ساخت اقدام به بهره‌برداری گردد.

### ۲-۱-۳- طراحی شبکه

معمولاً طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری را برای بررسی وضعیت لرزه‌خیزی محدوده سدها در نظر می‌گیرند. طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری در یک منطقه باید با توجه به برنامه زمان‌بندی و با توجه به شرایط اقلیمی (آب و هوایی) آن منطقه صورت گیرد تا افراد بتوانند مطالعات و اجرای آن را با حداقل مشکلات پیش ببرند. در هنگام طراحی به منظور شناخت منطقه و نحوه تقسیم‌بندی آن به قسمت‌های مطلوب و نامطلوب، باید منطقه را با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی شامل مراکز جمعیتی، راه‌ها و نقشه‌های توپوگرافی مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. گردآوری کلیه اطلاعات موجود مانند نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، راه‌ها و عکس‌های هوایی اجازه خواهند داد تا ارزیابی اولیه خوبی از منطقه صورت گیرد.

### ۲-۱-۳-۱- لرزه زمین‌ساخت گستره نزدیک (گستره حدود ۳۰ کیلومتری) به ساختگاه سد و دریاچه آن

در زمان طراحی باید توجه کرد که شرایط زمین‌شناسی محل سد و زمین‌ساخت گستره ۳۰ کیلومتری آن، مجموعه‌ای را شامل می‌شوند که در هنگام طراحی باید مد نظر قرار گیرد. عدم استقرار دستگاه‌ها بر روی منطقه گسلش یافته و یا بسیار نزدیک به آن باید مد نظر قرار گیرد. بدین منظور تهیه نقشه لرزه زمین‌ساخت به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ الزامی بوده و می‌تواند کمک مطلوبی به طراح نماید. هنگام تفسیر اطلاعات نیز وجود نقشه‌های تکتونیک گستره طرح مورد بررسی می‌تواند کمک شایانی به تفسیر بهتر اطلاعات زمین‌لرزه‌ای و شناخت فعالیت لرزه‌ای گسل‌های آشکار و پنهان، به ویژه گسل‌هایی که ممکن است در زیر تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها و یا در دشت‌های آبرفتی پنهان باشند نماید.



## ۲-۱-۳-۲- بررسی منابع نوفه طبیعی و مصنوعی موثر در حوالی ایستگاه‌های شبکه

این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اجرای مطلوب آن در گرو عملکرد درست کارکنان با دستگاه‌های لرزه‌سنجی و شناسایی بهترین نقاط اندازه‌گیری است. ابتدا باید محل‌های مستعدی را که در مرحله تدارکاتی مشخص شده‌اند بر اساس سازندهای زمین‌شناسی شناسایی کرد. سپس با توجه به وسعت محل، سعی در یافتن بهترین نقطه نمود. بهترین نقطه جایی دور و ایمن از نوفه‌های مصنوعی و طبیعی مانند هر نوع جاده، آب‌های روان، باد و باران و غیره است.

دستگاه‌های لرزه‌نگاری سیار پس از نصب در ساعات مختلف روز (در راس هر ساعت یا ربع ساعت) برای مدت حداقل یک دقیقه هم‌زمان با پایگاه مرجع، نوفه‌های محیطی را نمونه‌برداری می‌کنند. در هنگام نصب دستگاه‌های اندازه‌گیر رعایت چند نکته زیر الزامی است:

لرزه‌سنج‌ها باید کاملاً در جای هموار و تراز باشند.

در هنگام اندازه‌گیری هم‌زمان با ایستگاه مرجع، رعایت سکوت و خودداری از رفت و آمد به منظور بالا بردن کیفیت ثبت نوفه الزامی است.

ضروری است اندازه‌گیری‌ها در ساعات مختلف روز و در فصول مختلف در شرایط آب و هوایی و سرعت‌های گوناگون باد صورت گیرد. تجربه نشان داده است که نسبت دامنه نوفه در ساعات‌های روز به ساعات‌های شب در حدود ۲:۱ تا ۱۰:۱ است. حد آستانه آشکارسازی یک شبکه به موارد زیر بستگی دارد.

در هنگام اندازه‌گیری هم‌زمان با ایستگاه مرجع، باید تمام رویدادهای نزدیک محل ثبت شده با ذکر زمان دقیق یادداشت شوند و از نقطه اندازه‌گیری و استقرار دستگاه‌ها عکس گرفته شود.

در هنگام ثبت نوفه با سامانه‌های رقمی باید انتخاب صحیح فاصله زمانی نمونه‌برداری<sup>۱</sup> و انتخاب یک صافی پایین‌گذر<sup>۲</sup> با فرکانس متناسب با گستره فرکانسی مورد نظر را در بررسی‌های نوفه‌سنجی مورد توجه قرار داد.

در پایان اندازه‌گیری‌ها در هر محل، برای کسب اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه‌ها، باید به نداشت‌های زمانی ثبت شده نظری کوتاه انداخت تا در صورت نامطلوب بودن نداشت‌ها، ایرادهای سامانه را بر طرف کرده و آن‌ها را برای زمان بعدی اندازه‌گیری در همان محل آماده نمود.

جدول (۲-۱) می‌تواند به عنوان یک راهنما برای تعیین حداقل فاصله چشمه نوفه تا ایستگاه لرزه‌نگاری مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲-۱-۳-۳- هندسه شبکه

هندسه شبکه (موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگار) به نحوی طراحی می‌شود که خطای تعیین رو مرکز زلزله‌ها در گستره موثر بهینه شود. به منظور کاهش و بهینه کردن توزیع خطا بهتر است که شکل‌های گوناگون هندسی مورد نظر، مدل‌سازی و ارزیابی شود. این عمل با روش‌های آماری مختلف قابل اجرا است.

شکل هندسی مطلوب معمولاً به صورتی است که ایستگاه‌های لرزه‌نگار به صورت یکنواخت پیرامون گستره مورد نظر و همچنین یک ایستگاه مرکزی در مرکز گستره قرار گیرند. از جمله مواردی که بر آن تاکید می‌شود، وجود یک ایستگاه سه مولفه‌ای در مرکز

1- Sampling rate  
2- Low cut filter



گستره به منظور کاهش و بهینه‌سازی خطای مکان‌یابی است. در هر حالت حداکثر فاصله خالی آزیموتی برای هر رومرکز مورد نظر باید کم‌تر از ۱۸۰ درجه باشد.

به علت محدودیت‌هایی نظیر توپوگرافی، عدم دید مستقیم مخابراتی (در ارتباط تله‌متری) جاده دسترسی، نوفه، پهنه‌بندی سنگ بستر (پوشش زمین‌شناسی) نمی‌توان هندسه شبکه را به صورت ایده‌آل در نظر گرفت ولی با توجه به این محدودیت‌ها تا حد امکان موقعیت ایستگاه‌ها باید به نحوی باشد که اطلاعات دقیق‌تری در مورد رویداد زلزله‌ها به دست آید.

## ۲-۱-۳-۴- چگالی ایستگاه‌های شبکه

تعیین دقیق رومرکز و ژرفای کانونی از مهم‌ترین عوامل در بررسی ساز و کار ژرفی زلزله‌ها است در صورتی که بتوان ساز و کار ژرفی را با دقت لازم به دست آورد می‌توان رابطه لرزه‌خیزی را با ساختارهای زمین‌شناسی و جهت‌گیری تنش‌های زمین‌ساختی مشخص نمود. تعیین ژرفای کانونی و رومرکز بستگی قابل توجهی به چگالی شبکه دارد. چگالی شبکه باید متناسب با اهداف و محدودیت‌ها باشد. افزایش چگالی می‌تواند پرهزینه باشد چون افزایش تعداد ایستگاه‌ها علاوه بر هزینه خرید و نصب هر ایستگاه باعث افزایش قیمت و هزینه نگهداری دستگاه‌های مرکز (که وظیفه دریافت، ثبت و پردازش اطلاعات تمام ایستگاه‌ها را به عهده دارند) می‌شود. از طرفی کاهش تعداد و افزایش فاصله بین ایستگاه‌ها باعث عدم ثبت صحیح زلزله‌های القایی کوچک توسط تعداد کافی از ایستگاه‌ها می‌شود و مکان‌یابی این زلزله‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد.

زمین‌لرزه‌های القایی معمولاً در پوسته زمین در ژرفای کانونی کم روی می‌دهند. بنابراین، فاصله ایستگاه‌ها باید متناسب با این ویژگی باشد. در برآورد معمولی ژرفای کانونی لازم است که حداقل فاصله یکی از ایستگاه‌ها تا رومرکز کم‌تر از ژرفای کانونی باشد. به عبارت دیگر فاصله میانگین بین ایستگاه‌ها نباید بزرگ‌تر از دو برابر ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌های القایی در نظر گرفته شود. مناسب است محل لرزه‌نگارهای خارج از محدوده سد را به نحوی طراحی نمود که با لرزه‌نگارمستقر در محل سد (مرکزی) زاویه‌ای کم‌تر از ۱۲۰ درجه داشته باشند و نزدیک گسل نباشند.

بر اساس توصیه‌های مختلف فاصله بین ایستگاه‌ها نباید کم‌تر از ۵ کیلومتر و بیش‌تر از ۳۰ کیلومتر باشد. در برخی از شبکه‌ها که برای سدها طراحی شده‌اند فاصله ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر را مناسب دانسته‌اند. به طور کلی تعداد ایستگاه‌ها را با توجه به عواملی مانند شکل و ابعاد مخزن، هزینه خرید، نصب، نگهداری، محدوده رویداد زلزله‌ها، بزرگای آستانه مورد نظر برای ثبت، ژرفای کانونی، نوفه زمینه و محدودیت‌های طراحی مشخص می‌کنند.

به منظور ثبت زلزله‌های محلی قبل از ساخت سد، در مرحله اول، معمولاً حداقل سه لرزه‌نگار پربود کوتاه با مولفه قائم در گستره فوق‌الذکر و یک لرزه‌نگار در محل سد کافی است. با نصب چنین شبکه‌ای می‌توان تخمینی از لرزه‌خیزی منطقه به دست آورد. در صورتی که پس از نصب این شبکه، لرزه‌خیزی قابل توجهی در گستره مشاهده شود، شبکه مورد نظر باید گسترش یابد.

## ۲-۱-۳-۵- پایش مخزن

هنگامی که در نزدیکی مخزن مکان‌هایی مانند شیب‌های تند، زون‌های مستعد لغزش و غیره وجود دارند، این مکان‌ها ممکن است نشانگر خطر ناپایداری باشند و در اثر زمین‌لرزه، به حرکت در آیند. توصیه می‌شود که چنین مکان‌هایی با استفاده از ابزارهای



مناسب پایش شوند تا حرکات احتمالی آن‌ها شناسایی شود. همچنین باید سامانه ویژه‌ای ایجاد گردد تا حرکت گسل‌هایی که احتمالا بر سد اثر می‌گذارند را اندازه‌گیری کند.

افزون بر آن، پایش مخزن کمک می‌کند تا ویژگی‌های لرزه‌خیزی ساختگاه به صورت دقیق‌تری مشخص شود و در نتیجه زلزله طراحی به صورت قابل اعتمادتری تعریف شود. در عین حال، این اقدام می‌تواند تغییرات احتمالی در لرزه‌خیزی را در اثر زمین‌لرزه‌های القایی شناسایی کند. شناسایی لرزه‌خیزی القایی مخزن می‌تواند در دو فاز به اجرا در آید.

فاز یک شامل مطالعات لرزه‌خیزی تاریخی و شناسایی ساختمان زمین‌شناسی مخزن و پیرامون آن با هدف شناسایی گسل‌های فعال احتمالی است. این فاز همچنین شامل مطالعه بر روی فعالیت‌های لرزه‌ای به منظور ارزیابی لرزه‌خیزی پیش از زمین‌لرزه‌های القایی است که می‌تواند با استفاده از شبکه‌های پرتابل و لرزه‌سنج‌های بسیار حساس و با ارتباط رادیویی به اجرا در آید. این فاز، اطلاعاتی را فراهم می‌آورد و در آن در مورد لزوم به مطالعه بیشتر تصمیم‌گیری می‌شود. در این مورد فاز دوم که حداقل یک یا دو سال قبل از لرزه‌خیزی القایی آغاز می‌شود، به اجرا در می‌آید. مهم‌ترین هدف این فاز نصب یک شبکه لرزه‌نگاری دائمی و اقدامات دیگری از قبیل ترازبندی دقیق، استفاده از ابزاربندی برای شناسایی حرکات گسل فعال و مطالعات پایداری شیب‌های سنگی ناپایدار مشرف به مخزن است.

از آن‌جا که رکوردهای اندکی از تغییرات لرزه‌خیزی در اثر زمین‌لرزه‌های القایی مخزن وجود دارد، استفاده از تجهیزات ثبت خردلرزه‌ها با هدف محاسبه پارامترهای کانونی (تعیین محل رومرکز، ژرفا، دوام<sup>۱</sup> و سرعت انتشار) از مهم‌ترین اقدامات به شمار می‌رود.

نصب و طراحی چنین شبکه‌ای نیاز به رویارویی با مشکلات فنی و اقتصادی دارد. در محاسبه پارامترهای کانونی پیش گفته، باید از خطا اجتناب گردد.

منابع اصلی خطا عبارتند از:

الف- عدم نگهداری زمان دقیق: محاسبه فاصله تا رومرکز بسیار مهم است. هر هنگام که سیگنال زمان رادیویی در دسترس باشد، باید مورد استفاده قرار گیرد حتی اگر هزینه سخت افزار را افزایش دهد. در غیر این صورت، باید توجه نمود که سامانه‌ای که برای زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای دقت حداقل یک دهم ثانیه باشد تا خطای تعیین فاصله تا رومرکز بیش از یک کیلومتر نشود.

ب- نسبت سیگنال به نوفه پایین: از مکان‌های دارای تراز نوفه بالا، اعم از طبیعی یا انسان‌ساخت باید اجتناب شود. از آن‌جا که رکوردهای زمین‌لرزه معمولا در ترازهای پایین آغاز می‌شوند و به تدریج افزایش می‌یابند، حضور نوفه، تشخیص ورود واقعی امواج اولیه (P) ابتدایی را که به آهستگی از نوفه زمینه جدا می‌شوند، مشکل‌تر می‌سازد.

ج- عدم شناخت از سرعت‌های انتشار در لایه‌های پوسته: این مورد یک مانع بسیار مهم است به طوری که تعیین محل کانون تقریبا غیرممکن می‌شود. این اطلاعات را می‌توان از طریق سونداژ لرزه‌ای عمیق در امتداد ۳ یا ۴ پروفیل در یک منطقه چند ده کیلومتری از مخزن به دست آورد. این روش بسیار پرهزینه است. روش دیگر برای گردآوری این اطلاعات، استفاده از



رکوردهای ارتعاشی تولید شده در اثر مواد انفجاری در هنگام ساخت سد است. این روش دارای هزینه بسیار کم‌تری است مشروط بر آن که تجهیزات در هنگام ساخت به سرعت در دسترس قرار گیرند. برای تعیین محل و تعداد ایستگاه‌های لرزه‌نگاری می‌توان به تعدادی از قوانین اشاره نمود. به عنوان یک قانون کلی می‌توان گفت که بهتر است حتی با تنها یک مولفه قائم، همیشه تعداد ایستگاه‌ها زیاد باشد، تا آن که تعداد ایستگاه‌ها کم‌تر ولی با سه مولفه باشند.

از آن‌جا که زمین‌لرزه‌های القایی به احتمال زیاد در نزدیکی عمیق‌ترین قسمت مخزن روی می‌دهند، ایستگاه‌های لرزه‌ای باید در اطراف این قسمت قرار داده شوند. به منظور برآورد قابل اعتماد از پارامترهای کانونی تعداد حداقل پنج ایستگاه مورد نیاز است. با این حال، همان‌طور که جنبه‌های اقتصادی مهم می‌باشند، تعداد ایستگاه‌های کم‌تری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر قرار باشد تنها یک ایستگاه وجود داشته باشد، باید از نوع سه مولفه‌ای باشد تا تعیین محل رومرکز با تقریب نسبتاً خوبی انجام شود. استفاده از دو ایستگاه در طرفین مخزن، حتی اگر امکان محاسبه دقیق محل‌های رومرکز را فراهم نیاورد، کمک می‌کند تا آغاز جنبش از نوفه زمینه تشخیص داده شود. یک شبکه سه ایستگاهی که یک مثلث با اضلاع در حدود اندازه بیشینه عرض مخزن تشکیل دهد، این امکان را فراهم می‌کند که چنانچه رومرکزها در داخل شبکه قرار داشته باشند به خوبی تعیین محل شوند. سامانه پایش همچنین باید در همبستگی با نیازهای پهنه‌بندی زلزله‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد.

یک یا دو ایستگاه لرزه‌ای باید لرزه‌سنج‌های با ضریب بزرگ‌نمایی<sup>۱</sup> پایین داشته باشند تا بتوان زمین‌لرزه‌های با دامنه متوسط را که در نهایت دستگاه‌های با ضریب بزرگ‌نمایی بالا را اشباع می‌کنند، اندازه‌گیری نمود. با این ترتیب بین این رکوردها و رکوردهای دستگاه‌های شتاب‌نگار نصب شده در خود سد می‌تواند ارتباط وجود داشته باشد.

## ۲-۱-۳-۶- تعداد مولفه‌ها و جهت قرارگیری آن‌ها در هر ایستگاه شبکه

به منظور مطالعات دقیق در هر ایستگاه، برای اندازه‌گیری جنبش زمین از لرزه‌سنج‌های سه مولفه‌ای استفاده می‌شود. ولی برای مطالعات عمومی‌تر می‌توان از یک لرزه‌سنج، ترجیحاً با مولفه Z (حرکت بالا و پایین) استفاده کرد. در چنین شرایطی توصیه می‌شود که برای ایستگاه مرکزی که در نزدیکی محل سد قرار دارد از یک لرزه‌سنج سه مولفه‌ای استفاده شود. جهت قرارگیری مولفه‌های افقی باید خاوری-باختری و شمالی-جنوبی باشد.

## ۲-۱-۳-۷- انتخاب لرزه‌نگارها بر پایه حساسیت شبکه

لرزه‌سنج‌ها در گستره سدها از نوع با دوره تناوب کوتاه<sup>۲</sup> که در همه ایستگاه‌ها شبیه هم‌اند انتخاب می‌شوند. این نوع لرزه‌سنج‌ها دارای بزرگ‌نمایی<sup>۳</sup> برای حداکثر تقویت‌اند و برای دوره‌های تناوب (پریودهای) حرکت زمین در محدوده یک ثانیه طراحی شده‌اند.

- 1- Gain
- 2- Short Period
- 3- Amplification



جدول ۲-۱- حداقل فاصله از چشمه نوفه تا ایستگاه لوزه‌نگاری

ردیف	چشمه نوفه	لوزه‌سنج بر روی سنگ سخت			لوزه‌سنج بر روی رس سخت و مخروط افکنه سخت		
		فاصله (کیلومتر)			فاصله (کیلومتر)		
		C	B	A	C	B	A
۱	آبشارهای بزرگ جریان‌های شدید بر روی سدهای بزرگ	۴۰ c	۱۰	۵۰	۵	۱۵	۵۰
		۶۰ d	۱۵	۱۰۰	۵	۲۵	۱۰۰
۲	خطوط نفت و گاز	۲۰ c	۱۰	۳۰	۵	۱۵	۳۰
		۱۰۰ d	۳۰	۱۰۰	۱۰	۳۰	۱۰۰
۳	دریاچه‌های کوچک	۲۰ c	۱۰	۲۰	۱	۱۰	۲۰
		۵۰ d	۱۵	۵۰	۱	۱۵	۵۰
۴	ماشین‌های دورانی نیروگاه‌های برق و سنگ‌شکن‌ها و غیره	۱۵ c	۳	۲۰	۱	۵	۲۰
		۲۵ d	۵	۴۰	۱	۱۵	۴۰
۵	آبشارهای کوچک، جریان رودخانه و جریان‌های متناوب بر روی سدهای بزرگ	۵ c	۲	۱۵	۰	۵	۱۵
		۱۵ d	۳	۲۵	۱	۸	۲۵
۶	خطوط راه آهن	۶ c	۳	۱۰	۱	۵	۱۰
		۱۵ d	۵	۲۰	۱	۱۰	۲۰
۷	فرودگاه‌ها و ترافیک سنگین هوایی	۶ c	۳	۶	۱	۳	۶
۸	ماشین‌آلات غیردورانی نیروگاه‌های برق و ماشین‌آلات صنعتی	۲ c	۰/۵	۱۰	۰/۱	۴	۱۰
		۴ d	۱	۱۵	۰/۲	۶	۱۵
۹	ترافیک شلوغ و ممتد بزرگراه‌ها، مزارع مکانیزه	۱	۰/۳	۶	۰/۱	۱	۶
۱۰	ساختمان‌های بلند و راه‌های شهری	۰/۳	۰/۲	۲	۰/۰۵	۱	۲
۱۱	ساختمان‌های کوتاه و درختان بلند	۰/۱	۰/۰۳	۰/۳	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۳
۱۲	درختان کوتاه، سنگ‌های بزرگ، حصارها و علفزارهای بلند	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۱	۰/۰۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱

A- بهره دستگاه = ۲۰۰۰۰۰ هرتر

B- بهره دستگاه = ۵۰۰۰۰۰ - ۱۵۰۰۰۰ هرتر

C- بهره دستگاه کم‌تر از ۲۵۰۰۰ هرتر

c- چشمه و لوزه‌سنج بر روی سازندهای متفاوت (با رشته کوه‌ها یا دره‌های آبرفتی) قرار دارند.

d- چشمه و لوزه‌سنج بر روی سازندهای یکسان (بدون رشته کوه‌ها یا دره‌های آبرفتی) قرار دارند.

## ۲-۱-۳-۸- ویژگی‌های ساختمان و محل استقرار دستگاه لوزه‌سنج

همان‌طور که اشاره شد بهترین شرایط برای انتخاب محل یک ایستگاه از نظر زمین‌شناسی سازندهای بسیار سخت است که از نظر زمین‌ساختی تا حد امکان یک پارچه با وزن مخصوص بالا و عاری از گسل، غیرهوازده و بلورین و غیرآبرفتی باشد و حالت نامطلوب آن شامل زمین‌های نرم با وزن مخصوص کم، خرد شده و فرسایش یافته و هوازده است.

همچنین شرایط مطلوب از نظر جغرافیایی نواحی هموار و تا حد امکان عاری از پستی و بلندی، جنگل، مخازن آب و جاده‌های

اصلی و فرعی و غیره است. شرایط نامطلوب، شامل نواحی با بیش از سه نوع از ویژگی‌های ذکر شده در رده‌بندی مطلوب است.

از نظر موقعیت اجتماعی، حالت مطلوب شامل مناطق با تراکم جمعیت کم و دور از مراکز صنایع سنگین و برج‌های انتقال نیرو و ... است و حالت نامطلوب، مناطق با تراکم جمعیت زیاد و نزدیک به مراکز صنایع سنگین و برج‌های انتقال نیرو می‌باشد. سازه محافظ دستگاه نباید هیچ‌گونه ارتباطی با پی محل استقرار دستگاه داشته باشد. در صورتی که نیاز به فضای مناسب و کافی (اتاق کوچک) برای استقرار تجهیزاتی از قبیل باتری، شارژر و ... در محل باشد، باید سازه مربوط حتی الامکان به صورت استوانه‌ای شکل طراحی شود.

### ۲-۱-۳-۹- چگونگی جمع‌آوری داده‌های ایستگاه‌های شبکه و انتخاب ایستگاه مرجع

ثبت لرزه‌ها توسط دستگاه‌هایی به نام لرزه‌نگار انجام می‌شود که مهم‌ترین قسمت‌های آن لرزه‌سنج، تقویت کننده و ثبات است. یک یا چند لرزه‌سنج در مناطقی به نام ایستگاه لرزه‌نگاری و مجموعه چند ایستگاه لرزه‌نگاری در یک منطقه، شبکه لرزه‌نگاری را به وجود می‌آورند.

ثبت زمین‌لرزه‌ها با لرزه‌نگارهای مانسته (آنالوگ) و یا رقمی (دیجیتال) انجام می‌شود. تمام لرزه‌نگارهای رقمی امروزی امکان دسترسی به نگاشت‌های رقمی فوری را (به منظور بازنگری و تحلیل برای کارشناسان) از طریق ارسال مستقیم، خط تلفن و یا اینترنت در هر نقطه‌ای فراهم آورده است. اطلاعات را می‌توان بلافاصله پس از رویداد یک زمین‌لرزه از راه دور مورد بررسی قرار داد و محاسبات لازم را انجام داد.

علاوه بر محل‌های مناسبی که در مرحله تدارکاتی انتخاب شده‌اند، به یک ایستگاه مرجع نیز نیاز می‌باشد تا داده‌های ثبت شده در محل‌های انتخاب شده با آن مقایسه شوند. ایستگاه مرجع باید در نقطه‌ای امن و دور از رفت و آمد و تا حد امکان آرام باشد.

### ۲-۱-۳-۱۰- سامانه تحویل داده‌ها

لرزه‌سنج‌ها در گستره سدها از نوع دامنه نوسان کوتاه انتخاب می‌شوند. این نوع لرزه‌سنج‌ها دارای بزرگ‌نمایی برای حداکثر تقویت بوده و برای دوره‌های (پریودهای) حرکت زمین در محدوده یک ثانیه طراحی شده‌اند. ثبات‌ها نیز به دو نوع عمده مانسته و رقمی تقسیم می‌شوند.

ثبت زمین‌لرزه‌ها با لرزه‌نگارهای مانسته هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد اما مزایای مهم لرزه‌نگارهای رقمی عبارتند از:

- قابلیت تبدیل لرزه‌نگار رقمی به مانسته در برابر عدم امکان تبدیل مانسته به رقمی
- قابلیت تغییر مقیاس زمان در مطالعه فازهای لرزه‌نگاشت رقمی
- قابلیت بزرگ‌نمایی دامنه و به عکس در لرزه‌نگاشت رقمی
- قابلیت مطالعه دقیق‌تر توزیع فرکانس و دامنه لرزه‌نگاشت با استفاده از برنامه‌های فراوان آنالیز عددی
- قابلیت فیلتر کردن با پارامترهای مختلف انواع فیلترهای رقمی برای بالا بردن سطح نسبی سیگنال به نوفه
- مطالعه سطح نوفه ایستگاه در لرزه‌نگارهای رقمی
- جمع‌آوری تعداد زیادی از لرزه‌نگاشت‌ها در حجم خیلی کم
- جمع‌آوری هم‌زمان لرزه‌نگاشت مولفه‌های چند ایستگاه با یکدیگر





- سرعت عمل در ارسال اطلاعات از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر توسط امکانات مخابراتی، تلفنی و ماهواره‌ای

## ۲-۱-۴- تهیه گزارش ادواری

در یک شبکه لرزه‌نگاری کارهای مختلف به صورت گزارش‌های روزانه، ماهانه، فصلی، شش ماهه و یک ساله تهیه می‌شود. گزارش کارهای یک ساله در سطح وسیع و گزارش کارهای فصلی و شش ماهه در سطح کم‌تری برای اطلاع توزیع می‌شود.

### الف- کارهای روزانه عبارتند از

- محاسبه پارامترهای زمین‌لرزه‌های ۲۴ ساعت گذشته
- اضافه کردن جدول وضعیت کارکرد ایستگاه‌ها در دفترچه روزانه
- تماس با سایر شبکه‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات بیش‌تر، در صورت نیاز
- گزارش به مقامات مسوول در صورت وجود زمین‌لرزه قابل توجه، یا تعداد قابل توجهی زمین‌لرزه در یک منطقه کوچک
- جدا کردن رکوردها از لرزه‌های مصنوعی، مانند انفجارهای محلی
- تدارک برنامه جدول‌های مربوط به کارهای روزانه دیگر
- کار بر روی جدول‌های مربوط به کارهای متداول ماهانه، فصلی، شش ماهه و یک ساله

### ب- کارهای ماهانه عبارتند از

- تهیه کاتالوگ ماهانه
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های ماهانه
- تهیه نمودار ماهانه کارکرد ایستگاه‌ها
- بازدیدهای ماهانه هر ایستگاه و کنترل ایستگاه‌ها در مورد وسایل و ابزار ایستگاه‌ها و ساختمان آن
- حفظ و نگهداری زمین‌لرزه‌های یک ماه قبل به میلادی در فایل یا فایل‌های مطمئن

### ج- کارهای فصلی عبارتند از

- تهیه کاتالوگ سه ماهه
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های سه ماهه
- تهیه نمودار فراوانی زمین‌لرزه‌ها در سه ماه

### د- کارهای شش ماهه عبارتند از

- تهیه کاتالوگ شش ماهه
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های شش ماهه
- تهیه نمودار فراوانی زمین‌لرزه‌ها در شش ماهه



- واسنجی<sup>۱</sup> لرزه‌سنج‌ها و تهیه پاسخ آن‌ها
- تهیه گزارش از واسنجی کردن دستگاه‌ها

### ه- کارهای یک ساله

در هر سال به صورت کلی یک گزارش کامل از کارکرد شبکه باید تهیه شود که شامل موارد زیر است:

- تهیه کاتالوگ یک ساله
- تهیه گزارش کارکرد یک ساله ایستگاه‌ها و بازدیدها
- تهیه گزارش یک ساله پاسخ دستگاه‌ها و واسنجی آن‌ها

### و- گزارش یک ساله لرزه‌خیزی

در گزارش یک ساله لرزه‌خیزی ضمن شرح مختصری از نوع ایستگاه‌ها و لرزه‌سنج‌ها، گزارشی که شامل شکل‌های زیر همراه شرح و تفصیل آن‌ها است، ارائه می‌شود. این گزارش در نهایت به تعداد مورد لزوم تکثیر و توزیع می‌شود. این گزارش باید حاوی مطالب زیر باشد:

- مدل سرعتی برای لایه‌های مختلف پوسته زمین منطقه
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها در محدوده سد (به عنوان مثال، محدوده ۳۰ کیلومتری سد)
- نقشه گسل‌های منطقه
- نقشه موقعیت ایستگاه‌ها
- نقشه لرزه زمین‌ساخت منطقه (به عنوان مثال، گستره ۱۰۰ کیلومتری سد)
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها در منطقه (به عنوان مثال، گستره ۱۰۰ کیلومتری سد)
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها بر حسب بزرگای طی یک سال
- نقشه سه بعدی زمین‌لرزه‌ها
- نقشه مقاطع خاص از زمین‌لرزه‌ها در منطقه
- توزیع زمین‌لرزه‌ها بر حسب عمق طی یک سال
- نمودار رابطه گوتنبرگ-ریشتر
- نمودار تجمعی زمین‌لرزه‌ها طی یک سال
- شکل و تهیه رابطه بین  $M_L$  و  $m_b$
- نقشه توزیع تخلیه انرژی زمین‌لرزه‌ها
- نمودار سطح دریاچه در طی یک سال
- منحنی سطح آب دریاچه با منحنی تجمعی زمین‌لرزه‌ها



- منحنی سطح آب دریاچه با منحنی تجمعی تخلیه انرژی زمین‌لرزه‌ها
- تحلیل و تفسیر داده‌های خردلرزه ای و اطلاعات به دست آمده
- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

پس از رویداد هر زمین‌لرزه شدید در نزدیکی محل سد و ثبت آن توسط دستگاه‌های لرزه‌نگار نصب شده در محل و گستره مورد مطالعه، باید به سرعت پردازش‌های لازم صورت گیرد. در صورتی که زلزله به شدت در محل احساس شده باشد باید نتایج آن به مدیر سد گزارش شود، تا در صورت صلاحدید اقدامات اضطراری را به عمل آورد.

از طرف دیگر باید گزارشی مشتمل بر شرح مختصری از نوع ایستگاه‌ها، بزرگا، مختصات، سازوکار و ژرفای کانونی زمین‌لرزه و دوری و نزدیکی محل به گسل، مشخص و همراه شرح و تفصیل آن‌ها ارائه شود. این گزارش در نهایت به تعداد مورد نیاز تکثیر و توزیع می‌شود.

داده‌ها و نتایج پردازش شده مجموعه‌ای از لرزه نگاشت‌های یک زمین‌لرزه خاص بر روی نوار مغناطیسی، دیسک یا لوح فشرده بایگانی می‌شوند و یک کپی از آن باید برای مهندسان مشاور مربوط ارسال شود.

## ۲-۲- نصب و بهره‌برداری از شبکه پایش لرزه‌نگاری

### ۲-۲-۱- هدف

هدف از نصب دستگاه‌های لرزه‌نگار محاسبه مختصات مرکز، بزرگا، عمق، ساز و کار و زمان دقیق رویدادهای لرزه‌ای است که معمولاً برای بررسی پایش زلزله‌خیزی محدوده سدها و در مناطقی که لرزه‌خیز است در نظر می‌گیرند.

### ۲-۲-۲- دامنه کاربرد

این فصل اطلاعات تجهیزیات مورد نیاز شبکه لرزه‌نگاری پایش لرزه‌ای سدها را در بر می‌گیرد. جنبه‌های مختلف شبکه لرزه‌نگاری از قبیل طراحی، نصب، بهره‌برداری و همچنین گزارش‌دهی از نتایج قرائت‌ها موردنظر این راهنما است.

### ۲-۲-۳- انواع دستگاه‌های لرزه‌نگار

دستگاه‌های لرزه‌سنج یا لرزه‌نگار برای پایش لرزه‌خیزی منطقه خاصی نصب می‌شوند و به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که برای هر کدام برنامه کاری متفاوتی تعریف می‌شود.

لرزه‌سنج‌های در گستره سدها از نوع دامنه نوسان کوتاه<sup>۱</sup> انتخاب می‌شوند. این نوع لرزه‌سنج‌ها دارای بزرگ‌نمایی<sup>۲</sup> برای حداکثر تقویت بوده و برای دوره‌های تناوب (پریودهای) حرکت زمین در محدوده یک ثانیه، طراحی شده‌اند. ثبات‌ها نیز به دو نوع عمده مانسته و رقمی تقسیم می‌شوند.



1- Short period  
2- Amplification

### ۲-۳-۲-۱- مشخصات فنی و فیزیکی دستگاه‌ها

در بند ۲-۲-۱۰ شرح داده شده است.

### ۲-۳-۲-۲- ویژگی‌های اجزای دستگاه‌ها

در بندهای ۲-۳-۱-۲ و ۴-۳-۱-۲ و ۵-۳-۱-۲ ارائه شده است.

### ۲-۳-۲-۳- گزینش نوع دستگاه

لرزه‌نگارهای نصب شده در گستره سدها از دو نوع مانسته (آنالوگ) و رقمی (دیجیتال) تشکیل می‌شوند. ثبت زمین‌لرزه‌ها با لرزه‌نگارهای مانسته هنوز انجام می‌گیرد. مزایای مهم لرزه‌نگارهای رقمی در بخش ۲-۳-۱-۱۱ «سامانه تحصیل داده‌ها» بطور کامل آورده شده است.

### ۲-۳-۲-۴- دستگاه‌های مانسته

ثبت زمین‌لرزه‌ها با لرزه‌نگارهای مانسته هنوز در بعضی از مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع دستگاه‌ها دامنه لرزه ورودی به طور متوالی بر روی کاغذهای مخصوصی چاپ می‌شود. در صورتی که لرزه‌ای نیز اتفاق نیفتاده باشد دستگاه همچنان فعال بوده و به ثبت ادامه می‌دهد. دریافت و ثبت زمان در لرزه‌نگارها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، اغلب دستگاه‌های مانسته از ساعت‌های کریستالی که ممکن است در ماه در حد یک ثانیه خطا داشته باشد، استفاده می‌کنند. لزوم هم‌زمانی ایستگاه‌ها با یکدیگر ایجاب می‌کند که ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری از ایستگاه رادیویی واحدی برای ثبت زمان استفاده کنند. در حال حاضر امکان استفاده از جایاب (GPS) برای ثبت زمان، دقت ثبت زمان را بسیار بالا برده است.

مهم‌ترین پارامترهای یک لرزه‌نگاشت که توسط دستگاه‌های لرزه‌نگار مانسته ثبت می‌شود حاوی مشخصات زیر است:

- نام شبکه لرزه‌نگاری
  - نام ایستگاه با مختصات دقیق طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع آن که قبلاً باید تعیین شده باشد.
  - نام اختصاری کد ایستگاه
  - تاریخ ثبت نگاشت (تاریخ میلادی)
  - زمان شروع نگاشت (روز، ساعت، دقیقه و ثانیه به وقت بین‌المللی)
  - زمان پایان نگاشت (روز، ساعت، دقیقه و ثانیه به وقت بین‌المللی)
  - نام مولفه جنبش زمین (E-W, N-S, Z)
  - نوع لرزه‌سنج و لرزه‌نگار
  - نوع فیلتر و میزان تقویت ثبت (ویژه مانسته)
  - خطای زمانی شروع و خطای زمانی ختم نگاشت (برای حالتی که از ساعت استاندارد استفاده نشده باشد).
- توصیه می‌شود برای هر ایستگاه کارت چاپ شده و یا مهر مخصوص تهیه شود و صرفاً برخی از مشخصات که روزانه تغییر می‌کند در جای خالی آن نوشته شود. نمونه‌ای از مهر یا برچسب در جدول (۲-۲) آمده است.



جدول ۲-۲- نمونه‌ای از برچسب روزانه مشخصات ایستگاه

شبکه لرزه‌نگاری سد:	
ایستگاه:	
تاریخ (میلادی):	نوع لرزه‌سنج سامانه:
نوع فیلتر:	تقویت:
زمان شروع:	خطای زمانی (GMT):
زمان پایان:	خطای زمانی:

## ۲-۲-۳-۵- دستگاه‌های رقمی

دستگاه‌های رقمی در برگیرنده لرزه‌نگاشت‌های رقمی‌اند که معمولاً فایل رایانه‌ای است که از سه قسمت عنوان<sup>۱</sup>، داده<sup>۲</sup> و زیرنویس<sup>۳</sup> تشکیل شده است.

در قسمت عنوان در هر سطر اطلاعات به ترتیبی که برنامه تعیین می‌کند ضبط می‌شود. مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: نام شبکه، نام ایستگاه، مختصات جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و تاریخ روز به میلادی، آهنگ نمونه‌برداری در ثانیه، ضریب واحد اندازه‌گیری، نوع اندازه‌گیری (جابه‌جایی، سرعت، یا شتاب) تعداد نمونه‌ها، لحظه زمان اولین داده، لحظه زمان آخرین داده، نوع لرزه‌سنج و مبدل‌بندی رقمی، فایل معرف پاسخ تکان سامانه<sup>۴</sup> در قسمت داده، در هر سطح صرفاً اعدادی ظاهر می‌شوند که تعداد آن‌ها قبلاً در عنوان آمده است و عملاً لرزه‌نگاشت را همین اعداد درست می‌کند.

در قسمت فوتو: بسته به شکل‌بندی که برنامه‌نویس تعیین کرده است، ممکن است برخی از یادداشتهای ضروری نظیر این که این داده‌ها از انفجار خاص یا آزمایشی خاص به دست آمده است منعکس می‌شود که در قسمت پایانی فایل قرار گیرد.

نگاشت یک زمین‌لرزه عموماً از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

- نگاشت قبل از زمین‌لرزه که سطح نوفه ایستگاه را نشان می‌دهد.
- گروه امواج P، گروه امواج S و امواج سطحی
- دنباله نگاشت و انتهای نگاشت

مهم‌ترین اطلاعاتی که باید از یک لرزه‌نگاشت استخراج شود، عبارتند از:

- تشخیص اولین زمان رسیدن موج P با دقت لازم
- تشخیص اولین زمان رسیدن موج S
- تشخیص قطبش فاز P در نگاشت
- تشخیص بیش‌ترین نسبت دامنه به پریود  $\frac{A}{T}$  در نگاشت برای محاسبه بزرگا

- 1- Header
- 2- Data
- 3- Footer
- 4- Impuls response



### ۲-۲-۳-۶- قابلیت انواع مختلف دستگاه‌ها

همان‌گونه که در بند ۲-۲-۳-۳ بالا نیز مطرح شد ثبت زمین‌لرزه‌ها با لرزه‌نگارهای رقمی از قابلیت و مزایای مهمی برخوردار است. در این ارتباط به منظور جلوگیری از تکرار مطلب، موارد مطرح شده در بند ۲-۲-۳-۳ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

### ۲-۲-۴- نصب دستگاه‌ها

این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اجرای مطلوب آن در گرو عملکرد درست کارکنان با دستگاه‌های لرزه‌سنجی و شناسایی بهترین نقاط اندازه‌گیری است. ابتدا باید محل‌های مستعدی را که در مرحله تدارکاتی مشخص شده‌اند بر اساس سازندهای زمین‌شناسی شناسایی کرد. سپس با توجه به وسعت محل، سعی در یافتن بهترین نقطه نمود. بهترین نقطه جایی دور و ایمن از نوفه‌های مصنوعی و طبیعی مانند هر نوع جاده، آب‌های روان، باد و باران و غیره است.

پس از انتخاب محل‌های مستعد باید در آن مناطق مطالعات نوفه‌سنجی انجام شود. در صورتی که سطح نوفه پایین تشخیص داده شود می‌توان مراحل بعدی را ادامه داد، در غیر این صورت باید مناطق دیگری انتخاب شود.

مطالعات نوفه‌سنجی توسط دستگاه‌های لرزه‌نگاری سیار پس از نصب انجام می‌شود و در ساعات مختلف روز (در راس هر ساعتی) و در هر مرحله برای مدت حداقل یک دقیقه به طور هم‌زمان با پایگاه مرجع، نوفه‌های محیطی نمونه‌برداری می‌شود. توضیح این که در هنگام نوفه‌برداری علاوه بر محل‌های مناسبی که در مرحله تدارکاتی انتخاب شده‌اند، نیاز به یک ایستگاه مرجع نیز می‌باشد تا داده‌های ثبت شده در محل‌های انتخاب شده با آن مقایسه شوند. ایستگاه مرجع باید بر روی سنگ سخت و در نقطه‌ای امن و دور از رفت و آمد و تا حد امکان آرام باشد.

### ۲-۲-۴-۱- محل نصب

محل نصب با توجه به برنامه زمان‌بندی شده و با توجه به شرایط اقلیمی (آب و هوایی) انتخاب می‌شود. بدین ترتیب افراد می‌توانند مطالعات خود را با حداقل مشکلات پیش ببرند. به منظور شناخت منطقه و نحوه تقسیم‌بندی آن به قسمت‌های مطلوب و نامطلوب، باید منطقه را با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی شامل مراکز جمعیتی، راه‌ها و نقشه‌های توپوگرافی مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. جمع‌آوری کلیه اطلاعات موجود مانند نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، راه‌ها و عکس‌های هوایی اجازه خواهند داد تا ارزیابی اولیه خوبی از منطقه صورت گیرد. مطالعات نوفه‌سنجی قبل از نهایی کردن محل و نصب دستگاه‌ها باید انجام شود.

### ۲-۲-۴-۲- شالوده و نحوه نصب دستگاه‌ها به زمین

بهترین شرایط برای شالوده دستگاه‌ها، نصب آن‌ها بر روی سازندهای بسیار سخت است که از نظر زمین‌ساختی تا حد امکان یک‌پارچه با وزن مخصوص بالا و عاری از گسل، غیرهوازده و بلورین و غیرآبرفتی باشد. حالت نامطلوب آن شامل سازندهای نرم با وزن مخصوص کم، خرد شده و فرسایش یافته و هوازده است. حفر گودالی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ سانتی‌متر و به عمق ۶۰ سانتی‌متر در داخل سنگ سالم سخت به منظور نصب لرزه‌نگار پیشنهاد می‌شود.



در صورتی که در محل پیشنهادی لایه کم ضخامت آبرفتی و یا سنگ خرد شده و هوازده وجود داشته باشد، باید این گونه سازندهای زمین‌شناسی برداشته شود و سپس لرزه‌نگار به روی زمین سخت نصب شود.

#### ۲-۲-۳- جهت نصب دستگاهها

برای مطالعات دقیق‌تر در تمامی و یا تعداد محدودی از ایستگاه‌ها از لرزه‌نگارهای سه مولفه‌ای به منظور ثبت جنبش زمین استفاده می‌شود. ولی به طور کلی می‌توان در هر ایستگاه از یک لرزه‌سنج، ترجیحاً مولفه Z (حرکت بالا و پایین) استفاده نمود. لرزه‌سنج‌ها باید کاملاً بر روی سطوح سنگی هموار و تراز نصب شوند. در صورتی که از لرزه‌سنج‌های سه مولفه‌ای استفاده شود، تاکید می‌شود که مولفه‌های افقی در راستای شمالی- جنوبی و خاوری- باختری نصب شوند.

#### ۲-۲-۴- قاب محافظ ایستگاهها

نصب دستگاه‌های لرزه‌سنج باید بر روی سازندهای بسیار سخت انجام شود. حفر گودالی به ابعاد  $100 \times 100$  سانتی‌متر و به عمق ۶۰ سانتی‌متر در داخل سنگ سالم و سخت به منظور نصب لرزه‌نگار پیشنهاد می‌شود. پوشش گودال توسط یک قاب محافظ و در شرایطی که سطح آن بالاتر از سطح زمین باشد، ضروری است. بدین طریق از ورود آب باران و ذوب برف به داخل گودال جلوگیری می‌شود. ایجاد یک سکوی بتنی بر روی سنگ سالم به ابعاد  $100 \times 100$  سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر نیز مناسب است. در صورتی که از قاب محافظ استفاده شود، به جای حفر گودال می‌توان از سکوهایی بتنی که پی آن‌ها به سنگ سخت متصل است استفاده نمود. سکوهایی بتنی معمولاً طوری ساخته می‌شوند که سطح فوقانی‌شان کمی بالاتر از زمین قرار گیرند. بنابراین دستگاه‌ها باید از کف فاصله داشته باشند و ترجیحاً روی سکوهایی بالاتر از سطح زمین قرار گیرند. اندازه این سکوها باید طوری باشد که فرکانس طبیعی‌شان بیش‌تر از فرکانس لرزه‌سنج‌ها باشد تا در نتیجه بر روی نگاشت‌های ثبت شده دستگاه اثری نگذارند. برای جلوگیری از تراوش آب احتمالی و به حداقل رساندن غلظت هوا، زهکشی و تهویه مناسب ضروری است. این عمل را می‌توان با تعبیه روزنه‌ای در کف حفره و به منظور خروج آب‌های نفوذی احتمالی انجام داد. بر روی قاب محافظ باید منافذی جهت ایجاد جریان هوا و خنک کردن تعبیه شود. به منظور جلوگیری از ورود حشرات و گرد و غبار به داخل این منافذ باید از توری و فیلتر استفاده شود. در هنگام گرم بودن شدید هوا قاب محافظ باید دارای تهویه قابل اطمینان باشد، درحالی‌که در جاهایی درجه حرارت به زیر نقطه انجماد برسد، احتمالاً به عایق‌بندی مناسب برای قاب محافظ نیاز است. در بعضی مکان‌ها، قاب‌های محافظ به وسیله بخاری‌های الکتریکی گرم می‌شوند که این بخاری‌ها به خشک نگه داشتن محیط تجهیزات نیز کمک می‌کنند. ساختگاه‌های زیادی وجود دارند که هر دو جریان سرد و گرم در آن‌ها جریان دارند، در این نواحی قاب‌های محافظ را می‌توان به طور فیزیکی تحت هر دو شرایط در طی بازدیدهای معمول نگهداری، تنظیم نمود (باز و بسته کردن منافذ، افزودن یا کاستن عایق).

به منظور ایمنی بیش‌تر و یا در صورت تمایل برای قرار دادن تجهیزات دیگری مانند باتری، شارژر و ... در داخل گودال، بهتر است اتاقک استوانه شکل کوچکی به قطر حدود ۲-۳ متر ساخته شود. بهتر است از نظر ایمنی ارتفاع اتاقک بیش از سه متر در نظر گرفته شود. همچنین باید سعی شود پی اتاقک با گودال یا سکوی مذکور مرتبط نباشد.



### ۲-۲-۴-۵- خصوصیات فیزیکی و اقلیمی محل نصب دستگاه‌ها

همان‌گونه که در بالا عنوان شد بهترین شرایط برای نصب دستگاه‌های لرزه‌سنج سازندهای بسیار سخت است که از نظر زمین‌ساختی تا حد امکان یک پارچه با وزن مخصوص بالا و عاری از گسل، غیرهوازده و بلورین و غیرآبرفتی باشد. از نظر جغرافیایی شرایط مطلوب، شامل نواحی هموار و تا حد امکان عاری از پستی و بلندی، جنگل، مخازن آب و جاده‌های اصلی و فرعی و غیره است. از نظر شرایط اجتماعی حالت مطلوب شامل مناطق با تراکم جمعیت کم و دور از مراکز صنایع سنگین و برج‌های انتقال نیرو و ... بوده و حالت نامطلوب، مناطق با تراکم جمعیت زیاد و نزدیک به مراکز صنایع سنگین و برج‌های انتقال نیرو است. از نصب لرزه‌سنج‌ها بر روی شیب‌های ناپایدار و مکان‌هایی که سقوط سنگ‌ها بتوانند باعث ایجاد خسارت به تجهیزات یا محفظه‌های آن‌ها گردد، باید اجتناب شود. دستگاه‌ها باید در جایی قرار گیرند که از به‌وجود آمدن هرگونه نوفه زمینه جلوگیری گردد.

### ۲-۲-۴-۶- تامین برق مورد نیاز برای بهره‌برداری از دستگاه‌ها

برق مورد نیاز برای بهره‌برداری از دستگاه‌های لرزه‌سنج معمولاً از باتری تامین می‌شود. به منظور اطمینان از کار دستگاه‌ها، باتری‌ها باید در وضعیت شارژ و متصل به منبع خط نیرو یا سلول‌های خورشیدی، نگهداری شوند. دسترسی یا فقدان یک منبع تولید نیروی مناسب می‌تواند بر نحوه قرارگیری دستگاه‌ها اثر بگذارد. اگر خط برق در دسترس نباشد و ملزم به استفاده از سلول‌های خورشیدی باشیم، دستگاه‌ها باید جایی قرار داده شوند که به اندازه کافی در معرض تابش نور خورشید قرار گیرد. ارتباط از طریق «سیم کشی» دارای مشکلات خاصی است. اگر سیم‌ها داخل مجرای خاص قرار داده نشوند، حیوانات جونده می‌توانند خساراتی را به بار آورند. به منظور جلوگیری از آسیب رساندن حیوانات، رفت و آمد و عوامل انسانی، کابل‌ها باید داخل مجاری در درون زمین قرار گیرند و یا دارای پوشش باشند.

### ۲-۲-۵- ملاحظات بهره‌برداری و نگهداری شبکه لرزه‌نگاری

یک شبکه لرزه‌نگاری از حداقل چهار ایستگاه که تقریباً به صورت قرینه در اطراف ساختگاه سد قرار گرفته‌اند تشکیل می‌شود. عموماً ایستگاه پنجم در نزدیکی ساختگاه سد و در مکانی با کم‌ترین نوفه‌های مصنوعی و طبیعی انتخاب می‌شود. موقعیت دقیق جغرافیایی و زمین‌شناسی ایستگاه از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا در هنگام بهره‌برداری و محاسبات تعیین محل زمین‌لرزه‌ها در برنامه‌های رایانه‌ای و سایر محاسبات به کار می‌آید.

### ۲-۲-۵-۱- بهره‌برداری از دستگاه‌های لرزه‌نگاری

مرحله بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اجرای مطلوب آن در گرو عملکرد درست کارکنان با نتایج ثبت شده توسط دستگاه‌های لرزه‌سنج مانسته و یا رقمی است. لرزه‌نگاشت به ثبت رسیده، منحنی تغییرات پاسخ سامانه لرزه‌نگار از جنبش زمین نسبت به زمان در محل ایستگاهی است که لرزه‌سنج در آن قرار گرفته است. این تغییرات ممکن است ناشی از تغییرات فشار هوا بر اثر باد، ترافیک، انفجار یا زمین‌لرزه باشد.





مهم‌ترین هدف از یک لرزه‌نگاشت به ثبت رسیده تشخیص زمان رسیدن انرژی فازهای مختلف یک زمین‌لرزه به ایستگاه است. بنابراین دقت در ثبت و دقت در قرائت زمان، از اهمیت خاصی برخوردار است. هر گونه خطایی در زمان ثبت نگاشت روی لرزه‌نگاشت قرائت فازهای زمین‌لرزه را کم اعتبار خواهد کرد.

### ۲-۲-۵-۲- نگهداری دستگاه‌های مانسته و رقمی

نصب و نگهداری مناسب دستگاه‌های پایش لرزه‌ای در بالا بردن کیفیت و همچنین به کارگیری بهتر نگاشت‌های به دست آمده سودمند خواهد بود. نگهداری مستمر از این دستگاه‌ها ضامن آماده بودن آن‌ها به هنگام رویداد زمین‌لرزه است. بعد از انتخاب مکان‌ها به صورت کلی برای حفاظت از دستگاه‌ها محدودیت‌های ثانویه از قبیل قابلیت دسترسی، رفت و آمد افراد، زهکشی، نیروی برق، ارتعاشات زمینه و غیره مورد توجه قرار می‌گیرند که به تفصیل مطرح شد. دستگاه‌ها نباید در جایی قرار گیرند که ارتعاشاتی مانند تردد افراد و ... باعث به وجود آمدن نوفه زمینه در طی ثبت شوند.

لرزه‌سنج‌ها باید به دقت بر روی پی یا زمین طبیعی قرار گیرند. این کار به طور مستقیم با قرار دادن دستگاه بر روی سنگ یا جایگاه تهیه شده انجام می‌شود که می‌تواند در داخل اتاقک و یا در گالری، تورفتگی‌ها، سکوی بتنی ساخته شده و یا فضای خالی در داخل سنگ سختی باشد که از قبل آماده شده است. به منظور اطمینان از متصل شدن با سنگ پی، این سکو می‌تواند دارای شمع‌های کوتاه باشد که در زمین فرو رفته است. مطلوب‌ترین وضع، استقرار یک مکان بتنی واحد برای پایه‌ها و سکو خواهد بود و آرماتورها از سکو به پایه‌ها امتداد پیدا می‌کنند. سپس دستگاه به سکو (ترجیحاً روی بخش مرکزی بیرون‌زده‌ای که از لحاظ زهکشی دارای اطمینان باشد) مهار می‌شود. این سکوها به منظور ایجاد یک فضای محافظت کننده برای دستگاه ساخته می‌شوند، اندازه این سکوها باید طوری باشد که فرکانس طبیعی‌شان بیش‌تر از فرکانس لرزه‌سنج‌ها باشد تا بر روی نگاشت‌های ثبت شده دستگاه اثری نگذارند. سکوهایی بتنی معمولاً طوری ساخته می‌شوند که سطح فوقانی‌شان کمی بالاتر از زمین قرار گیرد. به منظور اطمینان از کار دستگاه‌ها، باتری‌ها باید در وضعیت شارژ (متصل به منبع خط نیرو یا سلول‌های خورشیدی) نگهداری شوند.

### ۲-۲-۵-۳- محافظت ایستگاه‌ها در برابر خطرهای طبیعی و محیطی

از نصب دستگاه لرزه‌سنج در شیب‌های ناپایدار و مکان‌هایی که سقوط سنگ‌ها بتوانند باعث ایجاد خسارت به تجهیزات یا محفظه‌های آن‌ها شود، باید اجتناب کرد.

قاب محافظ دستگاه باید مطلوب باشد و در برابر آب و هوا و خسارات جزئی مقاوم بوده و دارای فضای کافی برای تجهیزات باشد. یک قاب محافظ سبک وزن با سطح مقطع کوچک از نظر اثر نگذاشتن جنبش‌های اتاقک محافظ بر روی نگاشت دارای اطمینان خواهد بود. بر روی اتاقک محافظ باید منافذی جهت ایجاد جریان هوا و خنک کردن تعبیه شود. در این ارتباط توجه به موارد آورده شده در بند قاب محافظ ایستگاه‌ها ضروری می‌باشد.

### ۲-۲-۶- پشتیبانی فنی در طول بهره‌برداری از دستگاه‌ها

باید توجه داشت که پشتیبانی فنی در طول مدت بهره‌برداری از دستگاه‌ها الزامی است زیرا عدم دسترسی به تجهیزات مورد نیاز باعث از کار افتادن شبکه لرزه‌نگاری می‌شود، بنابراین در هنگام سفارش خرید باید دقت شود که تجهیزات شبکه از تولید کننده‌ای



خریداری شود که دارای نمایندگی در ایران بوده و یا خود سازنده تجهیزات باشد. از این رو تامین تجهیزات مورد نیاز شبکه در مدت زمان بهره‌برداری (حداقل به مدت ۲۰ سال) باید به عنوان یکی از شروط خرید مد نظر قرار گیرد.

### ۲-۲-۷- نرم افزارهای همراه تجهیزات برای پردازش داده‌های حاصل از دستگاه‌ها

در حال حاضر برنامه‌های مختلف رایانه‌ای برای محاسبه پارامترهای زمین لرزه به کار گرفته می‌شود که نمونه‌هایی از آن‌ها LOC و Hypo71 می‌باشند. در تمامی این برنامه‌ها ضرورت دارد که ابتدا مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها و مدل سرعتی پوسته منطقه به آن‌ها معرفی شود، سپس اطلاعات قرائت شده و مشترک یک زمین لرزه از ایستگاه‌های مختلف با شکل‌بندی مشخصی به برنامه داده می‌شود و نتایج محاسبات به شکلی که گفته خواهد شد حاصل می‌آید. توصیه می‌شود که هنگام خرید تجهیزات، سفارش خرید برای نرم‌افزار مربوط نیز داده شود.

### ۲-۲-۸- نحوه گردآوری و پردازش داده‌ها

#### ۲-۲-۸-۱- گردآوری داده‌ها

داده‌های دستگاه‌های لرزه‌سنج به سه روش گردآوری می‌شوند که بستگی به نحوه طراحی شبکه دارد:

- گردآوری داده‌ها در داخل حافظه هر دستگاه و سپس انتقال آن‌ها به وسیله کامپیوترهای دستی و یا خطوط تلفن به محل پردازش
- رکوردگیری و ارسال هم‌زمان داده‌ها به اتاق کنترل مرکزی از طریق خط تلفن
- رکوردگیری و ارسال هم‌زمان داده‌ها به اتاق کنترل مرکزی از طریق سامانه تله‌متری و یا سامانه ماهواره‌ای

#### ۲-۲-۸-۲- پردازش و استفاده از داده‌های ثبت شده

اولین انتظار از یک لرزه‌نگاشت، به دست آوردن اطلاعات اولیه‌ای است که بر مبنای آن‌ها بتوان زمین لرزه مربوط به آن را مشخص نمود. سپس بتوان فازهای مختلف امواج لرزه‌ای هر زمین لرزه را روی نگاشت قرائت کرد. در نهایت با تلفیق این اطلاعات با سایر نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های دیگر، محاسبه محل زمین لرزه ممکن می‌شود.

لرزه‌نگاشت منحنی تغییرات پاسخ سامانه لرزه‌نگار از حرکت زمین برحسب زمان و در محل ایستگاهی است که لرزه‌سنج در آن قرار گرفته است. این تغییرات ممکن است ناشی از تغییرات فشار هوا بر اثر باد، ترافیک، انفجار یا زمین لرزه باشد.

مهم‌ترین هدف از یک لرزه‌نگاشت تشخیص زمان رسیدن انرژی فازهای مختلف یک زمین لرزه به ایستگاه است. بنابراین دقت در ثبت و دقت در قرائت زمان، از اهمیت خاصی برخوردار است. هر گونه خطایی در زمان ثبت نگاشت، روی لرزه‌نگاشت، قرائت فازهای زمین لرزه را کم اعتبار خواهد کرد. نگاشت یک زمین لرزه معمولاً از قسمت‌های زیر تشکیل می‌شود:

- نگاشت قبل از زمین لرزه که سطح نوفه ایستگاه را نشان می‌دهد.
- گروه امواج P، گروه امواج S و امواج سطحی
- دنباله نگاشت و انتهای نگاشت

مهم‌ترین اطلاعاتی که باید از یک لرزه‌نگاشت استخراج شود عبارتند از:



- تشخیص اولین زمان رسیدن موج P با دقت لازم
- تشخیص اولین زمان رسیدن موج S
- تشخیص قطبش فاز P در نگاشت
- تشخیص بیشترین نسبت دامنه به پریود  $\frac{A}{T}$  در نگاشت برای محاسبه بزرگا

شناخت محل واقعی و زمان وقوع یک زمین‌لرزه هدف اولیه ایستگاه‌ها و شبکه‌های لرزه‌نگاری است. اطلاعات حاصل از کلیه لرزه‌نگاشت‌ها که از یک زمین‌لرزه به دست آمده می‌تواند با محاسبات دستی یا محاسبات رایانه‌ای انجام شود. حداقل اطلاعات برای محاسبه مشخصات یک زمین‌لرزه، اطلاعات سه ایستگاه مختلف است، هر چند که یک نفر با تجربه از یک ایستگاه سه مولفه‌ای نیز می‌تواند مشخصات نسبتاً خوبی را از زمین‌لرزه به دست آورد. هر قدر تعداد اطلاعات ایستگاه‌ها و مولفه‌های مختلف در محاسبه بیش‌تر باشد موجب بالاتر رفتن دقت محاسبه زمین‌لرزه به ویژه عمق زمین‌لرزه و در نهایت سازوکار آن می‌شود. نتیجه محاسبه مشخصه یک زمین‌لرزه عموماً به صورت جدول (۲-۳) ارائه می‌شود.

جدول ۲-۳- نمونه‌ای از نتیجه محاسبه مشخصه یک زمین‌لرزه

Date	Original time	Lat.	Long.	Depth.	Mi	Mx	Err	N.O.S.	Ref
1999 02 13	141310.13	47.253	36.425	17	2.3	2.1	065	5	KAR

- Date و Original time، تاریخ و زمان دقیق وقوع زمین‌لرزه را مستقل از ایستگاه ثبت کننده به وقت جهانی نشان می‌دهد.
- Lat، Long و Depth عرض و طول جغرافیایی رومرکز، مختصات جغرافیایی محل وقوع به درجه و ژرفای زمین‌لرزه را به کیلومتر نشان می‌دهد.
- $M_i$ ، بزرگای امواج پیکری است که بزرگای محلی را (عموماً با مقیاس ریشتر) نشان می‌دهد.
- $M_x$ ، بزرگای دیگری است که ممکن است مورد علاقه باشد، مانند بزرگای محلی ( $M_L$ )، بزرگای گشتاوری  $M_w$ ، بزرگای در مقیاس امواج سطحی  $M_s$ ، بزرگای در مقیاس امواج پیکری  $m_b$ .
- $E_{rr}$ ، جذر معدل توان دوم خطاهای زمانی هر ایستگاه در محاسبه است.
- N.O.S.، تعداد ایستگاه‌ها (یا مولفه‌ها) که در محاسبه استفاده شده است.
- Ref، شناسه مرجعی است که این محاسبه را انجام داده است.

## ۲-۲-۹- نحوه گزارش‌دهی

در یک شبکه لرزه‌نگاری کارهای مختلف به صورت گزارش‌های روزانه، ماهانه، فصلی، شش ماهه و یک ساله تهیه می‌شود. نمونه‌ای از داده‌های مربوط به قرائت لرزه‌نگارها و نتایج آن در جدول‌های (۲-۴) و (۲-۳) ارائه شده است.



- 1- Moment magnitude
- 2- Surface magnitude
- 3- Body wave magnitude

جدول ۲-۴- نمونه‌ای از داده‌های مربوط به قرائت لرزه‌نگارها و نتایج آن

STATION Name DURATION	DATE H.M.S.	P-Arrival---  Sec.	S-Arrival
BO PB 75		990502013542.3	54.8 S 3
HD PN1 70		990502013538.2	
LK PN1 70		990502013531.0	
HA PN1 60		990502013544.2	

**الف- کارهای روزانه در یک شبکه لرزه‌سنجی عبارتند از:**

- محاسبه زمین‌لرزه‌های ۲۴ ساعت گذشته
- اضافه کردن جدول وضعیت کارکرد ایستگاه‌ها در دفترچه روزانه
- تماس با سایر شبکه‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات بیشتر، در صورت نیاز
- گزارش به مقامات مسوول در صورت وجود زمین‌لرزه قابل توجه، یا تعداد قابل توجهی زمین‌لرزه در یک منطقه کوچک
- جدا کردن رکوردها از لرزه‌های مصنوعی، نظیر انفجارهای محلی
- تدارک برنامه جدول‌های مربوط به سایر کارهای روزانه
- کار بر روی جدول‌های مربوط به کارهای متداول ماهانه، فصلی، شش ماهه و یک ساله

**ب- کارهای ماهانه در یک شبکه لرزه‌سنجی عبارتند از:**

- تهیه کاتالوگ ماهانه
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های ماهانه
- تهیه نمودار ماهانه کارکرد ایستگاه‌ها
- بازدیدهای ادواری ماهانه هر ایستگاه و کنترل ایستگاه‌ها در مورد وسایل و ابزار ایستگاه‌ها و ساختمان آن
- حفظ و نگهداری زمین‌لرزه‌های یک ماه قبل به میلادی در فایل یا فایل‌های مطمئن

**ج- کارهای فصلی در یک شبکه لرزه‌سنجی عبارتند از:**

- تهیه کاتالوگ سه ماهه
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های سه ماهه
- تهیه نمودار فراوانی زمین‌لرزه‌ها در سه ماه

**د- کارهای شش ماهه در یک شبکه لرزه‌سنجی عبارتند از:**

- واسنجی (کالیبره کردن) لرزه‌سنج‌ها و تهیه پاسخ آن‌ها
- تهیه نقشه زمین‌لرزه‌های سه ماهه
- تهیه نمودار فراوانی زمین‌لرزه‌ها در سه ماه



### ه- تهیه گزارش از واسنجی کردن دستگاه‌ها

گزارش کارهای یک ساله در سطح وسیع و گزارش کارهای فصلی و شش ماهه در سطح کم‌تری به منظور اطلاع توزیع می‌شود. آزمون‌های واسنجی برای میرایی و فرکانس طبیعی لرزه‌نگارها توسط تکنسین‌ها انجام می‌شود. توالی‌های واسنجی در هنگام هر بازدید ثبت می‌شوند. معمولاً منبع تغذیه بازدید می‌شود و در صورت لزوم باتری‌های جدید جایگزین می‌گردند.

در گزارش یک ساله زلزله‌خیزی ضمن شرح مختصری از نوع ایستگاه‌ها و لرزه‌سنج‌ها، گزارشی که شامل شکل‌های زیر به همراه شرح و تفصیل آن‌هاست، ارائه می‌شود. این گزارش در نهایت به تعداد مورد لزوم تکثیر و توزیع می‌شود. این گزارش باید حاوی مطالب زیر باشد:

- فهرست مشخصات زمین‌لرزه‌ها
- منحنی زمان-مسافت مدل سرعتی پوسته زمین منطقه
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها در محدوده سد
- نقشه گسل‌های منطقه
- نقشه موقعیت ایستگاه‌ها
- نقشه لرزه زمین‌ساخت منطقه
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها در منطقه
- نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها بر حسب بزرگای طی یک سال
- نقشه سه بعدی زمین‌لرزه‌ها
- نقشه مقاطع خاص از زمین‌لرزه‌ها در منطقه
- توزیع زمین‌لرزه‌ها بر حسب عمق طی یک سال
- نمودار رابطه گوتنبرگ-ریشتر
- نمودار تجمعی زمین‌لرزه‌ها طی یک سال
- شکل و تهیه رابطه بین  $M_L$  و  $m_b$
- نقشه توزیع تخلیه انرژی زمین‌لرزه‌ها
- نمودار سطح دریاچه در طی یک سال
- منحنی سطح آب دریاچه با منحنی تجمعی زمین‌لرزه‌ها و انرژی تخلیه شده
- منحنی سطح آب دریاچه با منحنی تجمعی تخلیه انرژی زمین‌لرزه‌ها
- تفسیر داده‌ها و اطلاعات
- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در گزارشی که ارائه می‌شود باید تغییرات انجام شده در طول دوره بهره‌برداری (از جمله نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از اطلاعات گذشته) منعکس گردد. سپس تغییرات انجام گرفته با وضعیت کارکرد سد و ارتباط آن با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه مورد بررسی قرار گیرد. ارائه نقشه‌های لرزه زمین‌ساخت در هر سال و مقایسه آن با نقشه‌های مشابه در سال‌های گذشته ممکن است نتایج قابل توجهی از نظر جابجایی مکان رخداد زمین‌لرزه‌ها ارائه دهد. مقیاس نقشه‌هایی که تهیه و ارائه می‌گردد بزرگ مقیاس بوده و یا



حداقل با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ باشد. وجود نقشه‌های تکتونیکی گستره طرح مورد بررسی می‌تواند کمک شایانی به تفسیر بهتر اطلاعات زمین‌لرزه‌ای و شناخت فعالیت لرزه‌ای گسل‌های آشکار و پنهان، به‌ویژه گسل‌هایی که ممکن است در زیر ناقدیس‌ها و ناودیس‌ها و یا در دشت‌های آبرفتی پنهان باشند بنماید.

## ۲-۲-۱۰- تهیه و ارائه فهرست کامل مشخصات فنی لرزه‌نگارها

### ۲-۲-۱۰-۱- شبکه‌های لرزه‌نگاری قابل حمل

هرگاه هدف جمع‌آوری اطلاعات لرزه‌نگاری گستره سد برای مدت زمان محدودی باشد و یا به دلیل شرایط توپوگرافی نتوان شبکه ثابتی را اجرا کرد از دستگاه‌های لرزه‌نگاری قابل حمل استفاده می‌گردد. حداقل وسایل مورد نیاز و مشخصات عمومی و پایه برای یک دستگاه لرزه‌نگار قابل حمل به صورت مشخصات در جداول (۲-۵) و (۲-۶) ارائه شده است. البته لازم است که این جدول با گذشت زمان بروز رسانی شود.

جدول ۲-۵- حداقل وسایل مورد نیاز و مشخصات عمومی و پایه برای یک دستگاه لرزه‌نگار قابل حمل

Seismometer
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Short period type</li> <li>- Full scale range: 2*400 (800) V/m/s</li> <li>- Full scale output: 0 +-10V differential</li> <li>- Bandwidth: 1 Hz to 50 Hz</li> <li>- Dynamic range: &gt; 120dB</li> <li>- Axes: 3 (Tri-axial component)</li> <li>- Temperature: -25 to 50 deg. C</li> <li>- Water proof &amp; humidity: 90%</li> <li>- Low power consumption: 0.5 watt</li> <li>- Power supply: 10-15 VDC</li> </ul>

جدول ۲-۶- حداقل مشخصات فنی ثبات

Recorder (Digitizer and data Acquisition)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Channels: 4</li> <li>- Dynamic range: &gt; 120 dB</li> <li>- Least significant Bit: 24 Bit</li> <li>- Sampling rate: 50, 100 and 200 SPS per channel</li> <li>- Bandwidth: 40% of sampling rate</li> <li>- Triggering range: 0.01 to 100 of full scale</li> <li>- Power supply: Internal battery rechargeable 12 VDC, &gt;6.5 Ah</li> <li>- GPS Time receiver</li> <li>- Temperature: -25 to 50 deg C</li> <li>- Water proof and humidity %90</li> <li>- Full industrial system recorder</li> <li>- CPU: &gt; 2.5 GHz</li> <li>- Removable memory card: &gt; 2GB</li> <li>- Monitor: LCD &gt;= 12"</li> <li>- Watchdog system</li> <li>- Ram: &gt; 1GB</li> <li>- HDD Rack*2</li> <li>- HDD: 2 *80 GB</li> </ul>



## ۲-۲-۱۰-۲- شبکه‌های لرزه‌نگاری ثابت

در صورتی که هدف تعیین پایش لرزه‌ای گسترده سد برای مدت طولانی باشد و شرایط توپوگرافی محلی نیز اجازه دهد، از شبکه لرزه‌ای ثابت استفاده می‌شود. حداقل مشخصات عمومی و پایه برای دستگاه‌های لرزه‌نگار ثابت و دیگر متعلقات وابسته در جدول (۲-۷) ارائه شده است:

جدول ۲-۷- حداقل وسایل مورد نیاز و مشخصات عمومی و پایه برای یک دستگاه لرزه‌نگار قابل حمل و دیگر متعلقات وابسته

Seismometer
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Short period type</li> <li>- Full scale range: 2*400(800) V/m/s</li> <li>- Full scale output: 0+-10V differential</li> <li>- Bandwidth: 1 Hz to 50 Hz</li> <li>- Dynamic range: &gt; 120dB</li> <li>- Axes: 3 (Tri-axial component)</li> <li>- Temperature: -25 to 50 Deg C</li> <li>- Water proof &amp; humidity: 90%</li> <li>- Low power consumption: 0.5 watt</li> <li>- Power supply: 10-15 VDC</li> </ul>
<b>Recorder (Digitizer and data Acquisition)</b>
<b>Repeater</b>
<b>Antenna<sup>1</sup></b>
<b>Solar Panel</b>

۱- آنتن‌ها برحسب نیاز می‌توانند یک‌سویگر و یا چندسویگر باشند. افزون بر آن، به منظور ارسال داده‌ها اخذ مجوز از شرکت مخابرات ایران برای محدوده فرکانسی مجاز ضروری است. تهیه پروفیل‌های مخابراتی این امکان را به طراح شبکه می‌دهد تا بتواند موانع توپوگرافی موجود در مسیر ارسال امواج را شناسایی نماید و راهکارهای مناسب را ارائه دهد.



# فصل ۳

---

---

## شبکه شتاب‌نگاری







### ۳-۱- طراحی شبکه پایش شتاب‌نگاری

#### ۳-۱-۱- کلیات

نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در سدهای بزرگ و یا در نزدیکی آن‌ها تاکنون نتایج قابل توجهی را در برداشته است. در حال حاضر اطلاعات نسبتاً محدودی از دستگاه‌های شتاب‌نگار نصب شده در سدها وجود دارد زیرا تنها تعداد اندکی از زلزله‌های متوسط و یا بزرگ در نزدیکی سدهای مجهز به این دستگاه‌ها رخ داده‌اند. یکی از گسترده‌ترین رکوردهای شتاب‌نگاشتی حاصل از رویدادهای چندگانه در یک ساختگاه، رکوردهای ثبت شده در سد لانگ ولی در کالیفرنیا است. تحلیل این رکوردها که در اثر ارتعاشات ناشی از یک زمین‌لرزه متوسط به دست آمده بود، کاربرد تحلیل پایداری دینامیکی را در آن زمان تایید نمود. گردآوری بسیار بیش‌تر رکوردهای شتاب‌نگاشتی از سدهای بزرگ که با طرح‌ها و مصالح گوناگون ساخته شده‌اند حرفه مهندسی زلزله را مطمئن خواهد ساخت که فرضیات و روش‌های طراحی و تحلیل مربوط به ایمنی سد از ضروریات اجتناب‌ناپذیر است.

کاربرد رکوردهای شتاب‌نگاشتی در ارزیابی پایداری و طراحی سدهای موجود و آینده باید از جمله ملاحظات برای تمامی تصمیمات مربوط به تهیه و نصب دستگاه‌ها باشد. از آن‌جا که زمین‌لرزه‌های متوسط یا بزرگ رویدادهای نادری هستند، فرصت برای گردآوری داده به‌ندرت پدید می‌آید. از این‌رو قابلیت اعتماد تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دستگاه‌ها باید به طور مستمر آماده به کار باشند و باید جنبش نیرومند ورودی و پاسخ سد را ثبت کنند.

منظور از این راهنما ارائه سیمایی از موضوع نصب تجهیزات لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری به مجریان و مهندسان سدها است.

#### ۳-۱-۲- اهداف شبکه

هدف شبکه شتاب‌نگاری عبارت است از طراحی و بهره‌برداری از تجهیزات شبکه شتاب‌نگاری لرزه‌ای سدها و گزارش‌دهی از نتایج آن به منظور مراقبت لرزه‌ای سازه، تجهیزات و تاسیسات وابسته به منظور فراهم آوردن ابزار مناسب برای کارفرما به منظور اعمال یک مدیریت ایمن در محیط کار. سری‌های زمانی شتاب بدست آمده از زمین‌لرزه‌ها، از حداقل یک دستگاه شتاب‌نگار در هنگام مطالعات و قبل از طراحی نهایی سد ممکن است اطلاعات ارزشمندی را در اختیار طراحان قرار دهد.

#### ۳-۱-۲-۱- ثبت شتاب

جنبش نیرومند زمین در یک نقطه توسط پارامترهایی مانند شتاب، سرعت، جابه‌جایی و یا طیف پاسخ نشان داده می‌شود. در این بین پارامتر شتاب و طیف مربوط به آن در سد سازی کاربرد بیش‌تری دارد. این پارامتر توسط دستگاه‌های شتاب‌نگار که در بخش‌های مختلف یک سد قرار داده می‌شود اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۳-۱-۲-۲- دامنه کاربرد

طراحی شبکه شتاب‌نگاری مورد نظر این راهنما پایش لرزه‌ای سازه، تجهیزات و تاسیسات وابسته به سدهاست. بنابراین، دامنه کاربرد این راهنما، شتاب‌نگاری سازه سدها و گستره موثر بر آن‌هاست.



### ۳-۱-۳- فواید تجهیزات شتاب‌نگاری

تجهیزات شتاب‌نگاری بر روی سدها و یا نزدیکی آن‌ها نصب می‌شوند تا رکوردهای جنبش زمین و پاسخ لرزه‌ای را در اثر تکان ناشی از زمین‌لرزه به دست آورند. تصمیم به نصب این‌گونه تجهیزات عمدتاً به عهده مجری سد است، مگر آن که ضرورت آن به طور مشخص از سوی نهاد خاصی مانند مشاور طرح اعلام شده باشد. مجری سد فواید نصب چنین تجهیزاتی را در برابر هزینه نصب و نگهداری آن‌ها در نظر می‌گیرد. فواید چنین اقدامی کسب اطلاعات از رفتار سد در هنگام زمین‌لرزه و همچنین استفاده از داده‌های حاصل از آن در ارزیابی و طراحی سدهای دیگر است.

نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در سدها برای تمامی مناطق کشور پیشنهاد می‌شود به ویژه در محل‌هایی که تخریب یک سد ممکن است اثرات شدید اقتصادی و اجتماعی در بر داشته باشد. تجهیز سدها به دستگاه‌های شتاب‌نگار به نفع مجری، مردم و حرفه مهندسی سد است. در پی رویداد یک زمین‌لرزه شدید، مسوول سد خواستار این خواهد بود که شرایط سد و نیاز به هرگونه اقدامات اضطراری و علاج بخشی را به سرعت بداند. دسترسی فوری به داده‌های حاصل از تجهیزات نصب شده، همراه با قضاوت مستدل، مبنایی را برای اتخاذ تصمیمات مناسب از سوی مسوول فراهم می‌سازد. تصمیماتی که به این روش گرفته می‌شوند در برابر قانون گذاران و مردم قابل دفاع‌تر است.

مجهز کردن یک سد به دستگاه‌های شتاب‌نگار تصمیمی نیست که بدون توجه لازم توسط مجری سد گرفته شود. در صورتی که در کاربرد تجهیزات دقت نظر نشود و تجهیزات به طور مناسب مکان‌یابی و نگهداری نگردند، نصب آن‌ها ممکن است چندان ارزشمند نباشد، و حتی بدتر از آن، ممکن است داده‌های خطاداری را تولید کنند که رد کردن آن‌ها مستلزم صرف زمان و هزینه باشد.

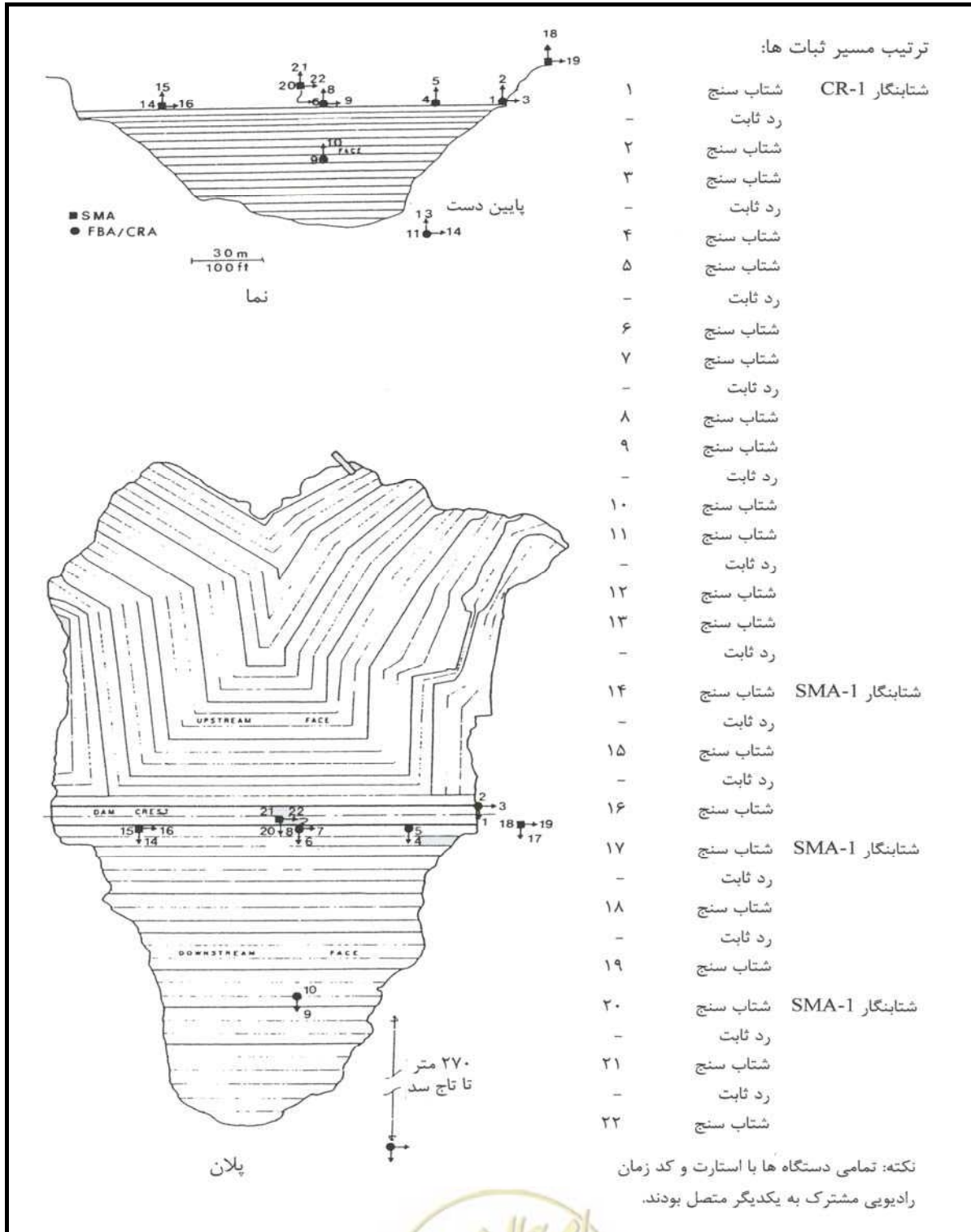
ایجاد پایگاه داده رکوردهای شتاب‌نگاشتی از سدهای متعدد، مهندس طراح را قادر خواهد ساخت تا پاسخ سد مورد نظر خود را در برابر زلزله با قابلیت اعتماد بیش‌تری پیش‌بینی کند. پیش‌بینی‌های تحلیلی عملکرد سد از طریق مقایسه پاسخ محاسبه شده با رکوردهای پاسخ واقعی امکان‌پذیر خواهد بود. با افزایش دقت حاصل از روش‌های تحلیلی، توانمندی حرفه تحلیل ایمنی سدهای موجود و در دست طراحی بهبود می‌یابد.

هر سد یک سازه منحصر به فرد است که متشکل است از پارامترهای طراحی متنوع در ارتباط با اندازه، شکل، مصالح به کار رفته، سازه داخلی، ویژگی‌های پی (انواع سنگی یا خاکی و شکل هندسی)، اثرات خارجی (یتانسیل سیل، زمین لغزه، زمین‌لرزه و غیره) و روش‌های ساخت. آشنایی با ملاحظات طراحی و متغیرهای اثرگذار بر عملکرد سد در گزینش یک سامانه تجهیزاتی موثر برای یک سد خاص ضروری است. تنوع زیاد سدها این امر را ضروری می‌سازد که تعداد قابل توجهی از آن‌ها به تجهیزات شتاب‌نگاری مجهز شوند تا بدین طریق پاسخ‌های متنوعی از انواع سدها بتوانند بهتر درک شوند. برای حداکثر کارایی و تاثیرگذاری، دستگاه‌ها را باید در محل‌هایی قرار داد که بتوان از آن‌ها در تشخیص و تایید نتایج تحلیل دینامیکی ساختگاه و سازه (که جنبش ورودی و پاسخ سازه را در نظر می‌گیرند) استفاده نمود.

تجربه به دست آمده در سد یاد شده لانگ‌ولی که در یک منطقه فعال از نظر لرزه‌خیزی در نزدیکی دریاچه‌های ماموث در کالیفرنیا قرار دارد، یکی از بهترین مثال‌ها را از فواید مقایسه جنبش ورودی و پاسخ سازه‌ای ارائه می‌دهد. این سد دارای ارتفاع ۳۸ متر و طول تاج ۱۷۹ متر است. نسبت شیب بالا دست به پایین دست ۳:۱ و دارای خاکریز یک دست بر روی پی بستر سنگی است. به علت فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای در منطقه، در سال ۱۹۷۹ بخش معادن و زمین‌شناسی کالیفرنیا شبکه تجهیزات شتاب‌نگاری سد لانگ‌ولی را از تعداد ۳ دستگاه به تعداد ۲۲ شتاب‌سنج گسترش داد که در ۶ محل نصب شدند (شکل ۳-۱). در این شکل، زاویه نصب شتاب‌سنج‌ها که به صورت متعامد می‌باشند در پلان و مقطع نشان داده شده است. شتاب‌سنج‌های افقی به صورت موازی و عرضی در جهت محور طولی سد و باقی شتاب‌سنج‌ها در جهت قائم سد نصب شدند. تجهیزات نصب شده در سد لانگ‌ولی

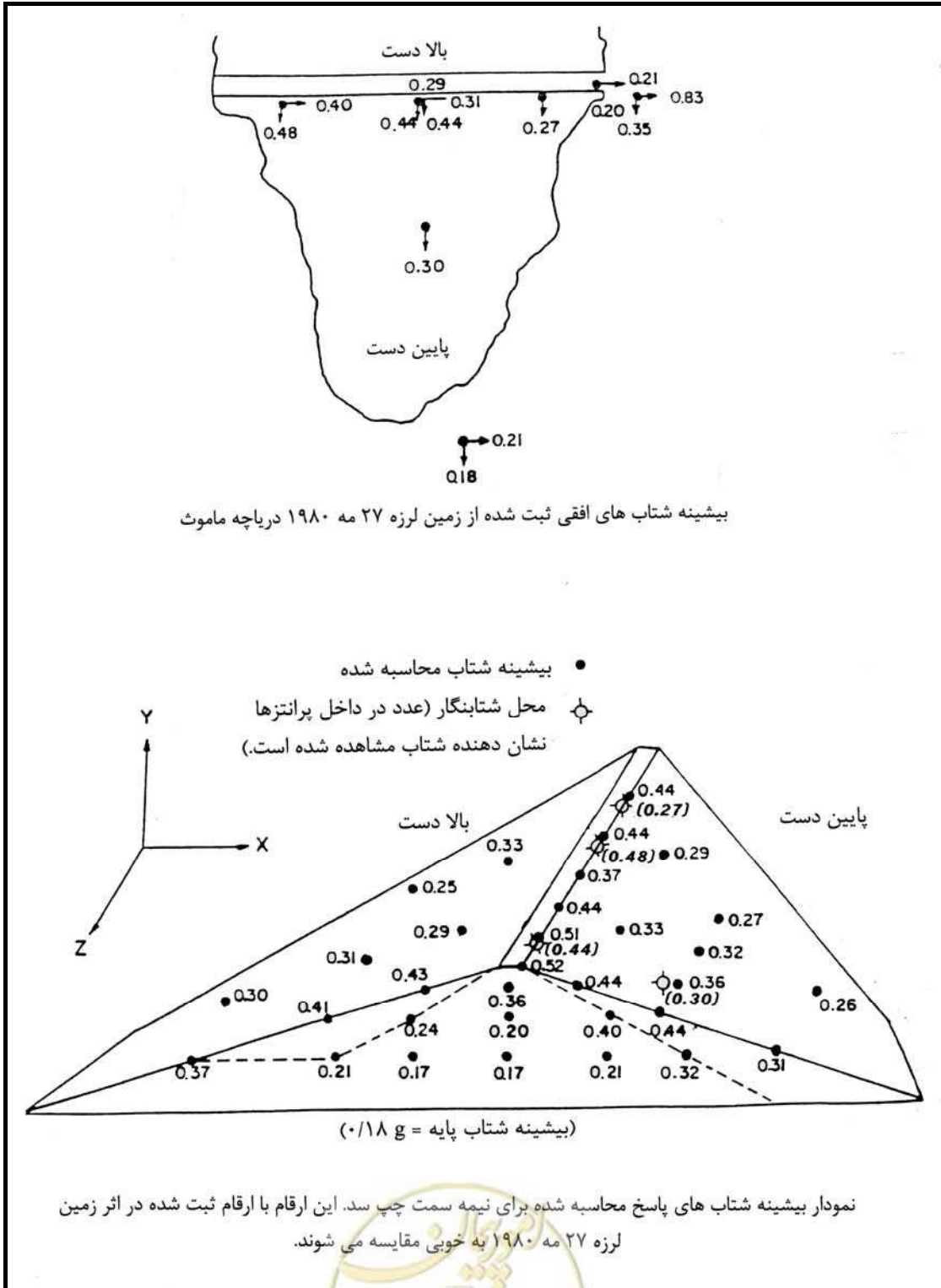


یکی از گسترده‌ترین و مفصل‌ترین مجموعه رکوردهای شتاب‌نگاشتی جنبش نیرومند را بیش از هر سد دیگر در آمریکا فراهم نمود. رکوردها از مجموعه‌ای از زلزله‌های ثبت شده از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۶ با بزرگ‌های از حدود  $M_L ۵/۰$  تا  $M_L ۶/۷$  به دست آمده‌اند.



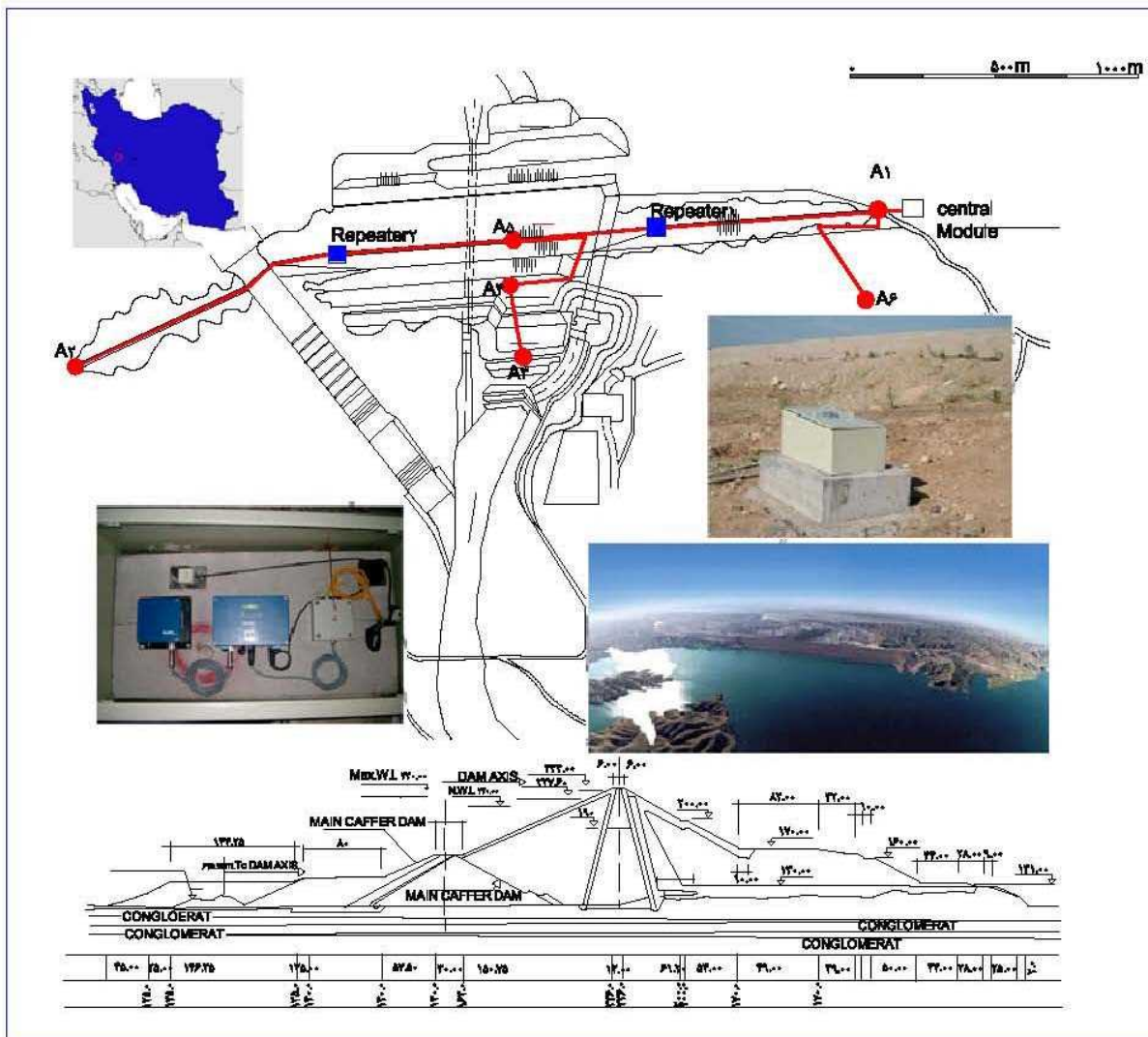
شکل ۳-۱- سد لانگ‌ولی، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار

لای و سید (۱۹۸۵) مقادیر بیشینه شتاب را در سد لانگولی برای زمین لرزه ۱۹۸۰ دریاچه‌های ماموت با بزرگای ML ۶/۲ محاسبه نمودند و سپس نتایج محاسبه شده را با مقادیر واقعی مقایسه کردند. همان‌طور که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، مقادیر واقعی و محاسبه شده به خوبی قابل قیاس می‌باشند.



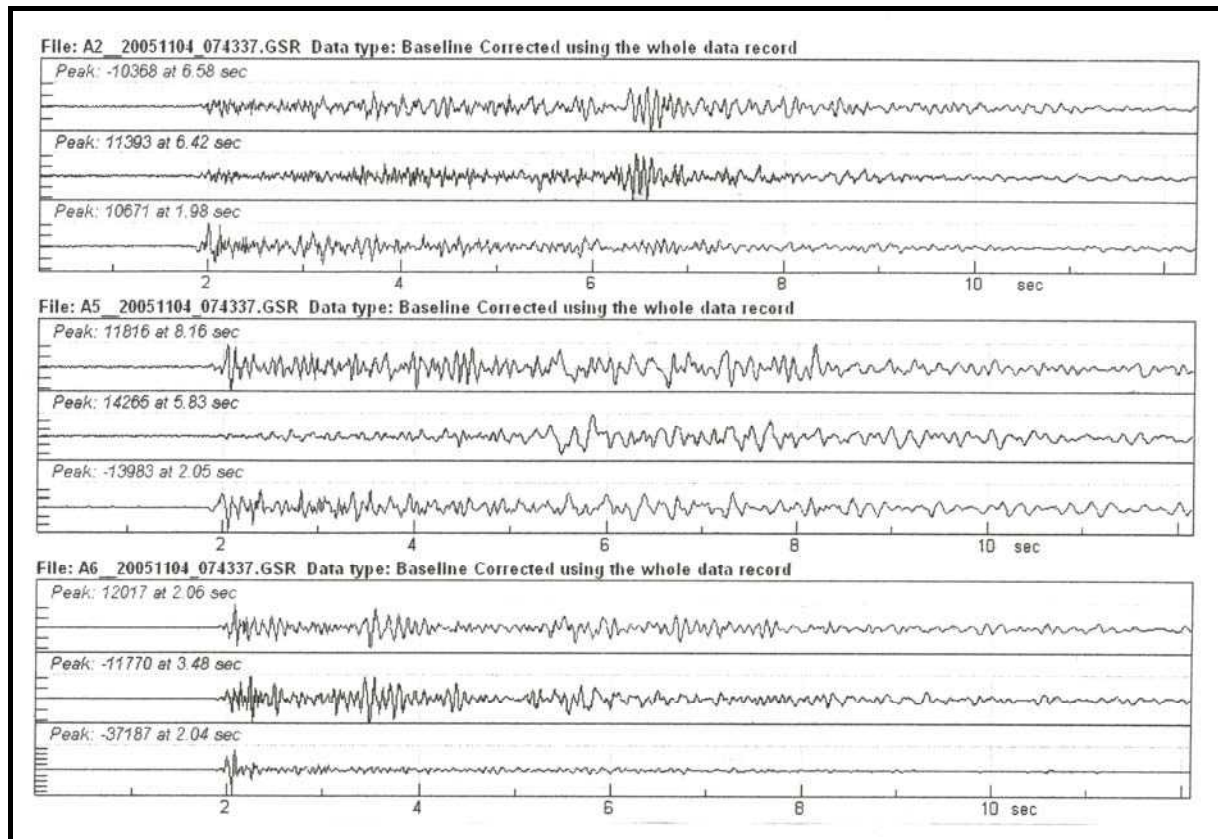
شکل ۳-۲- سد لانگولی، مقایسه پاسخ‌های محاسبه شده با پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

از نمونه‌های مثبت نصب تجهیزات پایش در سدها، نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در سدهای کرخه و کارون ۳ است. دستگاه‌ها در این دو سد در سال ۱۳۸۴ نصب شدند و چند ماه بعد، شتاب‌نگارهای سد کرخه زمین‌لرزه ۴ نوامبر ۲۰۰۵ میلادی با بزرگای  $M_L 4/0$  در استان خوزستان را ثبت کردند. محل نصب شتاب‌نگارها در سد کرخه در شکل (۳-۳) و شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده توسط برخی از آن‌ها در شکل (۴-۳) نشان داده شده‌اند. گرچه ارقام ثبت شده در اثر این زمین‌لرزه کوچکند و انتظار نمی‌رود تأثیری بر سد گذارند ولی وجود این گونه داده‌ها برای مطالعه ساختگاه و سد بسیار ارزشمندند.



شکل ۳-۳ - سد کرخه، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار





شکل ۳-۴- شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه ۴ نوامبر ۲۰۰۵ خوزستان (ثبت شده توسط سه دستگاه شتاب‌نگاری سد کرخه)

تمامی مجریان سد می‌توانند از فنون جدید تحلیل دینامیکی بهره‌مند شوند. این بهره‌مندی مانند مواردی که توسط لای و سید مورد استفاده قرار گرفت، قابلیت اعتماد پیش‌بینی آن‌ها را اثبات نمود. با حصول اطمینان از دقت بیشتر تحلیل‌ها، از طرح‌های پرهزینه و محافظه‌کارانه یا به‌سازی<sup>۱</sup> سدها می‌توان اجتناب نمود. مجریانی که سدهای آنان مجهز به چنین تجهیزاتی می‌باشند، و در مقیاس وسیع‌تر عموم مردم، از مزایای فنون تحلیلی قابل اعتماد بهره‌مند خواهند شد، زیرا این فنون این امکان را فراهم می‌سازند که ایمنی سدهای موجود به مرور تحت بارهای دینامیکی مورد بررسی مجدد قرار گیرد.

### ۳-۱-۴- عوامل تاثیرگذار در نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار

تصمیمات مهندسی برای تهیه و نصب تجهیزات شتاب‌نگاری تحت تاثیر عوامل متعددی است. برخی از این عوامل مانند خطامشی‌ها یا تعهدات سیاسی غیرفنی‌اند. از نقطه نظر فنی، ملاحظات کلی که باید در تصمیمات مربوط به تهیه تجهیزات اثرگذار باشند، عبارتند از: پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه (که از قبل مشخص شده است)، ابعاد سد، مصالح یا مواد پی، نوع سد و ساخت آن، به طور نسبی مستعد بودن به آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه، در نظر گرفتن شرایط پایین دست سد و خطرات ناشی از خرابی سد. استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه باید همیشه در هنگام اتخاذ تصمیم به استفاده یا عدم استفاده از آرایه‌های تجهیزات شتاب‌نگاری مد نظر قرار گیرد. عموماً پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای نسبت به سایر عوامل از اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است. چنان‌چه هدف از

نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار را به دست آوردن رکوردهای شتاب‌نگاری در نظر بگیریم، اگر پهنه لرزه‌ای چنان باشد که در طول عمر سازه پتانسیل کمی برای کسب رکوردهای مفید وجود داشته باشد، در نتیجه توجیه اقتصادی و فنی برای نصب دستگاه‌ها وجود نخواهد داشت. پهنه‌بندی لرزه‌ای و عوامل دیگر به طور جداگانه در بخش‌های زیر مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۳-۱-۴-۱- پهنه‌بندی لرزه‌ای

نقشه پهنه‌های خطر نسبی زمین‌لرزه، مانند نقشه موجود در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تعیین نیاز به تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد. ساده‌ترین معیاری که می‌تواند به کار گرفته شود آن است که هنگامی که سد مهمی در پهنه با خطر نسبی بالا قرار می‌گیرد، نصب تجهیزات شتاب‌نگاری در آن باید الزامی باشد. برای سدهای مهم واقع در پهنه با خطر نسبی متوسط و پایین، سایر ملاحظات غیرلرزه‌ای یا غیرفنی ممکن است قابل توجه‌تر باشد. نقشه‌های پهنه‌بندی معمولاً دارای مقیاس وسیع هستند و ممکن است دقت کافی را برای ساختگاه‌های خاص فراهم نکنند.

از مزایای نقشه‌های پهنه‌بندی، مد نظر قرار دادن گسل‌های فعال شناخته شده است. سدهایی که در پهنه‌های با خطر نسبی بالا قرار دارند، احتمالاً در نزدیکی گسل‌های فعال قرار گرفته‌اند. پهنه با خطر متوسط نیز از نظر لرزه‌ای فعال است اما تعداد کم‌تری از چشمه‌های لرزه‌ای فعال شناخته شده دارد. بدون تردید در پهنه‌های با خطر نسبی پایین گسل‌های فعال وجود دارند، ولی ممکن است تعداد آن‌ها کم باشد و به خوبی شناخته نشده باشند. در شرایط یکسان و در جایی که باید گزینشی صورت گیرد، سدهایی که در نزدیکی گسل‌های فعال ولی با دوره‌های بازگشت طولانی قرار دارند، برای نصب تجهیزات باید نسبت به سدهای واقع در نزدیکی گسل‌های فعال با دوره‌های بازگشت کوتاه‌تر از اولویت پایین‌تری برخوردار باشند.

### ۳-۱-۴-۲- ابعاد سد و مخزن

به طور کلی هر چه سد بلندتر و مخزن بزرگ‌تر باشد، پتانسیل آسیب دیدگی پایین دست در اثر تخریب زیادتر خواهد بود، از این رو توجه به پایداری، بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد. هر رکورد قابل توجه برای ساختگاه سدهای بلند و مخزن‌های بزرگ سهم مهمی در پایگاه داده‌ای شتاب‌نگاشت‌ها خواهد داشت.

این عامل، که تنها ابعاد نسبی را در نظر می‌گیرد، مشابه عامل خطرپذیری و درجه‌بندی خطرپذیری است. با این حال، طبقه‌بندی خطرپذیری به میزان زیادی تحت تاثیر ملاحظات مربوط به پتانسیل خسارت و تلفات جانی قرار دارد، در حالی که از چنین موارد غیرفنی در این راهنما اجتناب شده و تنها ویژگی‌های سد و ابعاد مخزن در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱-۴-۳- مواد یا مصالح پی

داده‌های پاسخ لرزه‌ای سدهایی که بر روی انواع پی‌ها ساخته شده‌اند، مورد نیاز می‌باشد. اطلاعات بیش‌تری از نحوه انتشار امواج لرزه‌ای از میان پی‌های سنگی توده‌ای و لایه‌ای و مواد خاکی، و اثرات بعدی بر پاسخ دینامیکی سد مورد نیاز است. حضور خاک‌های پی با پتانسیل روانگرایی، و نیاز به درک پاسخ آن‌ها در برابر تکان ناشی از زمین‌لرزه از ملاحظات دیگر برای نصب تجهیزات شتاب‌نگاری به شمار می‌آید.





### ۳-۱-۴- روش ساخت یا نوع سد

انواع گوناگون روش‌های ساخت در بیش از یک صد سال گذشته مقاطع منحصر به فرد و پیچیده سدها را ایجاد کرده است. ایمنی سدهایی که طرح آن‌ها غیرمعمول است، مانند سازه‌های خاکریز آبی<sup>۱</sup>، یا سدهای خاکی با شیب‌های تند می‌توانند نصب تجهیزات شتاب‌نگاری را توجیه نمایند.

همچنین رکوردهایی از سدهای بتنی با سازه‌های پیچیده مانند قوس نازک، چند قوسی، و انواع دال و پشت‌بند، برای مقایسه جنبش‌های پاسخ واقعی و پاسخ محاسبه شده مورد نیاز می‌باشند.

### ۳-۱-۴-۵- سدهای جدید در برابر سدهای موجود

بسیاری از سدهای جدید با این هدف که مالک و عوامل فنی سد فرصت بالقوه‌ای را برای کنترل فرضیات طراحی و پاسخ سازه‌ای در برابر تکان ناشی از زلزله فراهم آورند به تجهیزات شتاب‌نگاری مجهز شده‌اند. بسیاری از سدهای قدیمی‌تر تنها با روش‌های شبه استاتیکی با استفاده از ضرایب لرزه‌ای افقی تحلیل شده‌اند که امروزه ناکافی به نظر می‌آیند. برخی از سدهای موجود با استفاده از روش‌های تحلیل پایداری دینامیکی جدید ارزیابی مجدد شده‌اند، و نتیجه بررسی نشان داده است که برای افزایش مقاومت لرزه‌ای آن‌ها در برابر بارهای ناشی از زلزله نیاز به برخی از اصلاحات دارند و رکوردهای پاسخ سازه‌ای بیش‌تری مورد نیاز است تا روش‌های ارزیابی ایمنی آن سدها بهبود یابد.

### ۳-۱-۴-۶- سدها با ویژگی شریان حیاتی منابع آب

سدها از تاسیسات حیاتی حساس به شمار می‌روند، زیرا اغلب، جمعیت‌های انبوهی برای تامین آب و تولید برق و حفاظت در برابر سیل به آن‌ها وابسته‌اند. نیازهایی مانند تامین مستمر آب و برق توجیه کافی برای نصب تجهیزات شتاب‌نگاری را ایجاد می‌نماید، زیرا کافی است که از طریق رکوردهای به دست آمده و تحلیل آن‌ها نشان داده شود که توانمندی‌های شریان حیاتی مردم در هنگام رویداد یک زمین‌لرزه بزرگ آسیب نخواهد دید.

### ۳-۱-۵- طراحی شبکه

#### ۳-۱-۵-۱- پایش جنبش ورودی<sup>۲</sup> زمین لرزه

بار لرزه‌ای که در محاسبات پاسخ سازه‌ای وارد می‌شود به عنوان جنبش «میدان آزاد»<sup>۳</sup> تعریف می‌شود. بدیهی است که تاثیر سازه‌های نزدیک یا تاثیر ویژگی‌های توپوگرافی غیرعادی محلی بر جنبش زمین و در آن محل ناچیز است.

بر اساس روش‌های محاسباتی که امروزه به طور گسترده پذیرفته شده است، در تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی یا سازه‌های خاکی که مستقیماً بر روی سنگ ساخته شده‌اند، از جنبش ثبت شده در پایه یا در امتداد تکیه‌گاه‌ها به عنوان جنبش ورودی استفاده می‌شود.

- 1- Hydraulic Fill Structures
- 2- Input Motion
- 3- Free Field



تنها در مورد سدهای خاکی که بر روی نهشته‌های تحکیم نشده ساخته شده‌اند، تمهیدات محاسباتی شامل بخش وسیعی از نهشته‌های پی می‌شود که در بالای سنگ قرار گرفته‌اند. در چنین مواردی مهم است که کار از جنبش میدان آزاد آغاز شود و طی یک فرآیند جدا سازی، جنبش در تطابق با بستر سنگی به دست آید. بنابراین روشن است که به منظور تحلیل یک سد پس از رویداد زمین لرزه، آگاهی از رکوردهای میدان آزاد ضرورت دارد. درحالی که شناخت جنبش وارد شده به پایه از جمله اطلاعات مورد نیاز است. با این حال، هنگامی که اطلاعات مربوط به جنبش میدان آزاد در دسترس باشد، این اطلاعات برای مطالعه علل تغییرات محلی در تکان‌های شدید و چگونگی تغییر تکان با تغییر فاصله از چشمه، مهم می‌باشند.

در این راهنما، جنبش ورودی زمین ناشی از زمین لرزه در پایه یا تکیه‌گاه‌های سد مورد نظر است. جنبش در ساختگاه‌های میدان دور که از رو مرکز زمین لرزه فاصله دارند، در مقایسه با جنبش (زمین) نزدیک چشمه لرزه‌ای، به مقدار زیاد کاهش یافته و اصلاح<sup>۱</sup> می‌شود. این اصلاحات به علت فاصله موجود تا چشمه، ساختمان پوسته و نوع موادی که امواج لرزه‌ای باید بین چشمه و ساختگاه طی کنند، رخ می‌دهد. در ساختگاه‌های میدان نزدیک (گستره ۱۵ کیلومتری)، جنبش زمین ممکن است به علت انتشار امواج لرزه‌ای و روابط هندسی ساختگاه سد نسبت به چشمه زمین لرزه، تقویت یا کاهش یابد.

دستگاه‌هایی که جنبش ورودی را ثبت می‌کنند می‌توانند در سطح یا زیر سطح و یا در هر دو جا نصب شوند. برای آرایه‌ای که در سطح یک سد قرار داده می‌شود، یک یا چند مولفه جنبش ورودی آرایه باید در نزدیکی پنجه پایین دست نصب شود. در صورت وجود اعتبار، یک یا چند مولفه نیز باید در تکیه‌گاه‌های نزدیک سد قرار داده شوند. شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶)، مثال‌هایی از این گونه نصب‌ها را در سد دریاچه کوه سوری در ایالت نیوهمپشایر و سد هارکول در ایالت جورجیا در آمریکا را نشان می‌دهند. دستگاه‌های واقع در پنجه سد باید تا حد امکان به مقطع بیشینه نزدیک باشند. با این حال، در ساختگاه بسیاری از سدها، دستیابی به مکانی در سطح در پنجه پایین دست سد کار دشواری است. این دشواری به دلایل گوناگونی است که عبارتند از: حضور پنگاب<sup>۲</sup> از مخازن پایین دست، پایاب<sup>۴</sup> از نیروگاه‌ها، حوضچه‌های آرامش<sup>۵</sup>، عملیات اجرایی خروجی<sup>۶</sup>، زمین اشباع شده در اثر تراوش، یا ویژگی‌های دیگر. در دره‌های صخره‌ای باریک عمیق، جایی که سدها ممکن است به طور کامل بر روی بستر سنگی قرار داشته باشند، پیدا کردن رخنه‌های بستر سنگی در پایین دست که برای نصب دستگاه مناسب باشد، اغلب دشوار است. در محل تماس سد و تکیه‌گاه، شرایط توپوگرافی و دسترسی ممکن است فضای کمی را برای نصب مطلوب دستگاه اجازه دهد. یک فضای خالی در نزدیکی سطح زمین در تکیه‌گاه یا یک محل تخت شده در تکیه‌گاه می‌تواند محل مناسبی برای نصب دستگاه باشد.

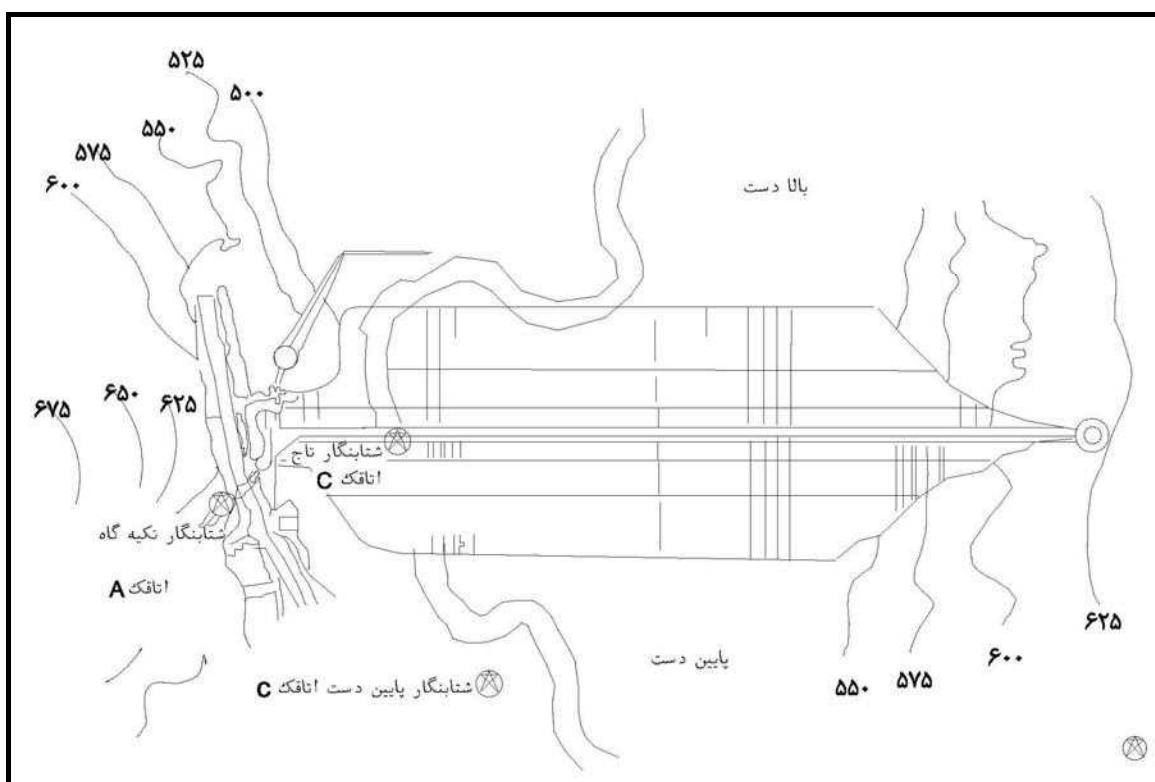
بسیاری از سدهای بتنی و پی برخی از سدهای خاکی دارای زهکش و یا گالری‌های تزریق می‌باشند. چنانچه این گالری‌ها در پی سد یا در نزدیکی آن واقع شده باشند، اغلب بهترین محل‌ها برای نصب دستگاه‌های ثبت جنبش ورودی هستند. به منظور حفاظت از دستگاه‌ها در برابر ترافیک و تراوش آب در مسیر کف‌ها یا آبروهای گالری باید شیارهای کوچکی را در دیوارهای گالری ایجاد نمود. ساختگاه‌های گالری می‌توانند بسیار مرطوب باشند به طوری که در مواقع بازدید و هنگام باز کردن درب دستگاه، رطوبت بیش‌تری

- 1- Attenuated
- 2- Modified
- 3- Backwater
- 4- Tailwater
- 5- Plunge pools
- 6- Outlet Works



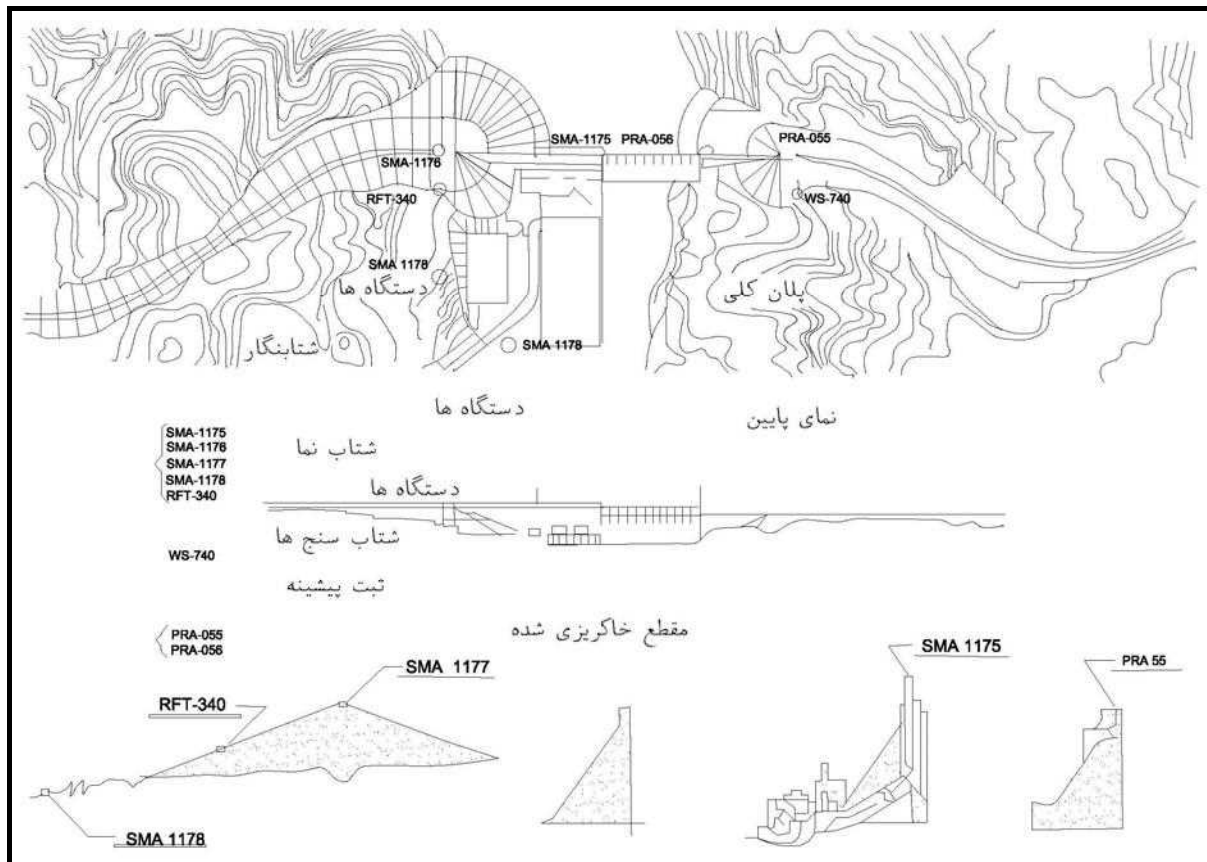
می‌تواند وارد دستگاه شود. برای کاهش اثر این شرایط برخی از گالری‌ها به اتاقک‌های گرم مجهز می‌شوند تا دستگاه را خشک و قابل بهره‌برداری نگهدارند.

برخی مواقع، دستگاه‌های ثبت جنبش ورودی زیر سطحی در سدهای خاکی در درون گمانه‌ها قرار داده می‌شوند. این گمانه‌ها ممکن است از روی سد یا در پنجه سد حفاری شوند. برای نمونه می‌توان به سد کاستیاس (شکل ۳-۷) و سد بُکا (شکل ۳-۸) در کالیفرنیا اشاره نمود. هنگامی که تمام یا قسمتی از پی‌های سد از خاک تشکیل شده باشد، می‌توان از گمانه‌ها برای قراردادن شتاب‌سنج‌ها در محل‌های تماس خاکریز- خاک پی و خاک پی- سنگ و یا در نزدیکی آن‌ها استفاده نمود. بسته به دامنه کار برنامه‌ریزی شده برای تحلیل، می‌توان شتاب‌سنج‌های بیش‌تری را در ترازهای گوناگونی در یک سد یا پی نصب نمود.



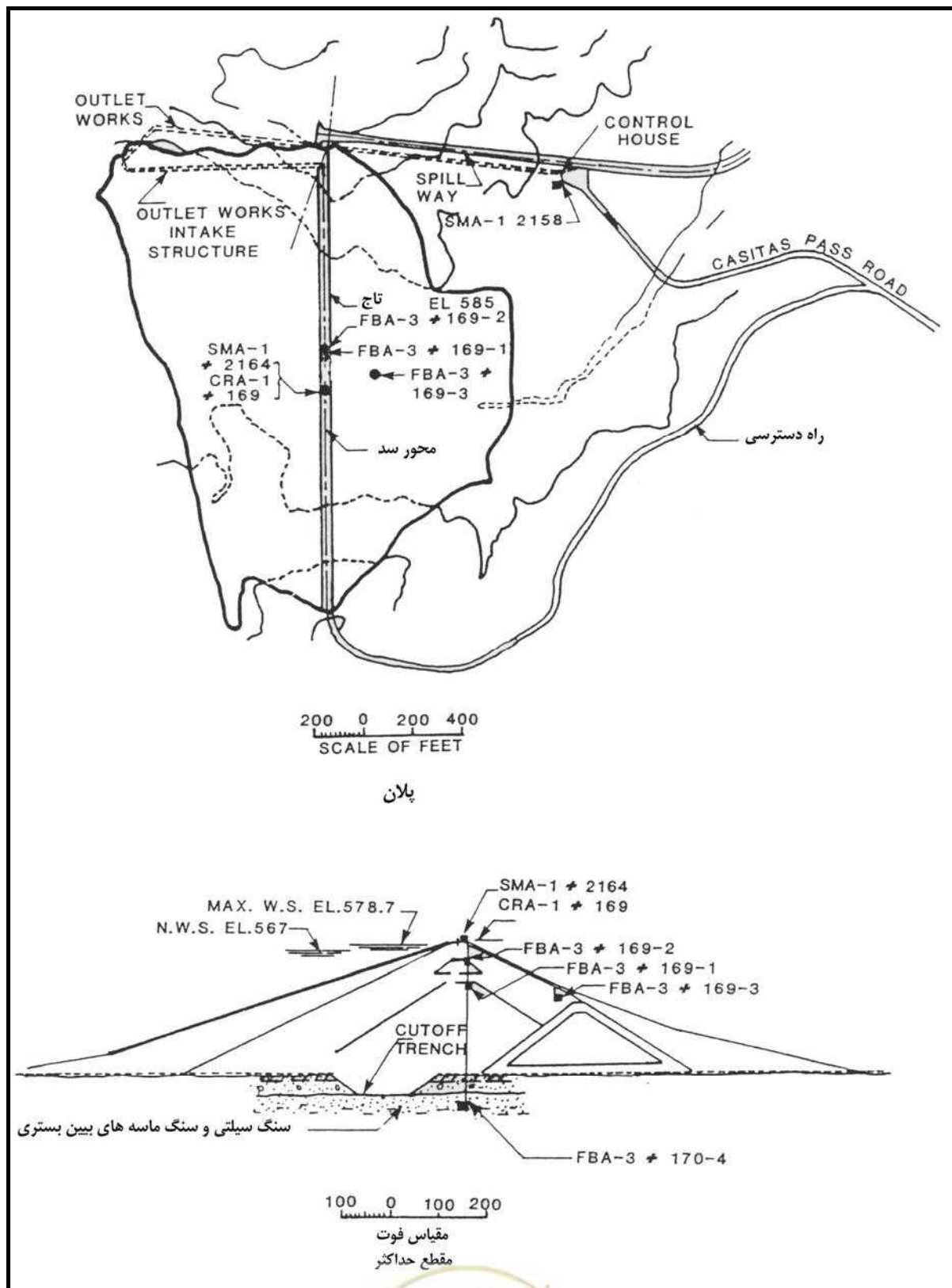
شکل ۳-۵- سد دریاچه کوه سوری در ایالت نیوهمپشایر (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار





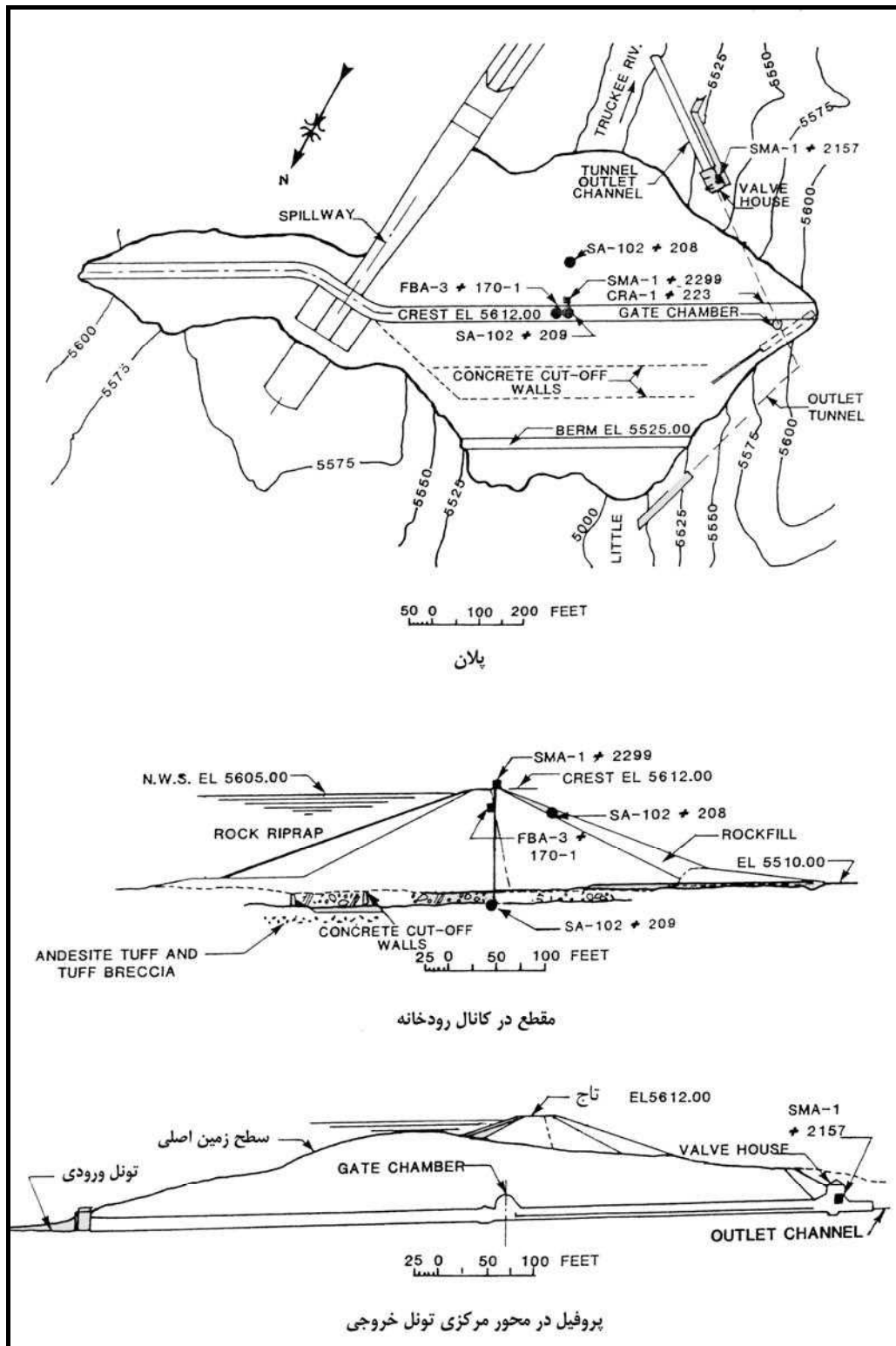
شکل ۳-۶- سد هارت‌ول در ایالت جورجیا (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار





شکل ۳-۷- سد کاسیتاس در ایالت کالیفرنیا (آمریکا)، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار





شکل ۳-۸ - سد بکا در کالیفرنیا، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار

دستگاه‌های ثبت کننده پاسخ سازه‌ای به طور مطلوب در قسمت‌هایی از سازه سد (مانند تاج سد) نصب می‌شوند که حرکات قابل ملاحظه‌ای از تکان ناشی از زمین‌لرزه در آنجا اتفاق می‌افتد. از این رو محل‌های مناسب برای نصب دستگاه اعم از سدهای بتنی یا



خاکی معمولاً در شیب‌های تند سازه‌ای در نزدیکی تاج سد است. با این حال به منظور ثبت جنبش ورودی و جنبش میدان آزاد، محل‌های با بی‌نظمی غیرعادی در توپوگرافی برای نصب دستگاه مناسب نیستند. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که نزدیکی به شیب‌های دره یا دیوارهای صخره جنبش زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

بالای تپه‌ها نسبت به پایه‌هایشان در فرکانس‌های متناظر با طول موج‌هایی که تقریباً معادل عرض تپه‌اند، بزرگ‌نمایی قابل ملاحظه‌ای را تجربه می‌کنند. کنار تپه‌ها تحت تاثیر پدیده‌های پیچیده بزرگ‌نمایی - کوچک‌نمایی قرار می‌گیرند. در هر صورت باید توجه داشت که طراحی شبکه با توجه به معیارهای بالا و با توجه به شرایط سد و مناطق قابل دسترس و نتایج تجزیه و تحلیل‌های انجام شده باید توسط مشاور انجام پذیرد.

### ۳-۱-۵-۲- پایش پاسخ سازه‌ای<sup>۱</sup> (معیارهای موثر بر چگونگی طراحی شبکه در بدنه سد)

هدف اصلی از اندازه‌گیری پاسخ لرزه‌ای سد به دست آوردن مقادیر بیشینه پاسخ آن است. بنابراین دستگاه‌ها باید در محل‌هایی قرار داده شوند که این مقادیر بیشینه پیش‌بینی می‌شوند.

با این حال، این یک انتخاب حساس است زیرا از یک سو به منظور کاستن هزینه‌ها تعداد دستگاه‌ها باید در حداقل ممکن باشد و از سوی دیگر باید به گونه‌ای باشد که داده‌های گردآوری شده قابل استفاده باشند. از این رو انتخاب صحیح باید بر اساس نتایج یک مدل عددی از سد باشد که اعتبار آن از طریق نتایج حاصل از روش‌های تعیین ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای از قبیل پارامترهای مودال تایید گردد. در صورتی که چنین مدلی در دسترس نباشد، باید به تجربیات گذشته مراجعه کرد. شتاب‌های بیشینه معمولاً در تاج سد در بلندترین مقطع عرضی آن رخ می‌دهند. تنها در مورد سدهای قوسی که در معرض نیروهای لرزه‌ای جانبی (عرضی نسبت به صخره) قرار دارند، در قسمت‌های جانبی یعنی در جایی که احتمال می‌رود پاسخ مدهای نامتقارن دارای مقادیر زیاد باشد نیز شتاب‌های بالا مورد انتظار است. در این موارد، مولفه‌های جانبی شتاب پاسخ که معمولاً دارای اهمیت ناچیزی است، ممکن است قابل توجه باشد. بسیاری از سدها به دلایلی از قبیل وجود اختلاف در شیب تکیه‌گاه‌ها، مسیرهای خارج از مرکز جریان آب در دره، یا سایر بی‌نظمی‌ها در توپوگرافی یا مصالح پی و یا ساختار نامنظم زمین‌شناسی نامتقارنند. از این رو مقطع بیشینه سد ممکن است در مرکز هندسی تاج سد قرار نداشته باشد. بدین ترتیب باید حداقل یک دستگاه در مقطع بیشینه سد نصب شود. دستگاه‌های دیگری را می‌توان به منظور پشتیبانی، کاربردهای خاص، یا صرفاً به علت محدودیت‌های مکانی در محل‌هایی در امتداد تاج سد، در رویه پایین دست سد یا درون سد نصب نمود.

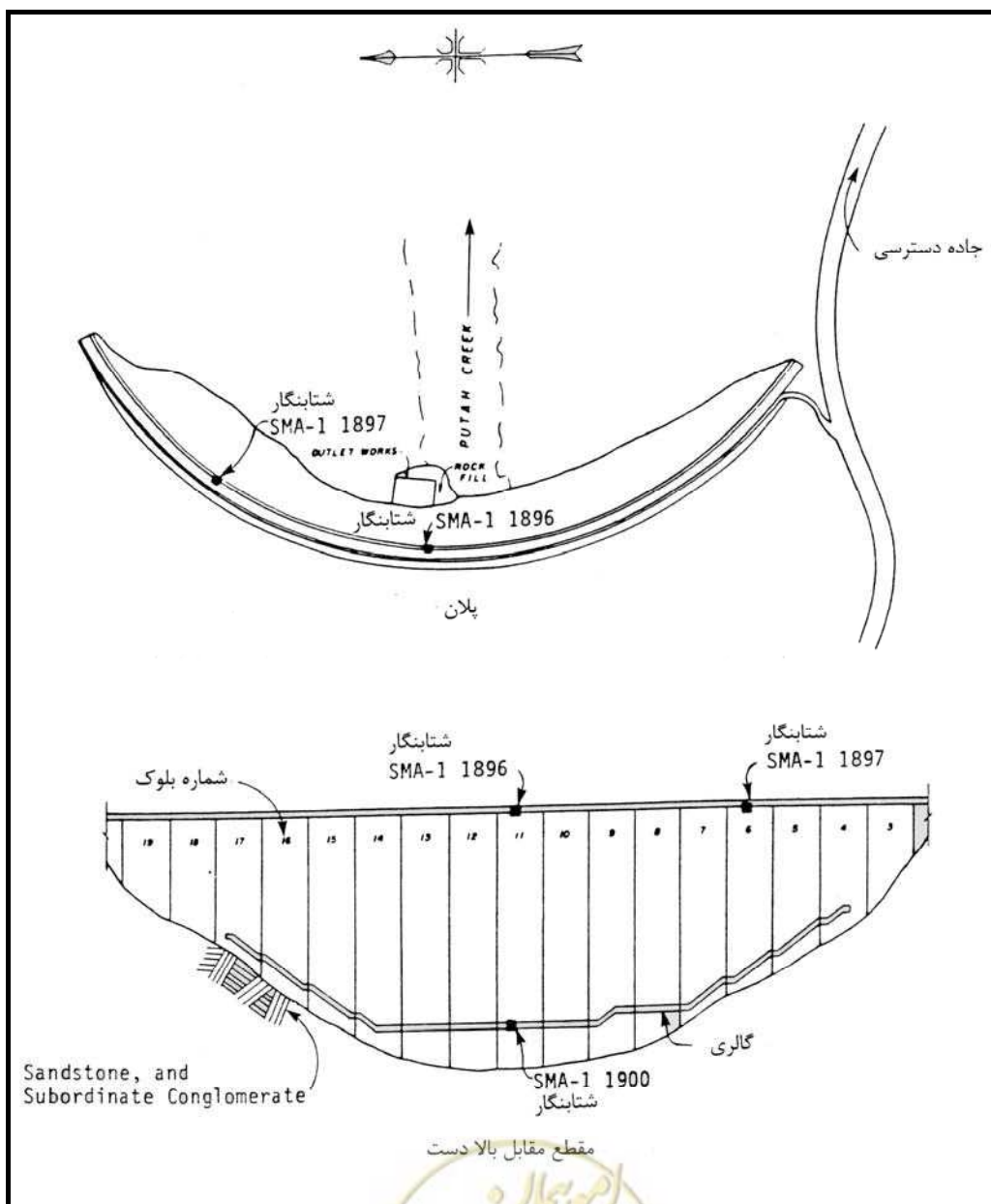
اگر تحلیل دینامیکی یک سازه قبل از نصب دستگاه‌ها انجام شده باشد، محل‌های نصب دستگاه بر اساس نتایج تحلیلی به طور منطقی مشخص می‌شوند. این محل‌ها در جاهایی هستند که تغییر شکل‌ها و یا تنش‌های بزرگ قرار دارند. این محل‌ها از یک سد به سد دیگر متفاوتند و هر سد محل‌های خاص خود را دارد.

در مورد سدهای خاکی با توجه به شکل هندسی و رفتار غیرخطی مصالح، ضروری است به این نکته توجه شود که بیشینه شتاب می‌تواند الزاماً نه در تاج سد بلکه در نقاطی در امتداد ارتفاع رخ دهد.



همچنین می‌توان دستگاه‌هایی را به منظور مطالعه رفتار زون‌هایی از مصالح منتخب نصب نمود. این انتخاب که ترجیحا باید بر اساس یک مدل ریاضی انجام شود، برای هر سد به صورت خاص است و به زون‌بندی کلی و شکل هندسی سد، نوع مصالح به کار رفته در هر زون و طبیعت پی بستگی دارد.

نصب این دستگاه‌ها باید با استفاده از گمانه‌ها یا در هنگام ساخت سد با استفاده از لوله‌های قائم و از طریق کابل‌های ارتباطی انجام شود. در مورد سدهای بتنی بهتر است که محل نصب دستگاه‌ها در مقطع پیشینه سد باشد. در بسیاری از سدهای بتنی در صورتی که در امتداد تاج سد محل مناسبی برای نصب دستگاه‌ها در دسترس نباشد، گالری‌های فوقانی می‌توانند امکانی را برای انتخاب مکان‌های داخلی فراهم سازند. نمونه‌ای از محل‌های نصب دستگاه شتاب‌نگار در یک سد بتنی در شکل (۳-۹) نشان داده شده است.



شکل ۳-۹ - سد مونته‌سلو در کالیفرنیا، محل نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار



وضعیت مطلوب آن است که دستگاه‌های شتاب‌نگاری که برای ثبت پاسخ سازه‌ای و ثبت جنبش ورودی (یا جنبش پایه) نصب می‌شوند، تماما در یک مقطع عرضی عمود بر محور طولی سد قرار داده شوند. رکوردهای حاصل از دستگاه‌هایی که بدین شکل نصب شده باشند، مستقیم‌ترین مبنا را برای تحلیل فراهم می‌آورند که برای آن می‌توان پاسخ‌های واقعی سد را در برابر بارهای ناشی از زمین‌لرزه با مقادیر محاسبه شده مقایسه نمود. مولفه‌های عرضی ثبت شده جنبش‌های زمین‌لرزه عموماً از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. چنانچه تحلیل سه بعدی مورد نظر باشد، می‌توان در قسمت‌های دیگری از تاج سد که از مقطع پیشینه دور هستند نیز دستگاه‌هایی را نصب نمود.

هنگامی که نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار بر روی یک سد برای ثبت پاسخ سازه‌ای مورد نظر است، بهتر است به مواردی توجه شود که در آن‌ها محل‌های بهینه برای نصب دستگاه‌ها از طریق تحلیل دینامیکی تشخیص داده شده است. لای و سید (۱۹۸۵) توزیع پیشینه شتاب‌های افقی (مولفه عرضی) را برای مجموعه پنج زمین‌لرزه روی داده در ماه مه ۱۹۸۰ مقایسه کردند. این مقادیر بیانگر آن هستند که مرکز تاج سد شدیدترین لرزش را متحمل شده بود. لای و سید همچنین توجه کردند که مقادیر پیشینه شتاب افقی که در تاج سد ثبت شده بودند در مقایسه با مقادیر شتاب‌های ثبت شده در بستر سنگی در نزدیکی پنجه سد دارای نسبت بزرگ‌نمایی حدود ۲ تا ۳ بودند. این پدیده در مورد تمامی پنج رکورد صحت داشت. با این حال، این نسبت بزرگ‌نمایی ممکن است در هنگام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر تغییر کند و هر سد نیز نسبت‌های بزرگ‌نمایی خاص خود را داراست.

چنانچه خصوصیات دینامیکی سد (فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مدی و میرایی) مورد نظر باشد، لازم است تعداد بیشتری شتاب‌سنج در محل‌های مختلف نصب شوند، در عین حال این اقدام باعث پیچیده‌تر شدن پردازش داده‌ها می‌شود.

در ارتباط با پردازش داده‌ها، تحلیل پاسخ سد معمولاً با هدف تعیین ضریب بزرگ‌نمایی، همبستگی بین تحریک کننده‌ها و پاسخ‌ها و پارامترهای مدی انجام می‌شود. این کار معمولاً از طریق تحلیل‌های پیچیده در حوزه فرکانس یا زمان با استفاده از برنامه‌های خاص به صورت ناپیوسته انجام می‌شود. در ارتباط با دستگاه‌ها، تعداد و موقعیت آن‌ها باید به گونه‌ای باشد که اجازه دهد شکل‌های مدی اولین مدهای ارتعاشی به درستی شناخته شوند. به منظور کاستن وزن این دو مشکل، توصیه می‌شود آزمون‌های دینامیکی برجا انجام شود تا بدین طریق پارامترهای مدی بر اساس مجموعه وسیعی از داده‌های قابل اعتماد تعیین شوند.

با این ترتیب به منظور شناسایی فرکانس‌های طبیعی از طریق عملیات ساده تحلیل طیفی، تعداد کمی از شتاب‌سنج‌های نصب شده بر روی تاج سد کافی می‌باشد، درحالی که شکل‌های مدی می‌توانند در چند نقطه دیگر بر روی تاج و در امتداد دو طره (یکی برای مدهای متقارن و یکی برای نامتقارن) کنترل شوند.

در سدهای بتنی، اندازه‌گیری حرکات احتمالی درزه‌های شعاعی (رفتاری که تقریباً ناشناخته است) نیز مهم است. اگر ملاحظات اقتصادی اجازه دهد، دستگاه‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی به طور عمده در بخش بالایی سد قرار داده می‌شوند.

### ۳-۱-۵-۳- پایش سازه‌های جنبی (سایر تجهیزات)

در کنار سد، تجهیزات هیدرولیکی شامل سازه‌های مختلفی از قبیل برج‌های آبگیر، سرریزها، دریچه‌ها و دیگر تجهیزات مکانیکی می‌باشند که پایش آن‌ها نیز باید در نظر گرفته شود. معیار ارزیابی این سازه‌ها با در نظر گرفتن مشکلات خاص آن‌ها مشابه مواردی



است که تاکنون عنوان شده است. این مشکلات عبارتند از: کشسانی آب<sup>۱</sup>، محل قرار گرفتن این سازه‌ها به صورت نیمه مدفون یا کاملاً مدفون، برهم کنش دینامیکی با پر شدن مخزن سدها، پایداری و غیره.

### ۳-۱-۵-۴- پایش جنبش زمین میدان آزاد

نصب مطلوب دستگاه‌های شتاب‌نگار در میدان آزاد (دور از سد) برای به دست آوردن رکوردهای جنبش زمینی است که تحت تاثیر سازه‌های انسان‌ساخت نزدیک، اتاقت‌های محل نصب دستگاه یا مکان‌های با توپوگرافی غیرعادی قرار نگرفته باشند. دستگاه‌های میدان آزاد برای ارزیابی جنبش‌های ورودی لرزه‌ای در سدهای موجود ضروری هستند به ویژه اگر سدها از نوع بتنی یا سازه‌های خاکی بوده و به طور مستقیم بر روی سنگ ساخته شده باشند، اما چنین دستگاه‌هایی می‌توانند شناخت ما را از چشمه زمین‌لرزه، علل تغییرات محلی در تکان‌های شدید و چگونگی تغییر تکان با تغییر فاصله از چشمه افزایش دهند. اگر شبکه شتاب‌نگاری که شامل دستگاه‌های ثبت جنبش ورودی و پاسخ سازه‌ای است در سدی که به طور مستقیم بر روی پی سنگی بنا شده مستقر شده باشد، برای تحلیل دینامیکی پس از زمین‌لرزه ممکن است به اطلاعات دستگاه‌های میدان آزاد نیازی نباشد لیکن وجود آن بهتر و به صلاح طرح است. برای سدهای خاکی موجود واقع بر روی نهشته‌های تحکیم نشده برنامه‌های کامپیوتری به هنگامی وجود دارند که چنانچه پاسخ سد و جنبش ورودی پایه (جنبش در بالای لایه فوقانی خاک) در هنگام یک زمین‌لرزه ثبت شده باشد، امکان ارزیابی پارامتریک خواص مقاومت دینامیکی سد را برای مهندسان فراهم می‌آورند. با استفاده از خواص مقاومت دینامیکی، مهندسان می‌توانند پایداری (پاسخ) سازه را برای سطوح دیگر جنبش پایه برآورد کنند. نمونه‌های متعددی از سدهای جدید بر روی نهشته‌های تحکیم نشده وجود دارند که در آن‌ها مدل‌های ریاضی طراحی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی، بخش وسیعی از نهشته‌های پی در بالای سنگ را لحاظ نموده‌اند. با این حال، نصب دستگاه‌های میدان آزاد باید بسته به عوامل محلی و علاقه مالک سد در تایید مدل طراحی و تحقیق، به طور کلی اختیاری در نظر گرفته شود.

### ۳-۱-۵-۵- اثرات توپوگرافی

دستگاه‌های ثبت کننده پاسخ سازه‌ای به طور مطلوب در قسمت‌هایی از سازه سد (مانند تاج سد) نصب می‌شوند که حرکات قابل ملاحظه‌ای از تکان ناشی از زمین‌لرزه در آنجا اتفاق می‌افتد. از این رو محل‌های مناسب برای نصب دستگاه اعم از سدهای بتنی یا خاکی معمولاً در شیب‌های تند سازه‌ای در نزدیکی تاج سد است. با این حال به منظور ثبت جنبش ورودی و جنبش میدان آزاد، محل‌های با بی‌نظمی غیرعادی در توپوگرافی برای نصب دستگاه مناسب نیستند. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که نزدیکی به شیب‌های دره یا دیوارهای صخره جنبش زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

بالای تپه‌ها نسبت به پایه‌هایشان در فرکانس‌های متناظر با طول موج‌هایی که تقریباً معادل عرض تپه‌اند، بزرگ‌نمایی قابل ملاحظه‌ای را تجربه می‌کنند. کنار تپه‌ها تحت تاثیر پدیده‌های پیچیده بزرگ‌نمایی - کوچک‌نمایی قرار می‌گیرند. به نظر می‌آید این پدیده‌ها، صرف نظر از ساختمان داخلی زمین وجود داشته باشند. فنون تئوری و مدل‌سازی برای پیش‌بینی پاسخ بالای تپه و کنار تپه به تکان ناشی از زمین‌لرزه هنوز در حال توسعه است.

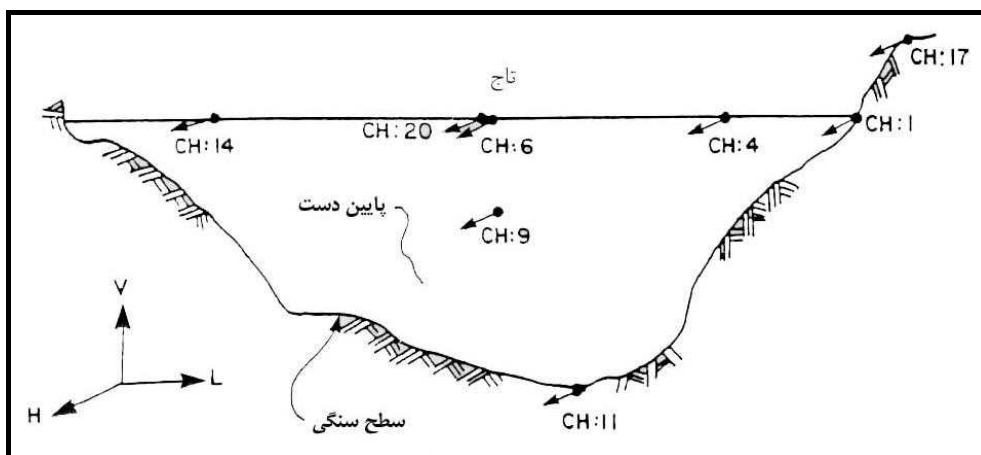


شتاب‌های با مقادیر بالا که در شیب تند تکیه‌گاه سمت چپ سد لانگ ولی ثبت شده (جدول ۳-۱ و شکل ۳-۱۰) احتمالاً از اثرات توپوگرافی بوده است.

رکوردهای دیگری از شتاب‌های بالا از قبیل چینه تکیه‌گاه چپ در بالای سد پاکویما<sup>۱</sup> در هنگام زمین‌لرزه ۱۹۷۱ سن فرناندو در کالیفرنیا و در سد کویوت<sup>۲</sup> در هنگام زمین‌لرزه ۱۹۸۴ مورگان هیل در کالیفرنیا ممکن است از اثرات توپوگرافی بوده باشد. پیش از انتخاب محل برای نصب دستگاه باید محل توپوگرافی سد با دقت بررسی شود تا از چنین اثرات ناخواسته‌ای اجتناب گردد.

جدول ۳-۱- بیشینه شتاب زمین (g) در نقاط مشخص شده در شکل (۳-۱۰)

شماره کانال (مولفه عرضی)	کانال ۱۴	کانال ۹	کانال ۲۰	کانال ۶	کانال ۱۱	کانال ۴	کانال ۱	کانال ۱۷
محل	تاج (راست)	شیب	تاج (مرکز)	تاج (مرکز)	پنجه (سنگ)	تاج (چپ)	تاج (تکیه‌گاه)	تکیه‌گاه (سنگ)
زمین‌لرزه ۲۵ مه ۱۹۸۰ (۹:۳۴ صبح)	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۲۷
زمین‌لرزه ۲۵ مه ۱۹۸۰ (۱۲:۴۵)		۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۹
زمین‌لرزه ۲۵ مه ۱۹۸۰ (۱۳:۳۶)		۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۴
زمین‌لرزه ۲۶ مه ۱۹۸۰	۰/۱۰		۰/۱۲					۰/۰۷
زمین‌لرزه ۲۷ مه ۱۹۸۰	۰/۴۸	۰/۳۰	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۲۰	۰/۳۵



شکل ۳-۱۰- مقایسه بیشینه شتاب مولفه عرضی رکوردها در نقاطی در سد لانگ‌ولی و رخنه‌ای بستر سنگی مجاور برای پنج زمین‌لرزه ماه مه ۱۹۸۰

- 1- Pacoima
- 2- Koyote



### ۳-۱-۵-۶- ویژگی‌های اتصال دستگاه شتاب‌نگار به شالوده

شتاب‌نگارها باید به دقت به سازه و پی یا زمین طبیعی که بر روی آن قرار گرفته‌اند متصل شوند. در سدهای بتنی معمولاً این کار به طور مستقیم با مهار کردن دستگاه به سازه انجام می‌شود که می‌تواند در تاج سد و یا در گالری، تورفتگی‌ها و یا فضای خالی سد باشد. در سدهای خاکریز و نصب بر روی زمین طبیعی، معمولاً به منظور حفاظت و نگهداری دستگاه، یک کف بتنی ساخته می‌شود. به منظور اطمینان از متصل شدن با پی، این کف می‌تواند دارای پایه‌های کوتاهی باشد که تا داخل زمین امتداد می‌یابند. مطلوب‌ترین وضع، استقرار یک جایگاه بتنی واحد برای پایه‌ها و کف خواهد بود و در این حالت آرماتورها از کف به پایه‌ها امتداد پیدا می‌کنند. سپس دستگاه به کف (ترجیحاً روی بخش مرکزی بیرون‌زده‌ای که از لحاظ زهکشی دارای اطمینان باشد) مهار می‌شود. معمولاً کف‌ها به منظور ایجاد یک فضای محافظت‌کننده برای دستگاه ساخته می‌شوند، اندازه این کف‌ها باید طوری باشد که فرکانس طبیعی‌شان بیش‌تر از فرکانس شتاب‌سنج‌ها یا جنبش نیرومند میدان نزدیک زمین باشد و در نتیجه بر روی نگاشت‌های شتاب دستگاه اثری نگذارند (شکل ۳-۱۲).

در سازه‌های جنبی با توجه به این که هدف ثبت پاسخ سازه اصلی است، در صورت ضرورت دستگاه‌های ثبت‌کننده پاسخ جنبش نیرومند زمین باید به طور مستقیم به عضو سازه اصلی متصل شود.

### ۳-۱-۵-۷- جهت قرار گرفتن مولفه‌های دستگاه شتاب‌نگار

دستگاه‌های شتاب‌نگاری که شتاب‌سنج‌های سه مولفه‌ای دارند باید در جهتی نصب شوند که دو شتاب‌سنج افقی به ترتیب موازی و عمود بر محور سد و شتاب‌سنج سوم هم در جهت قائم باشد. در مورد سدهای قوسی، یک شتاب‌سنج افقی به محور سد مماس و دیگری عمود بر آن می‌شود. شروع به کار دستگاه در اثر زلزله می‌تواند برای جهت افقی یا قائم تنظیم شود. با این حال، به طور عادی شروع به کار دستگاه‌های شتاب‌نگار در جهت قائم است زیرا نخستین موجی که وارد ساختگاه می‌شود، یعنی موج فشاری (یا P)، به آسانی حس شده و ثبات‌ها پیش از رسیدن امواج برشی (یا S) فعال می‌شوند.

### ۳-۱-۵-۸- زهکشی و رطوبت

در محل نصب دستگاه (چه در داخل فضای بسته باشد چه در فضای باز) لازم است به منظور اجتناب از تراوش آب و به حداقل رساندن تقطیر، زهکشی و تهویه مناسب پیش‌بینی شود. زهکشی ساده مانند راه آبرو کم عمق یا زهکش‌های فرانسوی (خشکه چینی) برای دور کردن آب از محل نصب دستگاه، از اقدامات معمول در نصب دستگاه در زمین‌های سطحی است. کف‌های بتنی معمولاً طوری ساخته می‌شوند که سطح فوقانی‌شان کمی بالاتر از سطح زمین قرار گیرد. در فضای خالی و گالری‌های داخلی باید دستگاه‌ها را بالاتر از کف، ترجیحاً بر روی پایه‌های کوتاه یا در تورفتگی بالاتر از کف قرار داد.

### ۳-۱-۵-۹- درجه حرارت ایستگاه

اتاقک محل نصب دستگاه در هنگام هوای گرم باید از تهویه خوب برخوردار باشد. در مناطقی که هوا بسیار سرد می‌شود و به پایین‌تر از درجه یخبندان می‌رسد، ممکن است اتاقک‌های با هوابندی و عایق‌بندی خوب مورد نیاز باشد. در برخی مکان‌ها، اتاقک‌ها به وسیله بخاری‌های برقی گرم می‌شوند و کمک می‌کنند تا محوطه دستگاه خشک بماند. ساختگاه‌های بسیاری وجود دارند که در

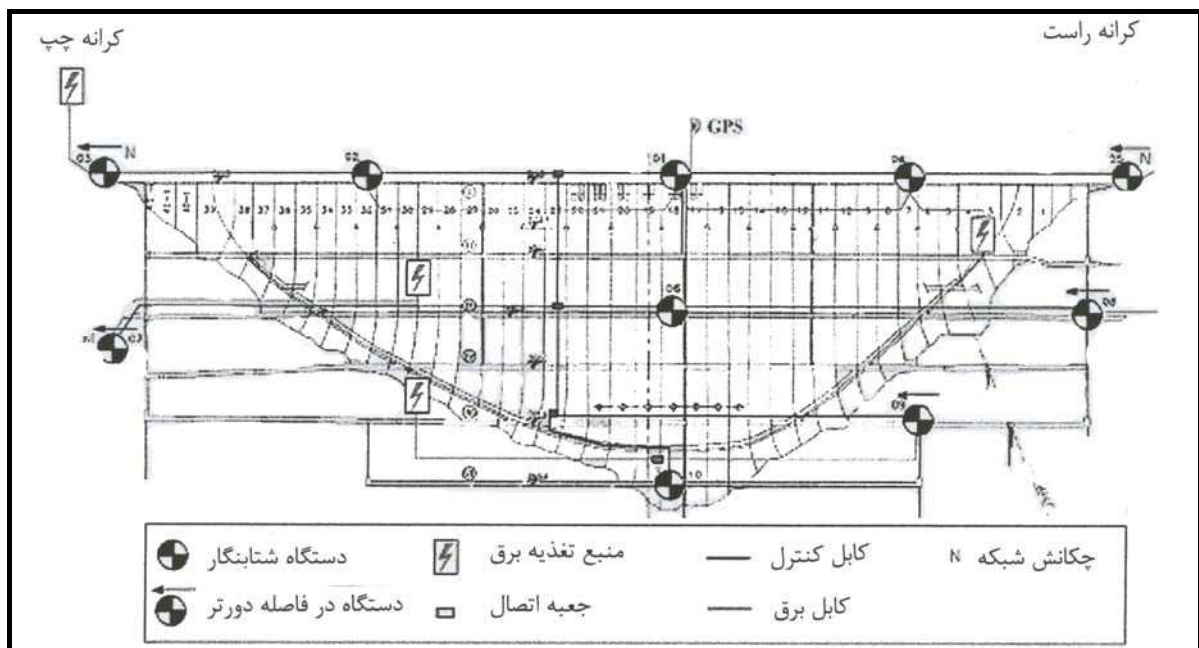


معرض هر دو هوای بسیار گرم و بسیار سرد قرار دارند. در این گونه مناطق می‌توان، در هنگام بازدیدهای معمول دستگاه‌ها، اتاقک‌ها را به طور فیزیکی برای دمای بسیار گرم و یا بسیار سرد (باز کردن یا بستن تهویه‌ها، افزودن یا برداشتن عایق) مطابقت داد.

### ۳-۱-۵-۱۰- چگونگی و اهمیت اتصال دستگاه‌های شتاب‌نگار به یکدیگر و هم‌زمانی ثبت رکوردها

چنانچه لازم باشد رکوردهای کامل به دست آید که هدف آن مطالعه رفتار دینامیکی سازه مد نظر باشد، لازم است دستگاه‌ها به یک سامانه واحد متصل شوند. ارتباط سنسورها به سامانه رکورد کننده از طریق خطوط تلفن و یا بی‌سیم و با اجرای زمان مشترک امکان‌پذیر است.

زمان مشترک نیز می‌تواند از طریق سیم سخت برای شروع مشترک یا به وسیله مولدهای کد زمان یا رادیو انجام شود. بدون زمان مشترک امکان همبستگی جنبش نقاط بر روی سد در فرکانس‌های خاص (مُد‌های پاسخ) وجود ندارد. شکل (۳-۱۱)، نمونه‌ای از اتصال دستگاه‌های شتاب‌نگار به یکدیگر را در سد انگوری در گرجستان نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱- سد انگوری (Enguri) در گرجستان، نحوه اتصال دستگاه‌های شتاب‌نگار به یکدیگر

اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر از طریق سیم‌های سخت مشکلات ویژه‌ای دارد. اگر سیم‌ها در داخل کانال یا مجرای مخصوص قرار داده نشوند، ممکن است جوندگان آسیب‌هایی را وارد آورند. صاعقه باعث نوسان برق می‌شود و ممکن است به حسگرها (شتاب‌سنج‌ها) و ثبات‌ها آسیب برساند.

به نظر می‌رسد دستگاه‌های نصب شده در درون چاه‌ها در معرض آسیب ناشی از صاعقه قرار داشته باشند. سامانه‌های حفاظتی با کیفیت بالا و چند بار مصرف پرهزینه‌اند، ولی می‌توانند با پیشگیری از آسیب‌های وارده و یا به حداقل رساندن هزینه‌های جایگزینی، دستگاه‌ها را آماده به کار نگهدارند. به منظور پیشگیری از آسیب‌های ناشی از ترافیک زمینی، جانوران و خرابکاری، در حالت مطلوب کابل‌ها را باید در کانال‌های زیر زمینی قرار داد یا آن‌ها را دارای حفاظ یا پوشش نمود.

### ۳-۱-۶- تهیه گزارش ادواری و موردی

#### ۳-۱-۶-۱- چگونگی انجام پردازش داده‌های رکورد شده

گردآوری و طبقه‌بندی داده‌های ثبت شده و تفسیر آن‌ها بر طبق جدول زمان‌بندی و دستورالعمل‌های از پیش تعیین شده مرحله نهایی مراقبت و نگهداری است. اطلاعات خام گردآوری شده برای انجام پردازش لازم به دفتر مدیر سد فرستاده می‌شود.

پردازشگرها قادر به انجام محاسبات عملیات به شرح زیر اند:

- محاسبه مقادیر بیشینه کمیت‌هایی اندازه‌گیری شده (شتاب، سرعت و جابه‌جایی)
  - محاسبه طیف پاسخ جنبش لرزه‌ای
  - مقایسه مقادیر بیشینه به دست آمده با مقادیر آستانه‌ای که از پیش تعیین شده است. در صورت لزوم، می‌توان یک سیگنال هشدار دهنده به وجود آورد.
  - ارائه داده‌ها به صورت جدول و نمودار
- داده‌ها و نتایج پردازش شده مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های یک زمین‌لرزه خاص بر روی نوار مغناطیسی، دیسک یا لوح فشرده بایگانی می‌شوند و یک کپی از آن باید برای مهندسان مشاور مربوط ارسال شود.

#### ۳-۱-۶-۲- انجام تصحیح‌های لازم

داده‌های خام حاصل از دستگاه‌های ثبت جنبش نیرومند زمین ممکن است دارای خطاهایی باشند که باید منابع ایجاد خطا و میزان خطا با دقت ارزیابی شود و تصحیح‌های لازم صورت گیرد تا داده‌های دقیق جنبش زمین به دست آیند. در ادامه به ارزیابی منابع خطاها و چگونگی پردازش رکوردها پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱-۶-۲-۱- منابع خطای شتاب‌نگاشت‌ها

رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه شتاب‌نگار دارای خطاهایی است. این خطاها را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد:

- ۱- خطاهای ناشی از عملکرد دستگاه ثبت
- ۲- خطاهای ناشی از ظهور و عددی کردن رکوردها

#### الف- خطاهای دستگاهی

منابع خطاهای دستگاهی در رکوردهای جنبش زمین عبارتند از:

- ۱- انحراف دامنه فاز ترنس‌دیوسر<sup>۱</sup>
- ۲- نقص در طراحی ترانس‌دیوسر: اکثر ترانس‌دیوسرهای موجود دارای رفتار سامانه یک درجه آزادی نیستند.
- ۳- عملکرد اریب کاغذ یا فیلم دستگاه‌های مانسته (آنالوگ) باعث تغییرات چند میلی‌متری در ثبت رکورد می‌شود.
- ۴- یکسان نبودن سرعت حرکت ماشین ثبت رکورد



- ۵- یکسان نبودن فاصله علایم زمانی
- ۶- اگر حساسیت دستگاه بالا باشد ممکن است قله‌های بزرگ خارج از مقیاس باشد.
- ۷- متغیر بودن ضخامت مسیر که بر روی دقت عددی کردن اثر می‌گذارد.
- ۸- حساسیت واسنجی دستگاه
- ۹- گذشت زمان، دما و رطوبت باعث تغییراتی در سامانه می‌شود.
- ۱۰- لغزش دستگاه

### ب- خطای ظهور و عددی کردن

منابع خطاهای ظهور و عددی کردن در رکوردهای جنبش زمین عبارتند از:

- ۱- تاب برداشتن نگاتیو فیلم در اثر عوامل شیمیایی
- ۲- خطاهای ناشی از بزرگ‌نمایی و چاپ نگاتیوها ناشی از نقص لنزها
- ۳- اثر پوآسون بر روی فیلم‌ها در مرحله کپی کردن آن، زیرا لازم است فیلم اصلی و کپی آن تحت فشار طولی یکسانی قرار داشته باشند.
- ۴- شاخص عددی کردن: هر چه تعداد نقاط عددی شده بیش‌تر باشد دقت بالاتری را به همراه دارد.
- ۵- شفافیت نامناسب در دستگاه عددی‌ساز
- ۶- اثرات فیلتر پایین‌گذر روی عددی کردن با ماشین مکانیکی عددی‌ساز، زیرا تخمین یک تابع پیوسته از روی یک سری نقاط گسسته همواره همراه با خطاست.
- ۷- خطاهای سیستماتیک و اتفاقی عددی کردن عبارتند از:
  - نقص عملکرد مکانیکی دستگاه باعث خطاهای پررود بلند می‌شود.
  - نقص اپراتور باعث خطاهای با فرکانس بالا و متوسط می‌شود.
  - جابه‌جایی خط مبنا در مراحل عددی کردن به صورت خطای با پررود بلند ظاهر می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت شتابی را که دستگاه شتاب‌نگار دریافت می‌کند، پیش از آن که به صورت شتاب تصحیح نشده در دسترس باشد تحت تاثیر دو اغتشاش بزرگ واقع می‌شود.

اولین اغتشاش مربوط به ترانس‌دیوسر دستگاه شتاب‌نگار است که در زمان تبدیل شتاب رسیده به رکورد، ایجاد می‌شود. برای نشان دادن طبیعت این اغتشاش، یک شتاب ثابت را که دارای فرکانس  $f_1$  که  $f_1 \gg f_n$  می‌باشد ( $f_n$  فرکانس طبیعی مبدل یا ترانس‌دیوسر دستگاه شتاب‌نگار است)، در نظر می‌گیریم که دستگاه شتاب‌نگار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از طرفی به علت خصوصیات مکانیکی ترانس‌دیوسر، دستگاه شتاب‌نگار قادر خواهد بود تا امواجی با فرکانس  $f_n$  را به طور دقیق ثبت کند و پس از آن یک افت خواهد داشت. بنابراین در فرکانس‌های بین  $f_n$  تا  $f_1$  یک خطا وجود خواهد داشت که ناشی از دستگاه شتاب‌نگار است.

دومین اغتشاش مربوط به عددی کردن رکوردهای مانسته است که به علت خطاهایی است که در مرحله عددی کردن رکورد حاصل می‌شود. در فاصله‌های بین صفر تا  $f_L$  (که  $f_L$  یک حد پایین برای مرحله عددی کردن رکوردهاست) و فرکانس‌های بزرگ تر از  $f_H$  (که  $f_H$  هم یک حد فوقانی برای مرحله عددی کردن است)، اغتشاش وجود خواهد داشت. بدین ترتیب زمانی که یک

رکورد مانسته به عددی تبدیل شود، در محدوده فرکانس‌های ذکر شده همراه با اغتشاش خواهد بود که به عنوان داده‌های شتاب‌نگاشت تصحیح نشده در دسترس قرار می‌گیرد.

به علت کاربرد جدیدی که تئوری ارتعاش سازه‌ها در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله دارد، وجود یک سری داده‌های شتاب دقیق برای یک باند عریض فرکانس الزامی است. بدین منظور لازم است که تصحیحاتی بر روی این داده‌ها انجام شود تا در یک باند فرکانسی مشخص یک سری از داده‌های شتاب دقیق به دست آید. برای انجام این تصحیحات ابتدا به طور مختصر به بررسی خطاهای مرتبط با پریودهای بلند و خطاهای مربوط به فرکانس‌های بالا پرداخته می‌شود.

### ۳-۱-۶-۲- خطاهای ثبت و عددی کردن رکوردها در پریودهای بلند و کوتاه

همان‌طور که در بخش ۳-۱-۶-۲ عنوان شد، خطاهای ثبت و عددی کردن رکوردها در شتاب‌نگاشت‌های تصحیح نشده مربوط به فرکانس‌های پایین‌تر از  $F_L$  و بالاتر  $F_H$  است. با این فرکانس‌های شناخته شده ( $F_H$  و  $F_L$ ) می‌توان داده‌های شتاب‌نگاشت تصحیح نشده را با مشخص کردن شتاب زمین به طور دقیق در بین حوزه فرکانسی  $F_L$  و  $F_H$  اصلاح نمود.

منابع عمده خطاهای با پریود بلند ( $F_L$ ) را می‌توان به چند گروه تقسیم کرد:

$L_1$ : خطاهایی که به وسیله معکوس گذاشتن فیلم یا رکورد ثبت شده حاصل می‌شود.

$L_2$ : خطایی که از پیچش رکوردها (به علت کهنگی آن‌ها) به وجود می‌آید و خطایی که از ظاهر کردن نگاتیوها و کپی‌های

شفاف حاصل می‌شود.

$L_3$ : خطاهایی که به وسیله بزرگ‌نمایی چشمی فیلم نگاتیو ۳۵ یا ۶۰ میلی‌متری حاصل می‌شود.

$L_4$ : خطایی که به سبب عملکرد مکانیکی سامانه نشانه‌روی در روی میز عددی‌ساز حاصل می‌شود.

همچنین منابع اصلی خطاهای فرکانس بلند ( $F_H$ ) عبارتند از:

$H_1$ : تغییرات هارمونیک دامنه که به علت محدودیت فرکانس طبیعی ترانس‌دیوسر دستگاه شتاب‌نگار تولید می‌شود.

$H_2$ : خطایی ناشی از اشکالات موجود در طرح دستگاه شتاب‌نگار که باعث می‌شود ترانس‌دیوسر دارای رفتار سامانه یک درجه

آزادی نباشد.

$H_3$ : خطاهای اتفاقی در عددی کردن رکوردها

$H_4$ : خطاهایی که در تجزیه و تحلیل نادرست از وسایل عددی‌ساز حاصل می‌شود.

$H_5$ : اثرات فیلتر پایین‌گذر در طی مراحل داده‌پردازی با ماشین‌های مکانیکی چشمی عددی‌ساز

از نظر تصحیح‌های شتاب‌نگاشت خطاهای بالا به سه گروه تقسیم می‌شوند:

اولین گروه شامل  $L_1$ ،  $L_2$  و  $L_3$  است که تصحیح خطاهای ناشی از این گروه را می‌توان طی مرحله «پردازش شتاب‌نگاشت‌های

تصحیح نشده» انجام داد.

دومین گروه از خطاها مربوط به حالت  $H_1$  و  $H_2$  است و تصحیح کردن آن‌ها بسیار مشکل‌تر از حالت قبل است، زیرا عملیات

وسیقی برای پردازش عددی آن‌ها به کار گرفته می‌شود. این خطاها فرکانس  $F_H$  را محدود می‌کند.





سومین گروه از خطاها که به وسیله  $H_3$ ،  $L_4$  و  $H_5$  تعریف می‌شوند، پیچیده‌ترین نوع خطاها می‌باشند و بیش‌ترین اثر را بر روی انتخاب  $F_L$  و  $F_H$  دارند و نوعاً طبیعت این خطاها به صورتی است که نمی‌توان آن‌ها را تصحیح کرد و بدین منظور دامنه‌های با این فرکانس از شتاب‌نگاشت‌های تصحیح شده حذف می‌شود.

برای محاسبه سرعت و جابه‌جایی زمین که به وسیله انتگرال‌گیری از شتاب به دست می‌آیند، لازم است خطاهای مربوط به پریودهای بلند حداقل شود و در مراحل مشتق‌گیری مربوط به تصحیحات دستگاه شتاب‌نگار لازم است خطاهای فرکانس بالا کاهش پیدا کند.

اگر در مرحله عددی کردن رکوردها، فاصله‌های زمانی کوچک باشد و نقاط به تعداد کافی انتخاب شوند، خطاهای اتفاقی عددی کردن رکوردها را می‌توان در فرکانس‌های بالاتری نسبت به محدودیتی که توسط سایر عوامل در دستگاه شتاب‌نگار ایجاد می‌شود، قرار داد و بدین ترتیب می‌توان آن‌ها را توسط یک فیلتر پایین‌گذر تصحیح نمود.

به طور مشابه، با حذف کلیه فرکانس‌های پایین‌تر از یک فرکانس حدی توسط فیلتر بالا گذر می‌توان تصحیحات خط مبنا را (به قیمت از دست دادن برخی از اطلاعات مربوط به فرکانس‌های پایین) انجام داد. در حقیقت با این کار ترجیح داده می‌شود اطلاعات را در یک محدوده فرکانسی با یک دقت مشخص داشت تا این که تمام اطلاعات را در فرکانس‌های بالاتر و پایین‌تر که ممکن است خطاهای بزرگی را به همراه داشته باشند، حفظ کرد. توصیه می‌گردد هنگام فیلتر نمودن اطلاعات شتاب‌نگاشت‌ها محدوده فرکانس پایین را حتی‌الامکان کم‌تر از  $0.2$  هرتز و محدوده فرکانس بالا را برای داده‌های شتاب‌نگاشتی دستگاه‌هایی که به‌صورت مانسته رکوردگیری می‌نمایند (مانند اطلاعات شتاب‌نگاشتی دستگاه SMA-1) حدود  $22$  تا  $25$  هرتز (مشروط به انجام تصحیحات دستگاهی) در نظر گرفت. برای شتاب‌نگاشت‌های رقومی (که فرضاً توسط دستگاه‌هایی همچون SSA-2 که محدوده فرکانسی بسیاری از اطلاعات زمین‌لرزه‌ها را رکورد می‌کنند) توصیه می‌شود حدود  $25$  تا  $30$  هرتز در نظر گرفته شود. باید توجه نمود که محدوده‌های پیشنهادی صرفاً جنبه توصیه داشته و به منظور جلوگیری از حذف بی‌مورد اطلاعات زمین‌لرزه‌ها می‌باشد.

### ۳-۱-۷- پردازش رکوردهای پاسخ سد

پایین‌ترین سطح پردازش در پاسخ (سازه‌ای) محاسبه مقادیر بیشینه است. همان‌طور که قبلاً بیان شد مراحل پردازش رکورد نیاز به گردآوری اولیه داده‌ها و انجام اصلاحات لازم دارد.

پردازش با پیچیدگی بیش‌تر برای تعیین پارامترهایی است که رفتار دینامیکی سد را مشخص می‌کنند. مهم‌ترین این پارامترها که به منظور اعتبار بخشی و همسان‌سازی مدل‌های ریاضی به کار می‌روند عبارتند از: فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مدی و ضریب‌های میرایی اولین مدهای ارتعاشی.

فن‌آوری‌های شناخت سامانه که در حال حاضر، به ویژه برای سامانه‌های خطی یا نیمه خطی به خوبی جا افتاده است، در این محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عمل، با توجه به این که سد یک سامانه است و پاسخ ثبت شده در آن «خروجی» و جنبش ثبت شده در پایه «ورودی» به شمار می‌رود، روابط خروجی/ ورودی (توابع انتقالی) محاسبه می‌شوند و از طریق آن‌ها، با انجام پردازش بیش‌تر، پارامترهای مدی برآورد می‌شوند.

این برآوردها، به ویژه برآوردهایی که به شکل‌های مدی و حتی به مقدار بیش‌تر به میرایی مربوط می‌شوند، تحت تاثیر غیرخطی بودن سازه و الگوریتم‌های پردازش و همچنین خطاهای دستگاهی و آماری قرار می‌گیرند.



از این رو لازم است که حسگرها نیازهای مربوط به وقت، هم‌زمانی و پاسخ فرکانسی را به طور کامل دارا باشند. چنان‌چه آگاهی ژرف اولیه‌ای از سازه در دسترس باشد، فرآیند شناخت بسیار آسان‌تر می‌شود. این آگاهی (که یک پشتیبانی مهم از فرآیند پایش، هم در مرحله‌گزینه‌ش دست‌گاه و هم در مرحله پردازش داده‌ها است) می‌تواند از طریق انجام آزمون‌های ارتعاش اجباری به دست آید.

با آگاهی از پارامترهای مدال می‌توان قابلیت اعتماد مدل عددی و فرضیات تئوری را برآورد نمود. در واقع تحلیل موارد زیر امکان‌پذیر می‌باشد:

- کفایت مدل دو بعدی (که یک رویکرد متداول در تشخیص لرزه‌ای است) یا چنان‌چه مدل سه بعدی درخواست شده باشد.
  - اصلاح مقادیر اختیار شده برای مدول ارتجاعی بتن و سنگ
  - کفایت شبیه‌سازی بر هم کنش سد- مخزن از طریق مفهوم جرم اضافه شده
  - نیاز به معرفی بخشی از پی در محاسبات.
- به طور کلی، فرآیند تفسیر داده‌ها و شبیه‌سازی مدل ریاضی عملیات پیچیده‌ای است که به مقدار زیاد به ویژگی‌های خاص سد، آگاهی از مشکلات مربوط و درجه غلط بودن مدل‌های به کار رفته بستگی دارد. تا به امروز هیچ روش جا افتاده‌ای در ارتباط با این موضوع وجود ندارد و به این منظور آگاهی‌های تخصصی پیشرفته همراه با مهارت و تجربه مهندسی لازم است.
- با توجه به آنچه که در بالا عنوان شد نسبت به انجام تصحیحات لازم بر روی شتاب‌نگاشت‌های رکورد شده اقدام و سپس محاسبات مورد نظر بر روی آن‌ها انجام می‌شود. نتایج استخراج شده به صورت فایل‌های جداگانه برای پارامترهای شتاب، سرعت، جابه‌جایی، طیف فوریه و طیف پاسخ در می‌آید و سپس برای کنترل کننده رفتار سد ارسال می‌شود.

### ۳-۱-۸- نتیجه‌گیری و ارائه گزارش

پس از رویداد هر زمین‌لرزه و ثبت شتاب‌های آن توسط دستگاه‌های شتاب‌نگار نصب شده در محل سد باید به سرعت پردازش‌های لازم صورت گیرد. در صورتی که زلزله به شدت در محل احساس شده باشد باید نتایج آن به مدیر سد گزارش شود تا در صورت صلاحدید اقدامات اضطراری را به عمل آورد.

از طرف دیگر باید گزارشی مشتمل بر موارد زیر تهیه و سپس با تفسیر نتایج برای مشاور طرح کنترل و پایداری سد ارسال شود. در این گزارش ضمن شرح مختصری از نوع ایستگاه‌ها و شتاب‌سنج‌ها، گزارشی که شامل شکل‌های زیر همراه شرح و تفصیل آن‌هاست، ارائه می‌شود. این گزارش در نهایت به تعداد مورد نیاز تکثیر و توزیع می‌شود. این گزارش باید حاوی مطالب زیر باشد:

- محاسبه مقادیر بیشینه کمیت‌های اندازه‌گیری شده (شتاب، سرعت، و جابه‌جایی)
- محاسبه طیف پاسخ جنبش لرزه‌ای
- رسم منحنی شتاب رکورد شده
- رسم منحنی شتاب، سرعت و جابه‌جایی تصحیح شده به همراه جدول پارامترهای به کار گرفته شده برای تصحیحات منحنی رکورد شده



- مقایسه مقادیر بیشینه به دست آمده با مقادیر آستانه‌ای که از پیش تعیین شده است. در صورت لزوم، می‌توان یک سیگنال هشدار دهنده به وجود آورد.
- ارائه جدول مقادیر بیشینه شتاب، سرعت و جابه‌جایی برای ایستگاه‌های مختلف به همراه مشخصات زلزله مسبب. در این جدول مشخصات محل ایستگاه‌ها درج می‌شود.
- داده‌ها و نتایج پردازش شده مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های یک زمین‌لرزه خاص بر روی نوار مغناطیسی، دیسک یا لوح فشرده بایگانی می‌شود و یک کپی از آن باید برای مهندسان مشاور مربوط ارسال می‌شود.

### ۳-۲- نصب و بهره‌برداری از دستگاه‌های شتاب‌نگار

#### ۳-۲-۱- هدف

هدف اصلی از نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در محل سدها، ثبت شتاب‌نگاشت‌های جنبش ورودی زمین به سازه و پاسخ سازه‌ای آن است. در این بخش مراحل لازم برای پایش لرزه‌ای سدها، از طراحی و گزینش تجهیزات مناسب تا ملاحظات نصب، بهره‌برداری و نگهداری و در نهایت پردازش و توزیع داده‌های حاصل از تجهیزات نصب شده ارائه شده است.

#### ۳-۲-۲- دامنه کاربرد

این فصل دستورالعمل تجهیزات مورد نیاز شبکه شتاب‌نگاری پایش لرزه‌ای سدها را در بر می‌گیرد. جنبه‌های مختلف شبکه شتاب‌نگاری اعم از طراحی، نصب، بهره‌برداری و همچنین گزارش‌دهی از نتایج قرائت‌ها با جزئیات لازم در این راهنما ارائه شده است.

#### ۳-۲-۳- انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار

شتاب‌نگارها بر اساس سامانه ثبت آن‌ها به پنج نوع تقسیم می‌شوند که تمامی آن‌ها دارای شش ویژگی مشترکند. انواع شتاب‌نگارها در جدول (۳-۲) ارائه شده است.

جدول ۳-۲- انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار

ردیف	نوع شتاب‌نگار
۱	فیلم مانسته
۲	نوع مغناطیسی مانسته FM
۳	نوار رقمی با فرمت مستمر
۴	نوار رقمی با فرمت بلوکی
۵	حافظه رقمی

#### ۳-۲-۳-۱- مشخصات فنی و فیزیکی دستگاه‌ها

در سه دهه گذشته پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در تجهیزات شتاب‌نگاری حاصل شده است. تولید کنندگان تجهیزات شتاب‌نگاری و حرفه مهندسی زلزله به این نتیجه رسیدند که رکوردهای شتاب‌نگاشتی بیش‌تر و بهبود یافته مورد نیاز است. از آن‌جا که چندین سد تکان‌های شدیدی را در هنگام زلزله تجربه کردند، تعدادی از مجریان سدها برای بهبود چنین دستگاه‌هایی علاقه جدی نشان دادند.



امروزه انواع متعددی از تجهیزات شتاب‌نگاری موجود است. هنگام انتخاب نوع دستگاه(ها) برای استفاده در هر سد، مجریان و مهندسان باید از ویژگی‌ها، مزیت‌ها، کاربردها و مقرون به صرفه بودن هر نوع از آن‌ها آگاه باشند.

شتاب‌نگارها که تاریخچه زمانی شتاب ناشی از لرزش زمین را در یک ساختگاه ثبت می‌کنند، دستگاه‌های مبنا برای ثبت جنبش نیرومند زمین می‌باشند. توسعه و پیشرفت در سه دهه گذشته توانمندی ثبت رکوردها را بهبود بخشیده است. دامنه این پیشرفت از ثبات‌های فیلم مانسته<sup>۱</sup> قدیمی تا تنوع وسیعی از دستگاه‌های رقمی<sup>۲</sup> را در بر می‌گیرد.

ویژگی‌های مشترک شتاب‌نگارها در جدول (۳-۳) ارائه شده‌است.

جدول ۳-۳- ویژگی‌های مشترک انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار

ردیف	ویژگی‌های مشترک
۱	یک راه‌اندازی یا استارتر قابل تنظیم
۲	سه شتاب‌سنج نصب شده در جهت‌های متعام
۳	یک ثبات به شکل تاریخچه زمانی
۴	یک سامانه زمانی
۵	یک منبع تغذیه بدون وقفه
۶	یک قاب برای حفاظت دستگاه در برابر عناصر پیرامونی

با هر کدام از پنج نوع دستگاه معمولاً امکان اصلاح و تغییر و یا مشخصات اختیاری وجود دارد. برای مثال، تامین باطری داخل دستگاه یا خارج از آن، ثبات مرکزی و حسگرهای راه دور هم‌زمان، انواع درون‌چاهی و غیره.

پیشرفت‌های اخیر در الکترونیک به طور قطع ثبات‌های فیلم مانسته و نوار رقمی را از رده خارج کرده است، ولی تعدادی از آن‌ها هنوز نصب و در حال کار می‌باشند. با این حال، هزینه پردازش رکوردها مانند رقمی کردن فیلم مانسته، به ویژه اگر تعداد رکوردها زیاد باشد، ممکن است قابل توجه باشد. از این‌رو، جایگزین کردن ثبات‌های فیلم مانسته با دستگاه‌های حافظه رقمی باید مقرون به صرفه باشد.

در حال حاضر مجموعه وسیعی از شتاب‌نگارهای رقمی در بازار موجودند که به طور عمده در میزان حساسیت<sup>۳</sup> و مقدار حافظه تفاوت دارند. حساسیت ثبات‌های رقمی معمولاً بر حسب بیت<sup>۴</sup> بیان می‌شود که در محدوده بین ۱۲ تا ۲۰ یا ۲۴ بیت است. مقادیر اخیر در شتاب‌نگارهایی هستند که در سال‌های اخیر طراحی شده‌اند. مقدار حافظه از چند مگا بایت برای حافظه با دستیابی تصادفی<sup>۵</sup> تا ۲۰ یا ۴۰ مگا بایت برای دستگاه‌هایی که به کارت‌های حافظه مجهز اند، تغییر می‌کند.

بهای شتاب‌نگارهای رقمی در چند سال اخیر به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که با دستگاه‌های مانسته قابل مقایسه و یا حتی پایین‌تر از آن‌ها است. به طور تقریبی، بهای شتاب‌نگارهای رقمی با افزایش حساسیت و مقدار حافظه و همچنین با نصب دستگاه‌های الحاقی در داخل شتاب‌نگار مانند مودم<sup>۶</sup>، مولدهای کد زمان<sup>۷</sup>، جایاب<sup>۸</sup> و غیره افزایش می‌یابد.

- 1- Analog
- 2- Digital
- 3- Resolution
- 4- Bit
- 5- Random Access Memory (RAM)
- 6- Modem
- 7- Time Code Generator (TCG)
- 8- Global Positioning System (GPS)



در برخی موارد، هزینه‌های نصب ممکن است به مراتب بیش از قیمت خرید دستگاه باشد. نصب دستگاه می‌تواند به سادگی پیچ کردن شتاب‌نگار به سطح داخلی یک سازه بوده، یا به پیچیدگی قرار دادن دستگاه در یک گمانه با هزینه‌های زیاد مربوط به آن باشد. همچنین هزینه‌های اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر ممکن است قابل توجه باشد، مثلاً، در محل‌هایی که نیاز به کابل‌های گسترده و کانال‌کشی است. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری که شامل قطعات یدکی و آموزش تکنسین‌ها است، می‌تواند با توجه به تعدادی از عوامل ویژه ساختگاهی به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت باشد.

### ۲-۳-۲-۳- ویژگی‌های اجزای دستگاه‌ها

ویژگی اجزای انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار در بندهای ۲-۳-۲-۳، ۴-۳-۲-۳ و ۵-۳-۲-۳ ارائه شده است.

### ۲-۳-۲-۳- گزینش نوع دستگاه

در مناطق با لرزه‌خیزی پایین که در طول عمر سد انتظار رویداد زمین‌لرزه‌های کمی در آن‌ها می‌رود، دستگاه‌های ساده با مقدار حافظه کم ممکن است با صرفه‌ترین دستگاه برای نصب باشد. در مناطق با لرزه‌خیزی بالا که در آن، احتمالاً زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های بسیاری روی می‌دهند، استفاده از دستگاه‌هایی با قیمت اولیه بالاتر ولی با مقدار حافظه بیش‌تر ترجیح دارد. تمامی شتاب‌نگارهای رقمی جدید این امکان را برای مسوولان سد فراهم می‌آورند که به منظور بازبینی و تحلیل داده‌ها، دسترسی فوری به رکوردهای رقمی داشته باشند. همچنین این امکان وجود دارد که بتوانند بلافاصله پس از رویداد یک زمین‌لرزه از راه دور با شتاب‌نگارها ارتباط برقرار کنند. انواع شتاب‌نگارها به همراه ویژگی‌های مشترک آن‌ها به ترتیب در جدول‌های (۲-۳) و (۳-۳) ارائه شده‌اند.

### ۲-۳-۲-۳- شتاب‌نگارهای فیلم مانسته

به رغم آن که این شتاب‌نگارها دیگر تولید نمی‌شوند، ولی در حال حاضر بیش‌ترین نوع دستگاه‌های شتاب‌نگار در سدها در سراسر جهان می‌باشند که ارتعاشات زمین را بر روی فیلم‌های عکاسی ثبت می‌کنند. چنین دستگاه‌های مانسته‌ای معمولاً دستگاه‌های استاندارد هستند که به تنهایی کامل بوده و در هر کجا نصب شوند می‌توانند ارتعاشات را ثبت کنند. این دستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا جنبش‌های نیرومند را شناسایی و ثبت کنند، یا بتوانند از طریق اتصال به یکدیگر به سامانه‌های ساختگاه‌های خاص تبدیل شوند. چنین سامانه‌هایی ممکن است شامل شتاب‌نگارهای کاملی باشند که به یکدیگر متصل شده‌اند یا دارای واحدهای ثبت مرکزی باشند که به شتاب‌سنج‌های راه دور متصل شده‌اند. به طور کلی، در سامانه‌ای که در آن دستگاه‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند، یکی از دستگاه‌ها به عنوان اصلی<sup>۱</sup> عمل می‌کند. بدین صورت که هنگامی که زمین‌لرزه‌ای روی دهد به گونه‌ای که جنبش ناشی از آن از آستانه راه‌اندازی از پیش تنظیم شده فراتر رود، ساز و کار ثبت تمامی دستگاه‌ها را در سامانه به کار می‌اندازد و رکوردهایی با زمان مشترک فراهم می‌آورد.

به طور معمول اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر از طریق سیم‌های رابط انجام می‌شود. اگر سامانه‌های کامل و خودکفا از طریق سیم به یکدیگر وصل نشده باشند ولی دارای مولد کد زمان داخلی، یا گیرنده‌های کد زمان رادیویی باشند، هر دستگاه ممکن است با اختلاف زمانی اندکی آغاز به کار کند. با این حال، هر رکورد دارای سیگنال‌های زمانی یکسان و ارتباط دقیق رکوردها بوده و تحلیل پاسخ دینامیکی کامل سازه امکان‌پذیر خواهد بود. مولدهای کد زمان برای بسیاری از سامانه‌ها ترجیح داده می‌شود.



راه‌اندازی<sup>۱</sup> یا آغاز به کار لرزه‌ای دستگاه‌ها معمولاً در حد ۰/۰۱ شتاب زمین (g/۰/۰۱) تنظیم می‌شود. با این حال، بسته به لرزه‌خیزی ساختگاه سد، می‌توان معیارهای دیگری را برگزید. شتاب افقی زمین هنگامی «نیرومند» تلقی می‌شود که از ۰/۰۵ g فراتر رود. چنین جنبشی به عنوان حداقل لرزش از نقطه نظر مهندسی تعریف می‌شود. معمولاً برای آغاز به کار دستگاه، راه‌اندازی لرزه‌ای مولفه قائم به کار می‌رود. تمامی انواع دستگاه‌های شتاب‌نگار با راه‌اندازی مولفه قائم آغاز به کار می‌کنند.

اکثر شتاب‌نگارهای موجود بر روی یا مجاورت سدها نصب شده‌اند. تعداد کم‌تری نیز در سازه‌های جنبی سدها قرار دارند. برخی از سدها دارای حسگرها یا شتاب‌سنج‌های درون‌چاهی‌اند که به ثبات‌هایی بر روی سطح زمین متصل شده‌اند. بسیاری از دستگاه‌های درون‌چاهی در سوراخ‌های حفاری شده نصب می‌شوند که با شن‌ها یا ماسه‌های درشت خاکریزی شده‌اند. هر دوی آن‌ها دستگاه‌ها را در محل «قفل» می‌کنند و معمولاً امکان دستیابی مجدد به آن‌ها را میسر می‌سازند. تجهیزات مربوط به قفل کردن و باز کردن در درون چاه‌ها در سال‌های اخیر در دسترس قرار گرفته است. دستگاه‌هایی که قابل دسترسی نباشند و نتوانند از محل خارج شوند، نمی‌توانند نگهداری شوند و پس از چند سال ممکن است از کار بیفتند یا قابلیت اعتماد آن‌ها زیر سوال برود. نصب تعداد بیش‌تری شتاب‌نگار در این‌گونه محل‌ها، زمان و قابلیت اعتماد نتایج را افزایش می‌دهد.

نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در زیرزمین به منظور تامین اطلاعاتی از موارد حل نشده با اهمیت از نظر مهندسی انجام می‌شود، مواردی مانند (۱) اثرات نهشته‌های خاکی پی محلی، (۲) استعداد روانگرایی، (۳) جنبش ورودی به سازه، و (۴) پاسخ در سازه. برای دستیابی به این موارد، مهندسان ناچار بودند به پیش‌بینی مدل‌های تئوریک بسنده کنند، در حالی که برای تشخیص و تایید یا واسنجی این مدل‌ها داده‌های ثبت شده واقعی در دست نداشتند.

ظهور و ثبوت شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده بر روی فیلم می‌تواند به آسانی و به سرعت انجام شود. تنها یک اتاق تاریک و مواد شیمیایی عکاسی مورد نیاز است. با این حال، برای کاربردهای پیشرفته تحلیل دینامیکی که از برنامه‌های کامپیوتری استفاده می‌شود، رکورد باید رقمی شود. رقمی کردن چه با دست انجام شود چه به صورت خودکار، یک فرآیند نسبتاً هزینه‌بر است.

### ۳-۲-۳-۵- شتاب‌نگارهای با ثبات‌های نواری

سامانه‌های شتاب‌نگاری که از ثبات‌های نواری اعم از مانسته یا رقمی استفاده می‌کنند، در بسته‌های کامل یا با واحدهای ثبت مرکزی در دسترس می‌باشند. سامانه‌های مانسته در اثر تکان زلزله آغاز به کار می‌کنند، و پس از رویداد، به طور خودکار برای ثبت رویدادهای بعدی دوباره آماده به کار می‌شوند. سامانه‌های رقمی دارای راه‌اندازی رقمی و حافظه پیش از رویداد متغیر و پاسخ فرکانسی پهن‌تری هستند، در حالی که سامانه‌های مانسته فاقد حافظه پیش از رویدادند و پهنای پاسخ فرکانسی آن‌ها کم‌تر از انواع رقمی است. چنان‌چه شتاب‌نگارهای رقمی به یکدیگر متصل شوند نمونه‌برداری<sup>۲</sup> مشترکی فراهم می‌آورند و در نتیجه این امکان به وجود می‌آید که بین محل‌ها اختلاف فازهای جزئی<sup>۳</sup> تحلیل شوند. برای رقمی کردن رکوردهای نواری، ابتدا نوارها از محل خارج شده و سپس برای اثرات متنوع دستگاهی پردازش و اصلاح می‌شوند.

- 1- Trigger
- 2- Sampling
- 3- Fine



### ۳-۲-۳-۶- دستگاه‌های رقمی

مزیت این نوع شتاب‌نگارهای رقمی حافظه الکترونیکی آن‌ها است. این مزیت به علت فقدان قطعات متحرک مانند حرکت فیلم و چرخاننده نوار در قسمت ثبات شتاب‌نگار است. با حذف این قطعات متحرک، خرابی‌های مکانیکی و مشکلات مربوط به آن‌ها کاهش می‌یابد و دستگاه به طور ذاتی قابل اعتمادتر می‌شود. در این دستگاه‌ها، برخلاف انواع فیلمی و نواری، رکورد به طور فیزیکی از شتاب‌نگار خارج نمی‌شود، اما از حافظه دستگاه در محل نصب به حافظه با دستیابی تصادفی یک کامپیوتر شخصی قابل حمل انتقال می‌یابد. این انتقال همچنین می‌تواند از طریق تلفن، ماهواره، یا رادیو به یک محل مرکزی صورت گیرد. مزایای دیگر این دستگاه‌ها عبارتند از: (۱) رکورد پیش از رویداد که شروع رویداد را قبل از راه‌اندازی سیگنال امکان‌پذیر می‌سازد، و (۲) ترازهای نوفه به سیگنال بسیار پایین‌تر که اجازه می‌دهد اطلاعات مفیدی با دامنه پایین‌تر یا باند پریودی پهن‌تر به دست آیند. هر شتاب‌سنجی می‌تواند کار ثبت را در یک ارائه انجام دهد، از این رو قابلیت اعتماد دستگاه بالا می‌رود. افزون بر آن، چنان‌چه در یک ساختگاه شتاب‌نگارها برای ارتباط از راه دور طراحی شده باشند، بازدهی‌های کم‌تری از دستگاه مورد نیاز خواهد بود.

### ۳-۲-۳-۷- قابلیت اعتماد انواع مختلف دستگاه‌ها

قابلیت اعتماد شتاب‌نگارها به مقدار زیاد بستگی به نصب مناسب، پیش‌بینی شرایط محیطی خوب برای بهره‌برداری و نگهداری منظم دارد.

به رغم معرفی نسبتاً اخیر شتاب‌نگارهای رقمی، مقایسه قابلیت اعتماد این نوع دستگاه‌ها با انواع مانسته فیلمی، مانسته نواری، یا رقمی نواری امکان‌پذیر است. همان‌طور که قبلاً بیان شد فقدان قطعات متحرک در دستگاه‌های رقمی قابلیت اعتماد را بالا می‌برد، در عین حال جایگزینی قطعات معیوب را آسان‌تر و ارزان‌تر می‌سازد.

سامانه‌های نصب شده در سطح زمین تاریخچه نسبتاً طولانی از استفاده موفقیت‌آمیز تحت شرایط متنوع اقلیمی، مدت سرویس و نگهداری داشته‌اند. در حال حاضر به تعداد کافی از کارشناسان و تکنسین‌های ماهر در بهره‌برداری و سرویس آن‌ها وجود دارد. پرسنل نگهداری جدید، بدون داشتن زمینه‌های پیشرفته در الکترونیک، می‌توانند برای سرویس دستگاه‌ها به مقدار کافی آموزش ببینند. افزون بر آن، تاریخچه طولانی استفاده و تولید نسبتاً بالای دستگاه‌ها به قابلیت اعتماد بالا و قیمت قابل قبول منتهی شده است.

در مقایسه سامانه‌های نصب شده در سطح زمین با سامانه‌های درون‌چاهی، سامانه‌های سطحی به علت نگهداری و جایگزینی نسبتاً راحت آن‌ها از قابلیت اعتماد بیش‌تری برخوردارند. هزینه تجهیزات و نصب برای سامانه‌های شتاب‌نگاری درون‌چاهی معمولاً بالاتر از سامانه‌های سطحی است و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به قابلیت اعتماد، کاربرد آن‌ها باید با دقت بیش‌تری ارزیابی شود.

### ۳-۲-۳-۸- گزینه‌های اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر

گزینه‌های اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر که در بالا به آن‌ها اشاره شد می‌تواند کاملاً متنوع باشد. این گزینه‌ها به همراه مزیت‌ها و کاستی‌های هر یک در جدول (۳-۴) ارائه شده‌اند.



جدول ۳-۴- گزینه‌های اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر

گزینه ۱- دستگاه‌ها بدون اتصال به یکدیگر	مزیت: الف- هزینه کم‌تر برای سخت افزار و نصب ب- اشتباه کم‌تر در (آغاز به کار) در اثر تداخل الکتریکی کاستی: زمان مشترک برای راه‌اندازی وجود ندارد.
گزینه ۲- اتصال از طریق سیم‌های سخت با استارت مشترک و زمان مشترک	مزیت: الف- استارت مشترک از طریق فراهم آوردن استارترهای اضافی، که هر یک می‌تواند کل سامانه را به کار اندازد، قابلیت اعتماد سامانه را ارتقا می‌دهد. ب- زمان مشترک به کاربر اجازه می‌دهد تا رکوردها از هر یک از دستگاه‌ها، هم‌زمان <sup>۱</sup> شوند. کاستی: الف- برخی مواقع هزینه بالای کابل کشی ب- آسیب‌پذیری بیش‌تر در اثر صاعقه پ- مستعد راه‌اندازی اشتباه در اثر نوسانات الکتریکی یا سیگنال‌های رادیویی که از سیم‌کشی‌های اتصال دستگاه‌ها برمی‌خیزد، مگر آن که الگوریتم راه‌اندازی ویژه‌ای فراهم شده باشد.
گزینه ۳- دستگاه‌ها بدون اتصال به یکدیگر- دستگاه‌ها دارای رادیو باشند.	مزیت: الف- زمان رادیویی منبع زمان یکسان <sup>۲</sup> فراهم می‌آورد. ب- زمان رادیویی به کاربر اجازه می‌دهد تا رکوردها از هر یک از دستگاه‌ها، هم‌زمان شوند. کاستی: الف- هزینه رادیوها ب- هزینه آنتن‌ها و نصب آن‌ها پ- ساختگاه سدها برخی مواقع قدرت سیگنال رادیویی ضعیف یا متغیری دارد.
گزینه ۴- دستگاه‌ها بدون اتصال به یکدیگر- دستگاه‌ها دارای مولد کد زمان باشند.	مزیت: الف- مولد کد زمان منبع زمان یکسان فراهم می‌آورد. ب- مولد کد زمان به کاربر اجازه می‌دهد تا رکوردها از هر یک از دستگاه‌ها، هم‌زمان شوند. کاستی: الف- هزینه مولد کد زمان ب- هزینه کنترل‌کننده نمایشگر زمان پ- مولد کد زمان ممکن است منحرف شود و نیاز به اصلاح زمان و درون‌یابی باشد.
گزینه ۵- اتصال از طریق سیم‌های سخت دستگاه‌ها دارای رادیو یا مولد کد زمان باشند.	مزیت: الف- مولد کد زمان یا رادیو به تمامی دستگاه‌های متصل شده به یکدیگر منبع زمان یکسان می‌دهد. ب- مولد کد زمان یا رادیو به کاربر اجازه می‌دهد تا رکوردها از هر یک از دستگاه‌ها، هم‌زمان شوند. کاستی: الف- هزینه مولد کد زمان یا رادیو و قطعات مربوط ب- هزینه کابل کشی پ- آسیب‌پذیری در برابر صاعقه

## ۳-۲-۳-۹- مشکلات اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر

اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر از طریق سیم‌های سخت مشکلات ویژه‌ای دارد. اگر سیم‌ها در داخل کانال یا مجرای مخصوص قرار داده نشوند، ممکن است جوندگان آسیب‌هایی را وارد آورند. صاعقه باعث نوسان برق می‌شود و ممکن است به حسگرها (شتاب‌سنج‌ها) و ثبات‌ها آسیب برساند.

به نظر می‌رسد دستگاه‌های نصب شده در درون چاه‌ها در معرض آسیب ناشی از صاعقه قرار داشته باشند. سامانه‌های حفاظتی با کیفیت بالا و چند بار مصرف گراندند، ولی می‌توانند با پیشگیری از آسیب‌های وارده و یا به حداقل رساندن هزینه‌های جایگزینی، دستگاه‌ها را آماده به کار نگهدارند. به منظور پیشگیری از آسیب‌های ناشی از ترافیک زمینی، جانوران و خرابکاری، در حالت مطلوب کابل‌ها را باید در کانال‌های زیر زمینی قرار داد یا آن‌ها را دارای حفاظ یا پوشش نمود.

- 1- Synchronize
- 2- Real time





### ۳-۲-۴- نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار

#### ۳-۲-۴-۱- محل نصب

دستگاه‌ها در هر سد باید در محل‌های مشخصی نصب شوند. مکان‌یابی عمومی برای نصب دستگاه‌ها بر اساس عملکرد سد و دسترسی به آن‌ها در بخش‌های پیشین ارائه شده است. اگر تحلیل‌های عملکرد ریاضی در دسترس نباشد، باید طرحی را به اجرا در آورد که در آن حداقل‌هایی برای نصب تعدادی دستگاه در محل سد در نظر گرفته شود. این طرح حداقل عبارت است از نصب یک یا چند دستگاه در تاج سد و یک یا چند دستگاه در پنجه پایین دست سد، در امتداد یا نزدیک مقطع بیشینه سد یعنی محلی که حداکثر تغییر شکل‌ها و یا تنش‌ها قابل انتظارند. پس از آن که بر روی این مکان‌ها به صورت کلی تصمیم‌گیری شد، محدودیت‌های ثانویه‌ای مانند دسترسی، ترافیک، زهکشی، تامین برق، ارتعاشات زمینه و غیره باید مورد توجه قرار گیرند.

#### ۳-۲-۴-۲- شالوده و نحوه نصب دستگاه‌ها به زمین و سد

دستگاه‌های شتاب‌نگار یا شتاب‌سنج‌های با واحد ثبت مرکزی، در محل‌هایی باید نصب شوند که به سازه و شالوده یا زمین طبیعی کاملاً مهار شوند. در سدهای بتنی، معمولاً شالوده و یا کف‌سازی ویژه‌ای مورد نیاز نمی‌باشد. در این سدها صرف نظر از این که محل نصب در تاج، یا در گالری، تورفتگی و یا در فضای خالی سد باشد، دستگاه معمولاً به طور مستقیم به سازه پیچ می‌شود. به منظور ملاحظات زهکشی، دستگاه‌ها می‌توانند بر روی پایه‌ها و یا سکوه‌های کوتاه پیچ شوند. در سدهای خاکی و در زمین طبیعی، معمولاً یک کف بتنی به عنوان تکیه‌گاه دستگاه ساخته می‌شود. برای اطمینان از کوبلینگ نزدیک با شالوده، کف می‌تواند دارای پایه‌های کوتاهی باشد که تا داخل زمین امتداد می‌یابند. در حالت مطلوب، یک جایگاه بتنی واحد برای پایه‌ها و کف وجود خواهد داشت و آرماتورها از کف به پایه‌ها امتداد پیدا می‌کنند (شکل ۳-۱۲). سپس دستگاه به کف پیچ می‌شود. بهتر است که به منظور اطمینان از زهکشی، قسمت میانی کف را کمی بلندتر ساخت و دستگاه را به آن پیچ نمود. کف‌ها معمولاً برای قرار دادن اتافک محافظ دستگاه بر روی آن‌ها ساخته می‌شوند. کف‌ها باید به اندازه‌ای باشند که فرکانس طبیعی‌شان بالاتر از فرکانس شتاب‌سنج‌ها و یا شتاب‌نگارهای میدان نزدیک (محدوده حدود ۱۵ کیلومتر) باشد تا بر روی رکوردهای شتاب‌نگاشتی اثر نگذارند.

شتاب‌نگارهایی که برای ثبت پاسخ سازه در سازه‌های جنبی نصب می‌شوند، نباید در قفسه‌ها و یا بخش‌های دیگر سازه نصب شوند زیرا مد ارتعاشی این بخش‌ها ممکن است با سازه اصلی که ثبت پاسخ آن مورد نظر است، متفاوت باشد. اگر این سازه‌های جنبی آنقدر اهمیت دارند که نصب دستگاه در آن‌ها ضروری است، پس باید دستگاه به طور مستقیم به عضو سازه‌ای اصلی متصل شود.

در ساختگاه‌های میدان آزاد و هنگامی که محل نصب کوچک است (مانند شکل‌های ۳-۱۲، ۳-۱۳ و ۳-۱۴)، برهم کنش خاک-سازه در هنگام زمین‌لرزه اثر کمی بر جنبش‌های با فرکانس‌های کم‌تر از ۲۰ هرتز دارد. با این حال، محل نصب خیلی بزرگ‌تر سبب بزرگ‌نمایی قابل ملاحظه‌ای در جنبش‌های با فرکانس‌های بزرگ‌تر از حدود ۵ هرتز می‌شود. کاهش ارتفاع دستگاه شتاب‌نگار از بالای مرکز گرانش کف، و کاهش جرم کف‌ها، می‌تواند برهم کنش خاک سازه را کاهش دهد.



### ۳-۲-۴-۳- جهت نصب دستگاه‌ها

همان‌طور که قبلاً بیان شد، دستگاه‌های شتاب‌نگاری که شتاب‌سنج‌های سه مولفه‌ای دارند باید در جهتی نصب شوند که دو شتاب‌سنج افقی به ترتیب موازی و عمود بر محور سد و شتاب‌سنج سوم هم در جهت قائم باشد. در مورد سدهای قوسی، یک شتاب‌سنج افقی به محور سد مماس و دیگری عمود بر آن می‌شود. شروع به کار دستگاه در اثر زمین‌لرزه می‌تواند برای جهت افقی یا قائم تنظیم شود. با این حال، به طور عادی شروع به کار دستگاه‌های شتاب‌نگار در جهت قائم است زیرا نخستین موجی که وارد ساختگاه می‌شود، یعنی موج فشاری (یا P)، به آسانی حس شده و ثبات‌ها پیش از رسیدن امواج برشی (یا S) فعال می‌شوند.

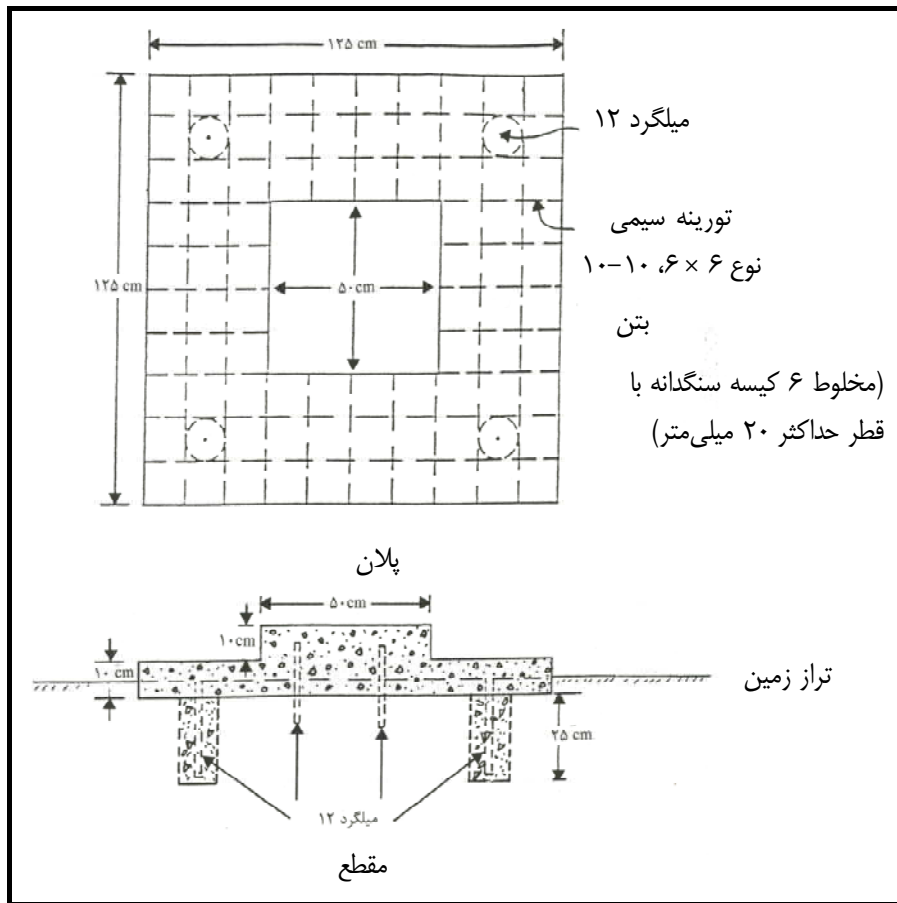
### ۳-۲-۴-۴- اتاقک ایستگاه‌ها

یک اتاقک قابل قبول (شکل ۳-۱۳) باید دستگاه را در برابر آب و هوا حفاظت کند و مقدار کمی هم تبادل حرارتی ایجاد نماید و فضای کافی برای تجهیزات و نگهداری آن‌ها داشته باشد. یک اتاقک سبک با سطح مقطع کوچک این اطمینان را می‌دهد که رکورد در اثر جنبش اتاقک تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. دیواره‌ها و سقف نباید از واحدهای پیش‌ساخته‌ای که لق می‌خورند، ساخته شود زیرا امکان دارد این قطعات در هنگام زمین‌لرزه به یکدیگر ضربه بزنند و باعث تغییر شکل داده‌های ثبت شده شوند. افزون بر آن درب‌های اتاقک نباید به ارتعاش در آیند.

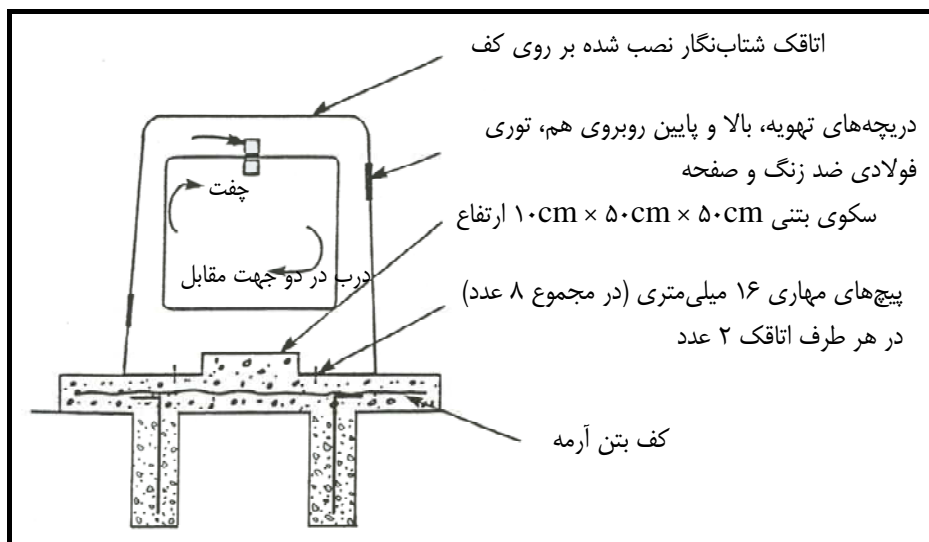
اتاقک باید برای گردش هوا و خنک شدن دارای تهویه باشد. به منظور حفاظت در برابر حشرات و گرد و غبار، باید صفحه‌های مشبک (توری) و صافی‌هایی بر روی تهویه‌ها نصب شود. تهویه‌ها می‌توانند در یک سمت، پایین و در سمت دیگر، بالای اتاقک تعبیه شوند. قرار دادن تهویه پایین رو به سمت جنوب، یا در سمتی که در معرض آفتاب بیش‌تری است تراوش آب را از طریق تهویه در هنگام تابش شدید کاهش می‌دهد. این اقدام همچنین تراوش آب را از طریق تهویه در هنگام انباشت برف کاهش می‌دهد زیرا برف در سمت شمال یا سمت سایه‌دار انباشته می‌شود. ممکن است قرار دادن یک عایق سنگین در اطراف داخل اتاقک در ارتفاعات زیاد یا در عرض‌های شمالی کشور ضروری باشد.

با ساخت پایه‌ای به ارتفاع چند سانتی‌متر و کمی کوچک‌تر از ابعاد داخلی اتاقک (شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴)، می‌توان از خشک بودن کف محل نصب دستگاه شتاب‌نگار و باطری اطمینان حاصل نمود. برای چنین پایه‌ای در ساختگاه‌های مختلف ابعاد متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است. برخی آن را بلندتر می‌سازند و یک سطح فوقانی کوچک‌تر برای دستگاه می‌گذارند، ولی در قبال آن فضای بیش‌تری برای راحتی کار در داخل اتاقک فراهم می‌کنند. یک اتاقک متداول در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است.



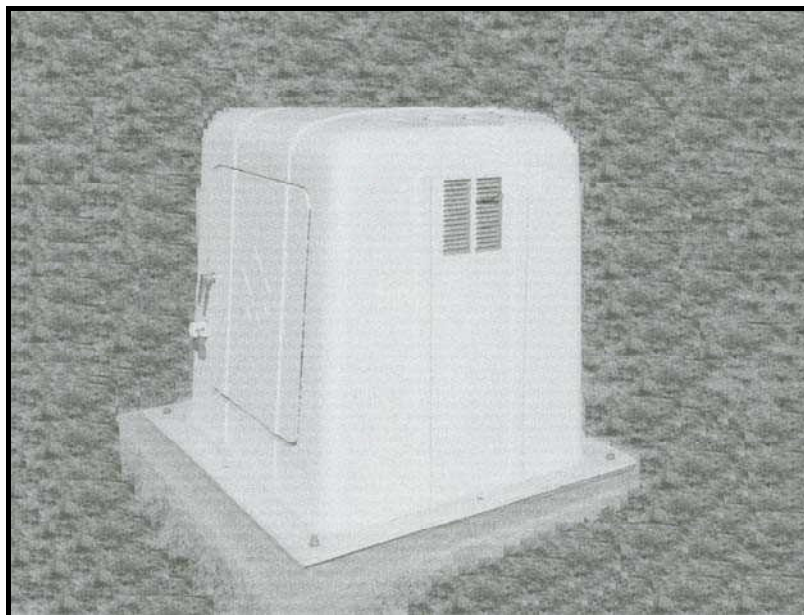


شکل ۳-۱۲- کف بتنی برای دستگاه شتاب‌نگار و اتاقک بر روی مواد یا مصالح تحکیم نشده



شکل ۳-۱۳- کف نمونه اتاقک دستگاه شتاب‌نگار





شکل ۳-۱۴- نصب معمول دستگاه شتاب‌نگار بر روی تاج یک سد خاکی

### ۳-۲-۴-۵- خصوصیات فیزیکی و اقلیمی محل نصب دستگاهها

اتاقک محل نصب دستگاه در هنگام هوای گرم باید از تهویه خوب برخوردار باشد. در مناطقی که هوا بسیار سرد می‌شود و به پایین‌تر از درجه یخبندان می‌رسد، ممکن است اتاقک‌های با هوابندی و عایق‌بندی خوب مورد نیاز باشد. در برخی مکان‌ها، اتاقک‌ها به وسیله بخاری‌های برقی گرم می‌شوند و کمک می‌کنند تا محوطه دستگاه خشک بماند. ساختگاه‌های بسیاری وجود دارند که در معرض هر دو هوای بسیار گرم و بسیار سرد قرار دارند. در این‌گونه مناطق می‌توان، در هنگام بازدیدهای معمول دستگاه‌ها، اتاقک‌ها را به طور فیزیکی برای دمای بسیار گرم و یا بسیار سرد (باز کردن یا بستن تهویه‌ها، افزودن یا برداشتن عایق) مطابقت داد.

### ۳-۲-۴-۶- تامین برق مورد نیاز برای بهره‌برداری از دستگاهها

دستگاه‌های شتاب‌نگار معمولاً با باتری کار می‌کنند. برای بهره‌برداری مطمئن از دستگاه، باتری‌ها باید به یک شارژر وصل شوند. شارژر هم باید به برق و یا صفحات خورشیدی متصل گردد. دسترسی آسان به یک خط برق یا عدم دسترسی به آن می‌تواند در تعیین محل نصب دستگاه اثر بگذارد. اگر خط برق در دسترس نباشد و ناگزیر باید از صفحات خورشیدی استفاده شود، دستگاه باید در محلی نصب شود که در معرض تابش خوب نور خورشید بوده و حداقل خطرپذیری (ریسک) برای تجهیزات جانبی وجود داشته باشد.

### ۳-۲-۵- ملاحظات بهره‌برداری و نگهداری

انتخاب محل مناسب و نصب صحیح تجهیزات نقش مهمی در بالا بردن کیفیت و مفید بودن رکوردهای به دست آمده دارد. نگهداری و بازدیدهای دوره‌ای تجهیزات این اطمینان را می‌دهد که دستگاه‌ها در هنگام رویداد زلزله آماده به کار باشند. ملاحظات مربوط به آماده کردن ساختگاه، نصب و نگهداری تجهیزات در ادامه ارائه می‌شود.



### ۳-۲-۵-۱- بهره‌برداری از دستگاه‌های مانسته (آنالوگ)

هنگامی که استارتر دستگاه، شتاب اولیه زلزله را که بیش از آستانه از پیش تنظیم شده باشد حس کند، ثبات دستگاه تحریک می‌شود و در کم‌تر از ۱۰۰ میلی ثانیه به طور کامل به کار می‌افتد (مقدار شتاب آستانه قابل تنظیم است و می‌تواند از قبل تنظیم شود). بسته به نوع راه‌انداز دستگاه، هم جنبش قائم و هم جنبش افقی می‌تواند ثبات را به کار اندازند. تا هنگامی که سیگنال‌های دریافت شده توسط استارتر بالاتر از سطح (راه‌انداز) تنظیم شده باشد، ثبات به کار خود ادامه می‌دهد. افزون بر آن، ثبات مقدار زمان بیش‌تری (معمولاً ۱۰ ثانیه ولی برخی مواقع ۲۰ ثانیه و یا بیش‌تر) کار می‌کند تا اجازه دهد که بخش ثبت شده در فیلم در محفظه مخصوص قرار گیرد. رکورد فیلم معمولاً پس از هر استارت دستگاه برداشته می‌شود، ولی در صورت نیاز یا تمایل رکوردهای زلزله و پس‌لرزه می‌توانند تا مدت ۲۵ دقیقه در یک حلقه فیلم ثبت شوند.

آزمون‌های انحراف<sup>۱</sup> معمولاً پیش از تحویل دستگاه توسط سازنده به اجرا در می‌آید. آزمون‌های انحراف بر اساس تغییر مکان ردّ لرزه‌نگار، حساسیت دستگاه را تعیین می‌کند. بدین منظور، نخست شتاب‌سنج‌ها در یک جهت در میدان گرانش زمین چرخانده می‌شوند. هر مقدار از شتاب قائم یا افقی تا میزان یک g می‌تواند به دست آید. تغییر مکان تعادل در یک حساسیت دستگاه را نشان می‌دهد. چرخاندن شتاب‌سنج‌ها در فاصله‌های زمانی معین اندازه‌گیری‌هایی را تولید می‌کند که خطی بودن را کنترل می‌نماید. آزمون‌های حساسیت دستگاه که توسط سازنده انجام می‌شود عموماً تحت شرایط آزمایشگاهی صورت می‌گیرد.

آزمون‌های واسنجی برای میرایی و فرکانس طبیعی به آسانی توسط تکنسین‌ها انجام می‌شود. توالی‌های واسنجی در هنگام هر بازدید ثبت می‌شوند، از این رو اگر دستگاه به علت رویداد زمین‌لرزه شروع به کار نکرده باشد، ممکن است تعداد ۶ تا ۸ رکورد واسنجی عموماً در هر حلقه فیلم انجام شده باشد. سپس اندازه‌گیری‌های حاصل از این رکوردها در محاسبه فرکانس طبیعی و میرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رکوردها همچنین باید برای شدت پایین، کیفیت مارک‌کننده زمان و موقعیت مسیرها بر روی فیلم ارزیابی شوند.

با هر جنبش زمین‌لرزه معمولاً دو ردّ زمانی به طور هم‌زمان ثبت می‌شوند. ردّ نخست زمان نسبی است و شامل یک پالس موج مربع است که به صورت داخلی تولید می‌شود، از این رو برای ایجاد تاریخچه زمانی رکورد به کار می‌رود. رد دوم ممکن است یک پالس موج مربع دیگری باشد، یک کد زمان باینری که به وسیله یک اسیلاتور دقیق (مانند یک مولد کد زمان) کنترل می‌شود و با یک ساعت خارجی، یا یک کد زمان سیگنال رادیویی تنظیم می‌شود. این زمان‌گیری دقیق ضروری است، زیرا هر جنبشی که دستگاه را به کار انداخته باشد، می‌تواند نسبت به زمان و تاریخ رویدادش به وضوح شناسایی گردد و همچنین می‌تواند با سایر رویدادهای ثبت شده توسط دستگاه ارتباط داده شود.

### ۳-۲-۵-۲- نگهداری دستگاه‌های مانسته

برنامه نگهداری شبکه‌های شتاب‌نگاری عمده در سدها شامل دو بار بازدید در سال توسط تکنسین‌ها است. سدهای با آرایه‌های دستگاهی گسترده ممکن است برنامه‌های بازدید سه ماهه داشته باشند. به طور معمول تکنسین مسوول نگهداری دستگاه، وضعیت عمومی منطقه، اتاقک دستگاه در صورت وجود و وضعیت دستگاه را بازدید می‌کند.



به جز بازدهایی که در فاصله‌های زمانی کوتاه انجام می‌شود، یا چنانچه بازدید ویژه‌ای با فاصله کم نسبت به بازدید قبلی صورت بگیرد، در تمامی بازدها باید آزمون‌ها انجام شوند و فیلم جایگزین گردد.

چنانچه در فاصله بین دو بازدید دستگاه به کار افتاده باشد، (آنچنان که نمایشگر رویداد دستگاه نشان دهد)، محفظه فیلم برای ظهور و ثبوت برداشته می‌شود. هر زمان که یک حلقه فیلم جدید (یا حلقه قدیمی برداشته شده) در محل خود قرار داده می‌شود، دستگاه دوباره واسنجی می‌شود. معمولاً منبع تغذیه برق (شارژر باتری) بازدید می‌شود و در صورت لزوم باتری‌ها جایگزین می‌گردند. در محل‌هایی که از صفحات خورشیدی استفاده می‌شود، باید آن‌ها را از غبار و سایر مواد کثیف پاک نمود.

### ۳-۲-۵-۳- بهره‌برداری از دستگاه‌های رقمی (دیجیتال)

دستگاه‌های رقمی، مانند دستگاه‌های شتاب‌نگار مانسته دارای شتاب‌سنج‌هایی هستند که به طور مستمر جنبش زمین را پایش می‌کنند. برخلاف دستگاه‌های مانسته، سامانه رقمی دارای حافظه‌ای است که قبل از به کار افتادن دستگاه در اثر رویداد زلزله (در سطح شتابی که قبلاً تنظیم شده است، مثلاً  $0.1g$ )، این قابلیت را دارد که در بازه زمانی انتخاب شده‌ای، جنبش زمین را ثبت کند. هنگامی که زلزله رخ دهد و ارتعاشات ناشی از آن به بالاتر از حد راه‌اندازی از پیش تنظیم شده برسد، حسگرها عملیات ثبت را آغاز می‌کنند و سیگنال‌ها ثبت می‌شوند. همراه با ثبت سیگنال‌ها، آن قسمت از جنبش زمین که پیش از راه‌اندازی ثبت شده است نیز در حافظه دستگاه رقمی ثبت می‌شود. ریز پردازشگرهایی در سامانه دستگاه کار ثبت، ذخیره و کارکرد خروجی را کنترل می‌کنند. در فرآیند ثبت و گردآوری داده‌ها، سیگنال‌های مانسته به رقمی تبدیل می‌شوند.

یک دستگاه رقمی متداول به تنهایی دستگاه کاملی است و می‌تواند به صورت سه یا چهار کاناله کار کند. با این حال، برای کاربری‌های چند کاناله بزرگ می‌توان چندین دستگاه را به یکدیگر متصل نمود. برای نمونه، مولدهای کد زمان یا گیرنده‌های رادیویی بسیار دقیق ممکن است مورد نظر باشند زیرا نسبت به ساعت‌های معمولی دیگر، از دقت بالاتری برخوردارند و زمان مشترکی را برای دستگاه‌های به یکدیگر متصل شده فراهم می‌آورند. از کاربردهای دیگر این دستگاه‌ها راه‌اندازی و ثبت هم‌زمان داده‌ها است.

به منظور ثبت داده‌های حاصل از رویداد یک زمین‌لرزه، دستگاه‌های شتاب‌نگار رقمی پیوسته در حالت انتظارند. مهم‌ترین بخش از زمان ثبت و گردآوری داده‌ها که در عین حال زمان کوتاهی است، هنگامی است که دستگاه راه‌اندازی شده (آغاز به کار کرده) و حافظه قبل از رویداد به همراه سیگنال‌های رقمی شده زمین‌لرزه در حافظه دستگاه ذخیره می‌شوند.

خارج کردن داده‌های ثبت شده از دستگاه‌های شتاب‌نگار به منظور بازمینی و یا تحلیل آن‌ها به چند طریق قابل اجرا است. به طور معمول، یک کامپیوتر شخصی قابل حمل با نرم‌افزار مناسب برای خارج کردن داده‌ها از دستگاه‌های نصب شده به کار می‌رود. همچنین برای خارج کردن داده‌های شتاب‌نگاشتی می‌توان سامانه‌های ویژه‌ای را با استفاده از فرستنده‌های رادیویی یا خطوط تلفن مورد استفاده قرار داد. در این صورت، کل و یا بخشی از این سامانه‌ها را می‌توان به این مهم اختصاص داد. با این حال، هزینه استفاده از این سامانه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از استفاده از تجهیزات قابل حمل است.



### ۳-۲-۵-۴- نگهداری دستگاه‌های رقمی

استفاده از دستگاه‌های رقمی دارای سابقه نسبی طولانی نیست. از این رو، اطلاعات کاملی از دوره‌های مناسب بازدید و سرویس این نوع دستگاه در دست نیست. چنانچه هیچ رویدادی باعث چکانده شدن دستگاه نشده باشد، بازدید معمول سالی یک بار توصیه می‌شود. اگر دستگاهی به منظور خارج کردن داده‌ها بازدید می‌شود، در این صورت باید اقدامات مربوط به سرویس و نگهداری در همان زمان به اجرا در آید.

در بازدیدهایی که به طور معمول برای نگهداری دستگاه انجام می‌شود باید دستگاه را از طریق ارتباطات نرم‌افزاری بررسی نمود. در این بررسی باید اطمینان حاصل کرد که سامانه الکترونیکی دستگاه رقمی کار می‌کند و پارامترهایی که توسط کارخانه یا کاربر تنظیم شده تغییر نکرده و کماکان معتبرند. بازدید فیزیکی مشتمل است بر بررسی وضعیت محل نصب و محیط محلی، بررسی باتری‌ها و باتری‌های پشتیبان، تنظیم ساعت یکسان و تراز «صفر» حسگرها.

از آنجا که بازدید میدانی دستگاه رقمی از طریق اتصال به یک کامپیوتر شخصی قابل انجام می‌شود، باز کردن درب دستگاه معمولاً تنها هنگامی لازم است که بررسی، عدم کارکرد و یا «خارج شدن» از تنظیم‌ها را نشان دهد. برای نمونه، ممکن است لازم باشد شتاب‌سنج‌ها میزان<sup>۱</sup> شوند یا ساعت‌ها تنظیم گردند. چنانچه یک مولد کد زمان در خارج از دستگاه تعبیه شده باشد (مانند یک جعبه خارجی)، ممکن است برای سال‌ها نیازی به باز کردن درب دستگاه نباشد. هر زمان که درب دستگاه باز شود، رطوبت‌گیر(ها) باید تعویض شوند.

### ۳-۲-۵-۵- محافظت ایستگاه‌ها در برابر خطرهای طبیعی و محیطی

از شیب‌های ناپایدار و محل‌هایی که ریزش سنگ‌ها بتوانند به تجهیزات یا اتاقک آن‌ها آسیب وارد آورند، باید اجتناب گردد. دستگاه‌ها نباید در محل‌هایی باشند که در معرض ارتعاشات ناشی از کار در پیچه‌ها، شیرها و بالابرها (آسانسورها) قرار داشته باشند. این ارتعاشات ممکن است باعث به کار انداختن بی‌مورد و نابه‌هنگام دستگاه‌ها شود، یا باعث ایجاد نوفه ناخواسته در هنگام ثبت رکوردها گردد. چنانچه قرار باشد دستگاه‌ها در شیب‌های سد نصب شوند، آن‌ها را باید به صورت تورفتگی در شیب‌ها قرار داد و در صورت لزوم برای آن‌ها دیوارهای حایل ساخت. دیوارهای حایل باید از سکوی محل نصب دستگاه‌ها کاملاً جدا شوند.

### ۳-۲-۶- پشتیبانی فنی در طول بهره‌برداری از دستگاه‌ها

پشتیبانی فنی در طول مدت بهره‌برداری از دستگاه‌ها الزامی است زیرا عدم دسترسی به تجهیزات مورد نیاز باعث از کار افتادن شبکه شتاب‌نگاری می‌شود. بنابراین در هنگام سفارش خرید باید دقت شود که تجهیزات از تولید کننده‌ای خریداری شود که دارای نمایندگی در ایران بوده و یا خود سازنده و با تامین کننده تجهیزات باشد. از این رو تامین تجهیزات مورد نیاز شبکه در مدت زمان بهره‌برداری (حداقل به مدت ۲۰ سال) باید به عنوان یکی از شرایط خرید مد نظر قرار گیرد. در مدت بهره‌برداری باید ترتیبی اتخاذ شود که به طور مرتب دستگاه‌ها مورد بازدید و کنترل قرار گرفته و ضمن تخلیه اطلاعات ثبت شده، آزمایش درستی عملکرد دستگاه مطابق با دستورالعمل کارخانه سازنده انجام شود. بهتر است که در حالت عادی این بازدیدها به طور مرتب برای دستگاه‌های مانسته



حداقل سالی دو تا چهار بار و سالی یک بار برای دستگاه‌های رقمی انجام شود. در صورتی که زمین‌لرزه‌ای در محدوده سد به وقوع بپیوندد، توصیه می‌شود به سرعت نسبت به بازخوانی اطلاعات، کنترل دستگاه و تجزیه و تحلیل آن‌ها اقدام گردد.

### ۳-۲-۷- نرم‌افزارهای همراه تجهیزات برای پردازش داده‌های حاصل از دستگاه‌ها

در حال حاضر برنامه‌های مختلف رایانه‌ای برای تصحیح رکوردهای شتاب‌نگاشتی تهیه و ارائه شده است. نمونه‌هایی از آن‌ها SWS و BAP می‌باشند. در همه این برنامه‌ها ضرورت دارد که ابتدا مشخصات تصحیحات مورد نیاز به‌عنوان ورودی به برنامه داده شود. اطلاعات قرائت شده و مشترک یک شتاب‌نگاشت که از یک ایستگاه با شکل‌بندی مشخصی به دست آمده است به همراه اطلاعات اولیه فوق‌الذکر به برنامه داده می‌شود و نتایج محاسبات بدین صورت به دست می‌آید: (۱) فایل عددی، (۲) نمودار شتاب تصحیح نشده، (۳) فایل‌های شتاب تصحیح شده، سرعت، و جابه‌جایی، (۴) نمودار شتاب تصحیح شده، سرعت، و جابه‌جایی، (۵) فایل‌های طیف فوریه، طیف پاسخ شتاب، سرعت، و جابه‌جایی. توضیحات پیش‌تر در مورد عملکرد این نرم‌افزارها در ادامه ارائه شده است. توصیه می‌شود که هنگام خرید تجهیزات، سفارش خرید برای نرم‌افزارهای مربوط نیز داده شود.

### ۳-۲-۸- پردازش و استفاده از داده‌های ثبت شده

به منظور استفاده از رکوردهای جنبش ورودی در تحلیل دینامیکی و کاربردهای دیگر از قبیل به روز کردن کاتالوگ‌ها و مقایسه رکوردها با یکدیگر لازم است تاریخچه زمانی رکوردها به صورت رقمی تهیه شود. تاریخچه زمانی مجموعه‌ای از زوج‌های مقادیر زمان-شتاب است. در صورتی که شتاب‌نگارهای فیلم مانسته مورد استفاده قرار گرفته باشند، نخستین گام رقمی کردن داده‌ها و سپس اصلاح آن‌ها برای تغییر شکل فیلم، سرعت متغیر فیلم و پاسخ دستگاه و غیره است. پس از آن، رکوردها به منظور برداشتن «نوفه» پربردهای بلند فیلتر می‌شوند.

همچنین در مورد شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده به وسیله شتاب‌نگارهای رقمی، اصلاحات برای پاسخ فرکانسی حسگر و حذف اثرات خط مبنا ضروری است. در انتها سرعت و جابه‌جایی زمین و طیف‌های پاسخ متناظر از روی شتاب‌نگاشت اصلاح شده محاسبه می‌شود.

به طور معمول پردازش کامپیوتری شتاب‌نگاشت‌ها در چند فاز انجام می‌شود. در فاز اول شتاب‌نگاشت خام به صورت رقمی تهیه می‌گردد که به وسیله زوج زمان-شتاب تعریف می‌شود. در فاز دوم، اصلاح رکورد برای پاسخ دستگاه و اثرات خط مبنا و فیلتر کردن پایین‌گذر و بالا‌گذر انجام می‌شود. سپس در صورت نیاز، با اعمال فیلترهای بیش‌تر، از طریق انتگرال‌گیری عددی تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابه‌جایی به دست می‌آیند. در فاز بعد، از روی شتاب‌نگاشت‌های اصلاح شده طیف‌های پاسخ تهیه می‌شود. معمولاً مقادیر طیف‌های پاسخ در پربردهای مختلف، در محدوده ۰/۰۲ تا ۴ ثانیه برای مقادیر مختلف میرایی (مثلاً ۰، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد بحرانی) تهیه می‌شوند. همچنین زمان‌های بیشینه پاسخ‌های طیفی ارائه می‌گردد. جزییات تمامی پارامترها در هر فاز خارج از دامنه کار این راهنما است و علاقه‌مندان می‌توانند به انتشارات مرتبط با این موضوع مراجعه نمایند. داده‌ها و نتایج پردازش شده برای هر مجموعه شتاب‌نگاشتی از یک زمین‌لرزه خاص به صورت رقمی در نوارهای مغناطیسی، دیسک‌های فشرده و غیره نگهداری می‌شوند. توزیع سریع رکوردهای شتاب‌نگاشتی در میان جوامع علمی و مهندسی کاربردهای طراحی و تحلیل آن‌ها را ارتقا می‌بخشد. با هر





توزیع، پژوهشگران و حرفه‌مندان قادر خواهند بود تا طبیعت امواج لرزه‌ای را بهتر درک کنند و همچنین قادر خواهند بود، داده‌هایی را توسعه دهند که به برآورد جنبش‌های زمین طراحی کمک کند.

### ۳-۲-۹- پردازش رکوردهای پاسخ سد

پایین‌ترین سطح پردازش در پاسخ (سازه‌ای) محاسبه مقادیر بیشینه است. همان‌طور که قبلاً بیان شد مراحل پردازش رکورد نیاز به گردآوری اولیه داده‌ها و انجام اصلاحات لازم دارد.

پردازش با پیچیدگی بیش‌تر برای تعیین پارامترهایی است که رفتار دینامیکی سد را مشخص می‌کنند. مهم‌ترین این پارامترها که به منظور اعتبار بخشی و همسان‌سازی مدل‌های ریاضی به کار می‌روند، عبارتند از: فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مدی و ضریب‌های میرایی اولین مدهای ارتعاشی.

تکنیک‌های شناخت سامانه که در حال حاضر، به ویژه برای سامانه‌های خطی به خوبی جا افتاده است، در این محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عمل، با توجه به این که سد یک سامانه است و پاسخ ثبت شده در آن «خروجی» و جنبش ثبت شده در پایه «ورودی» به شمار می‌رود، روابط خروجی / ورودی (توابع انتقالی) محاسبه می‌شوند و از طریق آن‌ها، با انجام پردازش بیش‌تر، پارامترهای مدی برآورد می‌شوند.

این برآوردها، به ویژه برآوردهایی که به شکل‌های مدی و حتی به مقدار بیش‌تر به میرایی مربوط می‌شوند، تحت تاثیر غیرخطی بودن سازه و الگوریتم‌های پردازش و همچنین خطاهای دستگاهی و آماری قرار می‌گیرند. از این رو لازم است که حسگرها نیازهای مربوط به وقت، هم‌زمانی و پاسخ فرکانسی را به طور کامل دارا باشند.

چنان‌چه آگاهی ژرف اولیه‌ای از سازه در دسترس باشد، فرآیند شناخت بسیار آسان‌تر می‌شود. این آگاهی که یک پشتیبانی مهم از فرآیند پایش، هم در مرحله گزینش دستگاه و هم در مرحله پردازش داده‌ها است، می‌تواند با انجام روش‌های تعیین ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای به دست آید. با آگاهی از پارامترهای مدال می‌توان قابلیت اعتماد مدل عددی و فرضیات تئوری را برآورد نمود. به طور کلی، فرآیند تفسیر داده‌ها و شبیه‌سازی مدل ریاضی، عملیات پیچیده‌ای است که به مقدار زیاد به ویژگی‌های خاص سد، آگاهی از مشکلات مربوط و درجه غلط بودن مدل‌های به کار رفته بستگی دارد. تا به امروز هیچ روش جا افتاده‌ای در ارتباط با این موضوع وجود ندارد و به این منظور آگاهی‌های تخصصی پیشرفته همراه با مهارت و تجربه مهندسی لازم است.

### ۳-۲-۱۰- نحوه گزارش دهی

گردآوری و طبقه‌بندی داده‌های ثبت شده و تفسیر آن‌ها بر طبق جدول زمان‌بندی و دستورالعمل‌های از پیش تعیین شده‌ی مراقبت و نگهداری سد انجام می‌شود. اطلاعات خام گردآوری شده برای انجام پردازش لازم به دفتر مدیر سد فرستاده می‌شود. پردازشگرها قادر به انجام سریع عملیات به شرح زیر می‌باشند:

- محاسبه بیشینه مقادیر اندازه‌گیری شده، (شتاب، سرعت، و جابه‌جایی)
- محاسبه طیف پاسخ جنبش لرزه‌ای
- مقایسه مقادیر بیشینه پارامتر به دست آمده با مقادیر آستانه‌ای که از پیش تعیین شده است (به منظور اتخاذ تصمیمات آنی) در صورت لزوم، می‌توان یک سیگنال هشدار دهنده به وجود آورد.



- ارائه داده‌ها به صورت جدول و نمودار
- داده‌ها و نتایج پردازش مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های یک زمین‌لرزه خاص بر روی نوار مغناطیسی، دیسک یا لوح فشرده بایگانی می‌شوند و یک کپی از آن باید برای مهندسان مربوط ارسال شود.
- در گزارش ارسالی ضمن شرح مختصری از نوع ایستگاه‌ها و شتاب‌سنج‌ها، گزارشی که شامل شکل‌های زیر به همراه شرح و تفصیل آن‌هاست، ارائه می‌شود. این گزارش در نهایت به تعداد مورد لزوم تکثیر و توزیع می‌شود. این گزارش باید حاوی مطالب زیر باشد:
  - اطلاعات ورودی که بر مبنای آن‌ها تصحیحات لازم بر روی رکوردها انجام شده است.
  - پیشینه شتاب، سرعت، و جابه‌جایی
  - مدت زمان موثر لرزش‌ها
  - فرکانس امواج غالب و یک تخمین اولیه از محتوای فرکانس امواج ثبت شده که با محاسبه طیف فوریه حاصل می‌شود.
  - روابط فرکانس (پریود) و دامنه امواج حرکات افقی و قائم، که با محاسبه طیف پاسخ حاصل می‌شود.
  - تخمین فاصله بین ایستگاه ثبت زلزله تا رومرکز زلزله که با قرائت زمان‌های ورودی امواج P و S می‌تواند بدست آید.
  - ترسیم نمودارهای شتاب تصحیح نشده، اصلاح شده، سرعت، جابه‌جایی، طیف‌های پاسخ مربوط به این پارامترها، و طیف فوریه

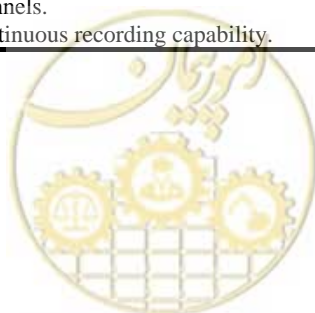
### ۳-۲-۱۱- تهیه و ارائه فهرست کامل مشخصات فنی شتاب‌نگارها

نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی شتاب‌نگارها و متعلقات وابسته به آن‌ها که توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین را دارند در جداول (۳-۵) و (۳-۶) ارائه شده است. این مشخصات می‌تواند به عنوان حداقل مشخصات فنی مورد نیاز دستگاه‌های شتاب‌نگار مطرح گردد که منطبق بر مشخصات دستگاه‌های SSA-2 می‌باشد، که در ایران کاربرد بسیاری دارد.



جدول ۳-۵- نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی شتاب‌نگارهای با توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین

<b>Sensor Type</b>	<b>Internally mounted, orthogonal oriented triaxial solid-state silicon accelerometer.</b>
Full scale	+/-2g
Output voltage	-/+2.5 volts
Frequency response	DC-50 Hz within-3dB
Natural frequency	60 Hz
Damping	.7 nominal
Dynamic range	Exceeds 72 dB
<b>Data Acquisition Characteristics</b>	
Sample Rate	200 samples per second (SPS) per channel Data can be decimated to lower sample rates. Battery voltages are sampled approximately every 256 scans (1.28 seconds). External failsafe sample clock input is provided. Header status indicates whether external sample clock was present or not as well as if clock failed prior to event.
Number of channels	Three, normally: longitudinal, vertical, and transverse (L,V,T).
Anti-alias filter	2-pole, 50 Hz Butterworth response.
Frequency response	DC to anti-alias filter cut off.
Sensitivity	+/-2.5 volts full scale.
Resolution	12 bits, offset binary coding. 1111 1111 1111 (FFFh) = +2.5 volts 1000 0000 0000 (800h) = 0 volts 0000 0000 0000 (000h) = -2.5 volts
Noise	Approx. 1 LSB in 12 bit system.
Scan timing	
Sample clock delay	100 us to channel 1
Conversion time	200 us per channel
Skew	200 us
Sample/Hold stage	Included
Gain	Fixed at unity
3 Operating Modes	Triggered, Continuous, Delayed start
Data acquisition	
Monitor Program	Interrogation, Control, Data retrieval
Diagnostic Program	Memory tests, Clock calibration, Accelerometer step offset Signal
Pre-event Memory	3072 scans for 15.36 seconds at 200 sps per channel 2048 scans for 10.24 seconds 1024 scans for 5.12 seconds 512 scans for 2.56 seconds 256 scans for 1.28 seconds No pre-event can be specified as well.
<b>Trigger</b>	Software based-uses digital algorithm to filter acceleration data on each channel from 0.1 Hz to 12 Hz. Individual channels are compared to a preset threshold (s). The results of the comparisons are weighted and compared against a voting criterion. If the criterion is satisfied, an event is declared. Negative weights are legal values. This allows the logical AND, OR and NOT functions to be used for trigger combinations. A separate post event counter controls the hold-on time. The trigger operates on all channels. Continuous recording capability.



ادامه جدول ۳-۵- نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی شتاب‌نگارهای با توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین

<b>Post-event Hold Time</b>	10, 15, 30, 60 and 90 seconds at 200 sps. Separate parameter for minimum run time of 12, 17, 32 and 62 seconds. Minimum run times are based on standard time code frame lengths.
<b>Header</b>	256 bytes. For description, refer to Parameters and Header section.
<b>Recording Characteristics</b> Recording medium	Battery backed-up CMOS static RAM. 256 kilobytes standard.
Recording capacity	Approx 10 minutes of 3 channel 200 sps data using linear-predictor type data compression algorithm. See SSA-1 interface Instructions, document 301532, if an explanation of data compression is needed.
Playback system	Direct or remote RS-232C connection of SSA-2 to IBM-PC (or 100% compatible) at standard baud rates. Uses QTSSA furnished communication software or commercial communications programs, such as Crosstalk, for control, interrogation and playback. File transfer uses standard x modem protocol. Both x modem checksum and CRC error checking are supported. QISSA software to display event and header data from file provided. Optional Kin metrics Seismic Workstation software available for complete strong motion data processing.
Data format	Data file is binary image of SSA memory as if stored in non-compressed format. A 256 byte event header is followed by as many data records (consisting of 32 bytes of 256 packed time code bits and 256 scan data blocks of 12 bit samples, right justified in 16 bit words) as necessary to satisfy trigger criteria. Scans consist of 1, 2 or 3 standard Intel format words stored in lo-high order. High order 4 bits set to 0. Files are transferred in sectors of 128 bytes according to the x modem protocol. The end of the file will be padded with code for zero volts if necessary to fill out the last 128 bytes. Files are transferred as binary (1 byte/byte) data. Data are stored internally in compressed form. Compression algorithm uses simple linear-predictor algorithm and introduces No distortion.
<b>Functional Test of Accelerometers</b>	Automatic functional test. Initiated by monitor command. For the standard solid-state accelerometers, the STEP portion of the 'FT' command stimulates the amplifier-filter circuit. For the optional a 'FT' command produces a record of the damped and undamped response.
<b>Internal Diagnostic Software</b>	Diagnostics for memory testing and other functions are provided.
Operating Temperature	
Standard unit	0 F to + 140 F
Optional FBA's	(-20 C TO+55 C Nominal)
Humidity	100%



جدول ۳-۶- نمونه‌ای از فهرست مشخصات فنی متعلقات وابسته به شتاب‌نگارهای با توانایی ثبت جنبش نیرومند زمین

<b>Power Requirements</b>	
Operating voltage	1 to 14 V dc
Current drain	75 mA from single source at 13.5 volts DC while in acquisition mode waiting for trigger. Peak currents can be as high 200 mA .
Power fail sensor	Prevents processor runaway from destroying data in RAM.
Transient Protection	Provided on external power input. Clamped at 15 V with TransZorb.
<b>Batteries</b>	
	Single supply operation. Internal 12 volt 6.5 Ah battery. Primary battery provides approx 3.5 days operation without charging External battery connection fully protected, e.g., polarity, fuse, TransZorb etc.
Backup batteries	Two 3.7 volt lithium batteries for RAM backup and clock operation. Shelf life approximately 10 years.
<b>Battery Charger</b>	
	Wall mounted. 110/220 Vac, 47-63 Hz operation. External DC charge input.
<b>Package</b>	
	14.74" (375 mm) × 8.74" (222 mm) × 11.06" (281 mm) high
Weight	21.5 pounds (10 kg)
Construction	Cast aluminum base with drawn aluminum cover. Single bolt internal mounting.
<b>Controls</b>	
	Internal power ON/OFF switch. Internal DIP Switch for baud rate setting, access to pass word and special diagnostic functions. All other functions initiated from monitor program.
<b>Indicators</b>	
	EVENT (Red LED) CHARGE (Green LED)
<b>I/O Connectors</b>	
	EXTERNAL POWER (and charger) RS-232C
<b>RS-232C Command Port</b>	
	DCE interface, 8 bits with no parity. Baud rates of 300, 600, 1200, 2400, 9600, 38400 baud. DIP switch selectable. XON-XOFF protocol used for ASCII communication. X modem checksum and CRC protocol used for data transfer.
<b>Timing System</b>	
	Internal clock standard. Records time of event in header. Low accuracy (approx. 50 ppm 0-5 C).
	2 Pulse per second time mark pulse for use with interconnected units as common timing reference.
<b>Integrated Circuits Used</b>	
LSI components	NSC-800 (two)
Microprocessor	NSC-858
Communications Devices	CMOS very low power. 8K×8.32K× 8.128K× 8 organization used.
RAM	27C256 AD7582
EPROM	IM7170
ADC	74 HC high-speed CMOS some4000 series used).
System real time clock Logic	Ceramic parts with additional burn-in and testing used for high reliability.



## ۳-۲-۱۲ - نتیجه‌گیری

## ۳-۲-۱۲-۱ - نیازهای پژوهشی

رکوردهای جنبش نیرومند زمین تاکنون داده‌هایی را تولید کرده‌اند که برای جامعه مهندسی سد ارزشمند و نوید بخشند. روش‌های جدید طراحی و تحلیل نشان داده‌اند که به اندازه کافی در پیش‌بینی جنبش پاسخ سازه‌ای دقیق می‌باشند و از این رو به طراحی پیشرفته‌تر سدهای مقاوم در برابر زمین‌لرزه منجر شده‌اند. با این حال، برای انجام موارد زیر داده‌های بیش‌تری مورد نیاز است:

- بهبود و اصلاح روش‌های تحلیلی
- تخمین دقیق پارامترهای مقاومت فرض شده مصالح مختلف
- درک تغییرات محلی در جنبش زمین
- پاسخ انواع مختلف سدها

تمامی انواع سدها در مناطق با لرزه‌خیزی بالا باید به دستگاه‌های ثبت جنبش نیرومند مجهز شوند. آرایه‌های دستگاه شتاب‌نگار به طور مطلوب برای تولید داده‌هایی مناسبند که ایمنی سد را شناخته و مطالعات پژوهشی را ارتقا دهند. هزینه چنین تجهیزاتی باید توسط نهادهای دولتی که مالکین سدها می‌باشند تامین شود. شکل بهینه شده تجهیزات در هر سد، با تعداد حداقل دو دستگاه، نسبتاً کم هزینه است. از این رو با توجه به علاقه رو به رشد به پایداری و ایمنی لرزه‌ای سدهای موجود و جدید، مالکان سدها باید ملاحظه کنند که برای تامین چنین تجهیزاتی توجه کافی وجود دارد.

رکوردهای شتاب‌نگاشتی حاصل از دستگاه‌های نصب شده در میدان آزاد، در دراز مدت، آگاهی ما را از تاثیر عواملی مانند سازوکار چشمه (نوع گسلش)، مسیر عبور امواج، اثرات زمین‌شناختی و برهم کنش سنگ-خاک بر جنبش زمین ارتقا می‌دهد. با افزایش آگاهی از پدیده انتشار امواج لرزه‌ای، کیفیت پارامترهای جنبش زمین طراحی نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد. با این حال، چنان‌چه آرایه‌های نسبتاً بزرگ دستگاه‌های جنبش نیرومند برای مطالعه انتشار امواج لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند، پرتیرترین پژوهش در نصب دستگاه‌ها در میدان آزاد خواهد بود. دستگاه‌های میدان آزاد که به صورت منفرد در نزدیکی ساختگاه سد ولی با فاصله زیاد از یکدیگر نصب می‌شوند، ثمره چندانی از نظر تولید داده برای انجام پژوهش ندارند. تامین هزینه برای آرایه‌های بزرگ میدان آزاد باید توسط نهادهای دولتی استانی و یا ملی انجام شود زیرا فواید و پیشگیری از خطر زمین‌لرزه در سطح وسیع تر به عموم مردم باز می‌گردد.

نصب دستگاه‌های شتاب‌نگار در سدها به منظور تولید داده‌های بیش‌تر برای طراحی و تحلیل کماکان دارای اهمیت خواهد بود. احتمالاً مهم‌ترین نیاز پژوهشی ارتقای درک مهندس طراح از اثرات مواد یا مصالح نزدیک سطح زمین در پی‌های سد بر انتشار امواج لرزه‌ای، مدل‌سازی کاهیدگی و پاسخ زمین است. ملاحظات ثانویه ولی مهم، ارتقای درک اثرات زمین‌شناختی محلی و توپوگرافی است. به منظور تهیه یک پایگاه داده‌ای دقیق برای مقاصد ذکر شده هر دو نوع تجهیزات زیر سطحی و سطحی مورد نیاز می‌باشند.

یکی از نیازهای پژوهشی مشخص مربوط به ساختگاه‌های صخره‌ای سدها است. جنبش تکیه‌گاه اثر مستقیم‌تری بر رفتار سدهای ساخته شده در دره‌های عمیق و باریک (صخره‌ها)، در مقایسه با سدهای واقع در دره‌های عریض دارد. اطلاعات در زمینه اثر رفتار تکیه‌گاهی دره باریک به اندازه دره‌های عریض توسعه نیافته است. سدها در دره‌های باریک معمولاً از نوع بتنی هستند، اما سدهای سنگریزه‌ای نیز در چنین محل‌هایی ساخته شده‌اند.



آرایه‌های جنبش پاسخ در سد لانگ‌ولی در کالیفرنیا می‌تواند نمونه شایان توجهی از برنامه‌های پژوهشی مربوط به اثرات ویژگی‌های ساختگاه محلی بر جنبش زمین، باشد. نیاز به نصب تجهیزات در آن منطقه‌ی با لرزه‌خیزی بالا توسط کارشناسان تشخیص داده شد و مسوولان ایالتی نیز آن را به اجرا درآوردند. در مکان‌های دیگر نیز به منظور مطالعه رویدادهای لرزه‌ای که در آن‌ها داده‌های ثبت شده اندکی وجود دارد، به آرایه‌های شتاب‌نگاری مناسب ساختگاه محلی نیاز می‌باشد.

### ۳-۲-۱۲-۲- نتایج و توصیه‌ها

موضوع پایش لرزه‌ای سدها در کشور لرزه‌خیزی مانند ایران باید از قبل به عنوان بخشی از تعهدات وزارت نیرو که مجری سدهاست در مقررات ایمنی سدها پیش‌بینی گردد و مسوولان نیز اهمیت چنین اقدامی را بیش از پیش مورد توجه قرار دهند. هنگام طراحی شبکه پایش سد باید عواملی مانند پهنه‌بندی لرزه‌ای، ابعاد سد و مخزن، مصالح و مواد پی و نوع سد را مد نظر قرار داد. در مورد سدهای کوچک در مناطق با لرزه‌خیزی متوسط و پایین که خطرپذیری عمده‌ای را برای ساکنان محل‌های واقع در پایین دست در بر ندارد، پایش می‌تواند به ثبت جنبش ورودی در پایه بلندترین مقطع محدود شود.

در مورد سدهای با خصوصیات غیرمعمول سازه‌ای یا سدهای با سیمای قابل توجه پیچیده در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، لازم است سطح بالاتری از پایش انجام شود که شامل اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های مهم پاسخ سازه‌ای است. در این گونه موارد، (اگر از نقطه نظر فنی امکان‌پذیر باشد) توصیه می‌شود آزمون‌های لرزش اجباری به عمل آید. از طریق این آزمون می‌توان «تصویر» روشنی از وضعیت سازه‌ای سد را به دست آورد و ویژگی‌های رفتاری آن را از قبیل پارامترهای مُدال تعیین نمود.

در مورد پروژه‌های خیلی مهم که دارای مخزن‌های بزرگ و عمیق هستند، به منظور شناسایی و انجام اصلاحات ممکن در لرزه‌خیزی محلی و تشخیص پدیده لرزه‌خیزی القایی، توصیه می‌شود پایش منطقه پیرامون حوضه نیز انجام شود.

تفسیر نتایج پایش دینامیکی مربوط به رفتار سد و ارزیابی ایمنی مستلزم آن است که مقادیر مشاهده شده همچنین برای نیروهای استاتیکی پایش شوند. بنابراین، سامانه کلی پایش باید با نیازهای مورد نظر طراحی متناسب گردد. مشاهده تغییراتی مانند جابه‌جایی، تراوش، نشست، بالا آمدگی و ترک‌خوردگی در اثر زمین‌لرزه، در ارزیابی پایداری سد پس از رویداد یک زمین‌لرزه از اقدامات بنیادی می‌باشد. این کمیت‌ها باید با مقادیر اندازه‌گیری شده قبل از رویداد زمین‌لرزه مقایسه شوند، اما تغییراتی که تابع زمان هستند باید بلافاصله پس از رویداد زمین‌لرزه انجام شوند.

با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در الکترونیک در سال‌های اخیر، تجهیزات شتاب‌نگاری توسعه قابل توجهی پیدا کرده‌اند و شتاب‌نگارهای فیلم مانسته با شتاب‌نگارهای رقمی جایگزین می‌شوند که تمامی خواسته‌های پایش مدرن را برآورده سازند. به هر صورت، فرآیند یک پایش موفق کماکان به نصب صحیح، بهره‌برداری و نگهداری سامانه بستگی دارد. از این رو لازم است تمامی این فعالیت‌ها با دقت و توجه بسیار زیاد انجام شود.

توصیه این مورد نیز ضروری است که بسیاری از سدها که دارای ویژگی شریان حیاتی منابع آب هستند از تاسیسات حیاتی حساس به شمار می‌روند زیرا اغلب، جمعیت انبوهی برای تامین آب و تولید برق و حفاظت در برابر سیل به آن‌ها وابسته‌اند. نیازهایی مانند تامین مستمر آب و برق توجه کافی برای نصب تجهیزات شتاب‌نگاری در بردارد، زیرا کافی است که از طریق رکوردهای به دست آمده و تحلیل آن‌ها نشان داده شود که توانمندی‌های شریان حیاتی مردم در هنگام رویداد یک زمین‌لرزه بزرگ آسیب نخواهد دید.



در پایان، باید اهمیت مدیریت بسیار دقیق داده‌های گردآوری شده و موارد مربوط به پردازش و سازماندهی پایگاه داده‌ای را یادآور شد. در حقیقت این تنها راهی است که از طریق آن کل جامعه کارشناسان در حرفه می‌توانند از نتایج فرآیند پایش بهره‌مند شوند و پیشرفت‌های واقعی در درک پدیده و در تهیه مدل‌های محاسباتی دقیق‌تر حاصل شود.







## منابع و مراجع

- ۱- IRCOLD، ۱۳۷۵، طراحی شبکه‌های پایش لرزه‌ای و شتاب‌نگاری سدهای بزرگ، نشریه شماره ۵ کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.
- 2- Bolt, B.A. and D.E. Hudson, 1975, Seismic Instrumentation of Dams: USCOLD Committee on Earthquakes.
- 3- Bolt, B.A., 1988, Chapter on Seismic Instrumentation, In "Advanced Dam Engineering", R.B Jansen, Editor, Van Nostrand Reinhold.
- 4- Bolt, B.A. and Hudson, D. 1975, Seismic Instrumentation of Dams. J. Geot.Engin. Div.pp. 1095-1104 (Nov. 1975).
- 5- Borcherdt, R.D., J.G. Anderson, C.B. Crouse, N.C. Donovan, T.V. McEvelly and A.F. Shakal, 1984, National Planning Considerations for the Acquisition of strong-Ground-Motion Data: EERI Publication No. 84008, Berkeley, California.
- 6- Brune, J.N., R Anoooshehpour, R. Lovberg, and L. Wang, 1985, Topographic Seismic Amplification and Dam-Foundation Interaction on a Foam Rubber Model of the Topography near Pacoima Dam: Section 26, Strong Ground Motion Simulation and Earthquake Engineering Applications, A Technological Assessment, EERI Publication No. 85-02, Berkeley, California.
- 7- California Division of Mines and Geology, 1976, Second Report on the Strong-Motion Instrumentation Program: CDMG Special Publication 48, Sacramento, California.
- 8- California Division of Mines and Geology, 1984, Third Report On the Strong-Motion Instrumentation Program: Working Draft, Sacramento, California.
- 9- California Division of Mines and Geology, 1984, The 1984 Morgan Hill, California Earthquake: Special publication 68, Sacramento, California.
- 10- Chang, F.K., 1980, The Effects of Elevation and Site conditions On Ground Motion of the San Fernando, California, Earthquake, 9 February 1971: Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Vol.II, Istanbul, Turkey.
- 11- Chang, F.K., 1985, Analysis of Strong-Motion Data from the Bount Borah, Idaho Earthquake of 28 october, 1983, Miscellaneous Paper GL-85-12, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- 12- Crouse. C B. and B Hushand, 1988, Soil-Structure Interaction at CDMG and USGS Accelerograph Stations, in publication.
- 13- Davis, L.L. and L.R. West, 1973, Observed Effects of Topography on Ground Motion: Bulletin of the Seis. Soc. of America, Vol. 63, No. 1, pp. 283-298.
- 14- Diehl, John G., 1985, Implications of Accelerographs Features on Processing, Use and Application of Data: ENER-ENEL, Investigation of Strong motion Processing Procedures, edited by Dario Rinaldis, Galeria, ROMA.
- 15- EERI Committee on seismic Risk, 1984, Glossary of Terms for Probabilistic Seismic-Risk and Hazard Analysis: Earthquake Spectra, Vol. 1, No. 1, EERI, Berkeley, california.
- 16- Fedock, J.J., 1984, Strong-Motion Instrumentation of Earth Dams: Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, San Francisco, california.
- 17- Fedock, J.J., 1982, strong-Motion Instrumentation of Earth Dams:
- 18- U.S.GeoLogical Survey Open File Report No. 82-469.



- 19- Fedock, J.J., 1982, strong-Motion Instrumentation of Earth Dams:
- 20- U.S.GeoLogical Survey Open File Report No. 82-469.
- 21- Geli, L., P.Y. Bard, and B.Jullien, 1988, The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results; Bull, Seis. Soc. Of America, Vo1. 78, No. 1, pp. 42-63.
- 22- Hudson, D.E., 1984, Strong Motion" Accelerograph Systems-ProblemS and Prospects: Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vo1. II, San Francisco, California.
- 23- International Committee on Large Dams, Seismic Observation of Dams, Bulletin 113.
- 24- Lagorio, H.J. and G.G. Mader, 1981, Earthquake in Campania-Basilicata, Italy, November 23, 1980, Architectural and Planning Aspects: EERI, Berkeley, California.
- 25- Lai, S.S., and H. B. Seed, 1985, Dynamic Response of Long Valley Dam in the Mammoth Lake Earthquake Series of May 25-27, 1980, EERI Report No. UCB/EERC-85/12, Berkeley, California.
- 26- Lysmer, J., T. Udaka, C.F.Tsai, H. B. Seed, 1975> FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems: EERI Report No. EERC 75-30, Berkeley, California.
- 27- MacDonald, R. and A. Viksne, 1986, Strong-Motion Instrumentation in Bureau of Reclamation Programs: Proceedings of the 17th Joint Panel Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Wind and Seismic Effects, Tsukuba City, Japan.
- 28- Maley, R.P. and W.K. Cloud, 1971, Preliminary Strong-Motion Results from the San Fernando Earthquake of February 9, 1971, USGS Professional Paper 733.
- 29- MaLey, R.P., 1975, The United States Strong-Motion NetWork: Field Operations: Proceedings of the Seventh Joint UJNR Panel Conference, Tokyo, Japan.
- 30- Maley, R.P., and E.C. Etheredge, 1984, The Development of Ground and Structural Response Strong-Motion Instrumentation Arrays in the United States: Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Volume II, San Francisco, California.
- 31- McJunkin, R.D., 1978, Compilation of Strong-Motion Records Recovered from the Bishop, California, Earthquake of 4 October 1978: CDMG Preliminary Report, Sacramento, California.
- 32- McJunkin, R.D and N.A. Kaliakin, 1981, Strong-Motion Records Recovered from the Mammoth Lakes, California, Earthquake of 30 September 1981: CDMG OSMS Report 81-10.1, Sacramento, California.
- 33- McJunkin, R.D., A.F. Shakal, and N.A. Kaliakin, 1983, Strong Motion Records Recovered from the Mammoth Lakes, California, Earthquakes of 6 January 1983:
- 34- CDMG OSMS Preliminary Data Report 83-1.1, Sacramento, California.
- 35- Morrill, B.J., 1971, Guidelines for Preparation of Strong-Motion Seismograph Sites: NOAA Seismological Field Survey, San Francisco, California.
- 36- Morrison, P., R. Maley, G. Brady, R. Porcella, 1977, Earthquake Recordings on or near Dams: USCOLD Committee on Earthquakes.
- 37- Pauly, S.E., 1984, Strong-Motion Accelerograph Selection: Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, San Francisco, California.
- 38- Shakal, A.F., R.W. Sherburne, and D.L. Parke, 1984, CDMG Strong-Motion Records from the Morgan Hill, California Earthquake of 24 April 1984: CDMG OSMS Preliminary Data Report 84-7.
- 39- Shakal, A.F. and M.J. Huang, 1985, Standard Tape Format for CSMIP Strong-Motion Data Tapes: CDMG Report OSMS 85-03, Sacramento, California.
- 40- Trnkoczy A. and M. Zivcic, 1991, Design of Local Seismic Network for NPP Krsko, Seismological Survey of Slovenia.



- 41- Turpen, C.D., 1980, Strong-Motion Records from the Mammoth Lakes Earthquakes of May 1980: CDMG Preliminary Report 27, Sacramento, California.
- 42- Uniform Building Code, 1988, Seismic Zone Map of the United States.
- 43- U.S. Committee on Large Dams, 1989, Strong Motion Instruments at Dams.
- 44- U.S. Committee on Large Dams, 1985, Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects, pp-39.
- 45- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1985, Strong Motion Instrumentation Site Characteristics, Denver, Colorado.
- 46- U.S. Geological Survey, 1984, The Morgan Hill, California Earthquake of April 24, 1984 (A Preliminary Report): Open-File Report 84-498A, Compiled by Seena N. Hoose.





**Islamic Republic of Iran**  
**Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision**

# **Guidline for Designing of Seismic and Accelerogram Networks for Dams**

**No. 591**

Office of Deputy for Strategic Supervision

Department of Technical Affairs

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

Ministry of Energy

Bureau of Engineering and Technical  
Criteria for Water and Wastewater

<http://seso.moe.org.ir>



## این نشریه

با عنوان «راهنمای طراحی شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری سدها» می‌باشد که براساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دستورالعمل‌های بهره‌برداری سدهای موجود در ایران و جهان، تجارب سال‌های متمادی کارشناسان، بهره‌برداران و پیمانکاران تجهیزات لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله تدوین گردیده است. طراحی شبکه‌ی لرزه‌نگاری سد برای پایش لرزه‌خیزی محدوده‌ی سد و طراحی شبکه شتاب‌نگاری به منظور کسب اطلاعات لازم برای تحلیل رفتار سد در برابر نیروهای دینامیکی به کمک این نشریه امکان‌پذیر است.

