

## محدوده فرکانسی مناسب جهت پردازش شتابنگاشت های ایران برای انواع شرایط ساختمانی

غلامرضا قدرتی امیری

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

مرتضی زاهدی

استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

عباس مهدویان

استادیار دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور

سهیل غلامی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد زلزله دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۲/۲/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۸/۲۰، تاریخ تصویب ۸۲/۱۰/۲۰)

### چکیده

برای تحلیل دینامیکی سازه ها لازم است از رکورد های ثبت شده زلزله استفاده شود. داده های خام حاصل از دستگاه های ثبت حرکات زمین ممکن است دارای خطاهایی باشند که بایستی منابع ایجاد خطا و میزان آن با دقت ارزیابی شده و تصحیحات لازم بر روی آنها صورت گیرد. هدف اصلی این تحقیق تعیین محدوده فرکانسی مناسب تصحیح رکوردها از دیدگاه مهندسی زلزله برای پردازش داده های شتابنگاشتهای ثبت شده در ایران برای انواع شرایط ساختمانی می باشد. برای دستیابی به این هدف روشهای مختلف تعیین فرکانس تصحیح مورد بررسی قرار گرفته و سرانجام استفاده از مدل استاندارد  $n^2$  برای طیف دامنه فوری شتاب، انتخاب شده است. در انجام این تحقیق مجموعه ای شامل ۷۸ رکورد زلزله ثبت شده در ایران انتخاب گردیده است. در این انتخاب معین بودن زلزله مسبب رکورد و مشخص بودن نوع زمین ایستگاه ثبت رکورد مدنظر قرار گرفته شده است. سپس با استفاده از برنامه نرم افزاری تهیه شده، طیف دامنه فوری شتاب مؤلفه های سه گانه هر یک از رکوردهای انتخابی محاسبه گردیده و منحنی آنها ترسیم شده است. از تطابق طیف دامنه فوری با مدل استاندارد  $n^2$ ، فرکانس تصحیح رکورد ها تعیین شده سپس رکوردها با استفاده از نرم افزار پردازشگر SWS در باند فرکانسی انتخابی تصحیح گردیده اند. اثر پارامترهای مختلف از جمله بزرگا، فاصله کانونی ایستگاه ثبت رکورد تا محل وقوع زمین لرزه و شرایط ساختمانی ایستگاه ثبت رکورد بر فرکانس تصحیح مورد بررسی قرار گرفته است و درانتها براساس نتایج حاصل، برای تصحیح رکوردهای ثبت شده در شرایط ساختمانی مختلف محدوده ای جهت انتخاب فرکانس تصحیح پیشنهاد گردیده است.

**واژه های کلیدی:** شتاب نگاشت ایران، محدوده فرکانس تصحیح، شرایط ساختمانی ایستگاه ثبت رکورد

### مقدمه

انتخاب روش تحلیل با توجه به اهمیت و پیچیدگی سازه انجام می گیرد. برای تحلیل دینامیکی (طیفی و تاریخیچه زمانی) لازم است به نحوی از رکوردهای ثبت شده زلزله استفاده نمود. این رکوردها که در واقع حرکات قوی زمین را نشان می دهند توسط دستگاه شتابنگار اندازه گیری شده و به صورت شتابنگاشت ارائه می گردند.

داده های خام حاصل از دستگاههای ثبت حرکات زمین ممکن است دارای خطاهایی باشند که بایستی منابع ایجاد خطا و میزان آن با دقت ارزیابی شده و تصحیحات

کشور ایران با قرار داشتن بر روی کمربند زلزله آلپ- هیمالیا همواره در معرض خطر زلزله های مخرب بوده است. شرایط زمین ساختی ایران ایجاب می کند که مسئله زلزله با حساسیتی ویژه مورد توجه قرار گیرد. یک مهندس برای طراحی سازه ها در برابر زلزله با دو مساله اساسی روبرو است: (۱)- به کارگیری روشی مناسب برای تحلیل سازه در برابر زلزله؛ (۲)- بدست آوردن و اعمال بارگذاری صحیح زلزله بر روی سازه متناسب با روش انتخاب شده.

گرفت تا دستگاهی مناسب که پاسخگوی نیاز شبکه باشد و با فن آوری روز مطابقت داشته باشد انتخاب گردد. نهایتاً دستگاه شتاب نگار دیجیتال SSA2 جهت توسعه شبکه شتابنگاری کشور انتخاب گردید و تعداد ۱۰۰۰ دستگاه از این نوع شتابنگار خریداری شد و به تدریج در نقاط مختلف ایران نصب گردید. [۱]

### منابع خطای شتاب نگاشتها

رکورد ثبت شده توسط دستگاه شتاب نگار دارای خطا می‌باشد که این خطاها را به دو گروه کلی می‌توان تقسیم کرد:

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

#### الف) خطاهای دستگاهی [۲]

منابع خطاهای دستگاهی در رکورد های حرکات زمین عبارتند از:

- ۱- انحراف دامنه فاز ترانس دیوسر
- ۲- نقص در طراحی ترانس دیوسر: اکثر ترانس دیوسرهای موجود دارای رفتار یک سیستم یک درجه آزادی نمی‌باشند.
- ۳- عملکرد اربب کاغذ یا فیلم باعث تغییرات چند میلی متری در ثبت رکورد می‌گردد.
- ۴- یکسان نبودن سرعت حرکت ماشین ثبت رکورد
- ۵- یکسان نبودن فاصله علائم زمانی
- ۶- اگر حساسیت دستگاه بالا باشد ممکن است قله های بزرگ خارج از اشل باشد.
- ۷- متغییر بودن ضخامت مسیر که بر روی دقت عددی کردن تأثیر می‌گذارد.
- ۸- حساسیت کالیبراسیون دستگاه
- ۹- گذشت زمان، دما و رطوبت باعث تغییراتی در سیستم می‌گردند.
- ۱۰- لغزش دستگاه

#### ب) خطای ظهور و عددی سازی [۳]

منابع خطاهای ظهور و عددی نمودن در رکوردهای حرکات زمین عبارتند از:

- ۱- تاب برداشتن نگاتیو فیلم در اثر عوامل شیمیایی

لازم بر روی آنها صورت گیرد تا داده های تصحیح شده حاصل را بتوان در تحلیل سازه ها به کار برد. از مهمترین خطاهای وارد شده در شتابنگاشتها، خطاهای فرکانس بالا و پیوند بلند هستند که جهت حذف آنها لازم است شتاب نگاشتها در یک باند فرکانسی معین از فیلترهای خاص عبور داده شوند. این باند فرکانسی مسلماً متناسب با هر رکورد حتی متناسب با هر مؤلفه رکورد براساس نسبت signal به noise تغییر پیدا می‌کند. انتخاب این باند فرکانسی از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که اگر درست انتخاب نگردد باعث حذف سیگنالهای فیزیکی واقعی زلزله می‌گردد و از ارزش محتوایی شتاب نگاشت می‌کاهد یا اینکه خطاهای فرکانس بالا و پایین به طور کامل از داده های شتاب حذف نمی‌گردد. اهمیت انتخاب این باند فرکانسی ما را بر آن داشت تا در این تحقیق به مطالعه و بررسی باند فرکانسی مطلوب جهت فیلتر کردن برای شرایط ساختگاهی مختلف در ایران برای اولین بار بپردازیم.

### تاریخچه شتابنگاری در ایران

در سال ۱۹۷۲ میلادی پس از رویداد زمین لرزه ویرانگر قیر-کارزین تعدادی دستگاه شتابنگار از نوع SMA1 خریداری و در مناطق لرزه خیز نصب و راه اندازی شد. دستگاههای شتابنگار SMA1 از آن سال به بعد در شهرهای بزرگ و کوچک و تعدادی از سازه های مهم نصب گردید. تعداد آنها در بدو انقلاب اسلامی در حدود ۲۷۰ دستگاه بود. عملکرد این دستگاهها علی رغم کمبود های فراوان بر اثر پاره ای مسائل بسیار جالب توجه بوده و رکوردهای مهمی نظیر ناغان (۱۳۵۶)، طبس (۱۳۵۷)، گلپاف (۱۳۶۰)، آب بر (۱۳۶۹) توسط این دستگاه ها ثبت گردیده است.

پس از زمین لرزه ویرانگر رودبار و منجیل (۱۳۶۹) نیازشدیدی به توسعه شبکه قبلی و امروزی کردن دستگاه های شتابنگار احساس گردید. عدم تناسب تعداد دستگاهها با وسعت کشور، کمبود وسایل مورد نیاز دستگاههای SMA1 و تکنولوژی قدیمی این دستگاهها نسبت به تکنولوژی روز، از عوامل تأثیر گذار در گسترش کمی و کیفی شبکه شتابنگاری بود. مطالعات فراوانی در مورد انواع دستگاههای شتابنگار موجود در سطح جهان صورت

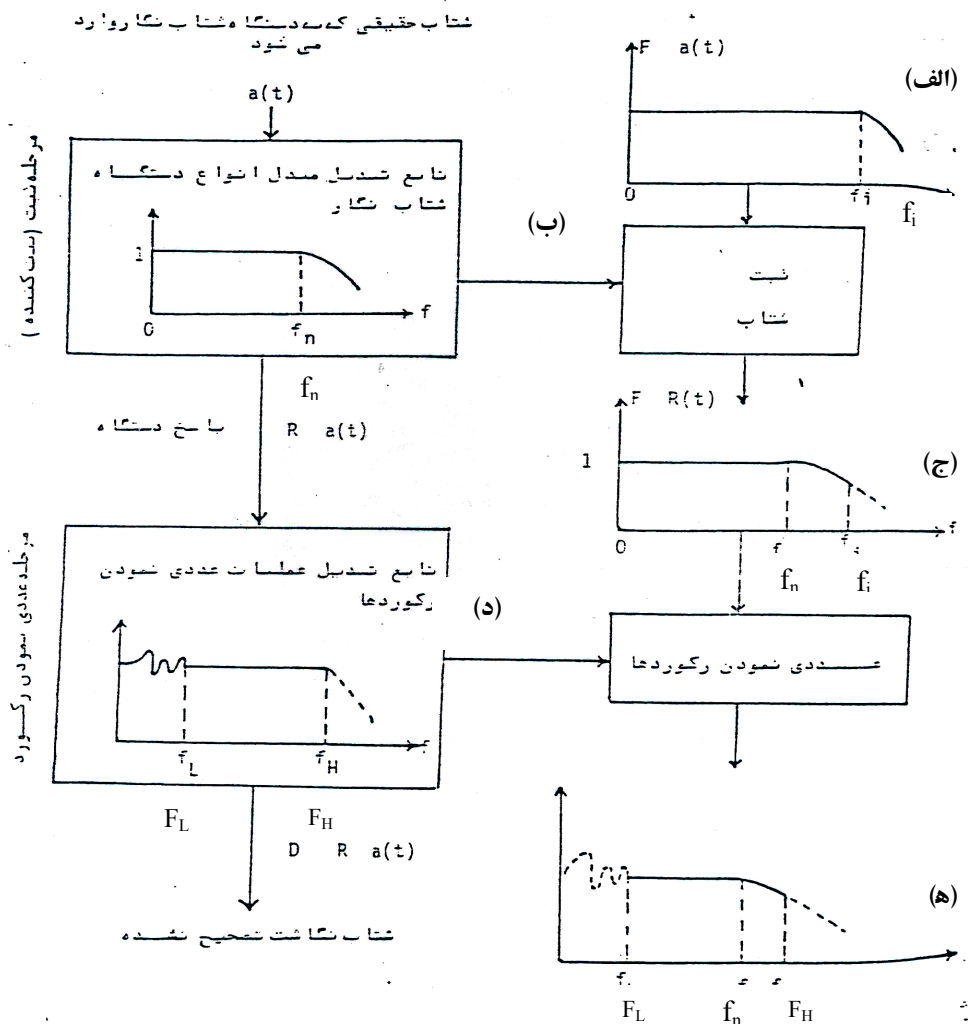
دومین اغتشاش مربوط به عددی نمودن این رکورد آنالوگ است. همانطور که در قسمت (د) از شکل (۱) مشاهده می شود، بعلت خطاهائی که در مرحله عددی نمودن رکورد آنالوگ وارد کار می شود در فرکانس های بین صفر تا  $F_L$  (حد پائین مرحله عددی نمودن رکوردها) و فرکانس های بزرگتر از  $F_H$  (حد بالای مرحله عددی نمودن)، اغتشاش خواهیم داشت. بدین جهت زمانیکه یک رکورد آنالوگ مانند نمودار (ج) از شکل (۱) را عددی نمائیم، در فرکانس های ذکر شده اغتشاش وجود دارد و نتیجه آن نموداری مانند قسمت (ه) از شکل (۱) خواهد بود که به عنوان داده های شتاب نگاشت تصحیح نشده در دسترس قرار می گیرد. به علت کاربرد جدیدی که تئوری ارتعاش سازه ها در طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله دارد، وجود یک سری داده های شتاب دقیق برای یک باند عریض فرکانسی الزامی است. بدین جهت لازم است که تصحیحاتی بر روی داده های خام انجام شود تا در یک باند فرکانسی مشخص به یک سری از داده های شتاب دقیق دست یابیم. در حقیقت با این کار ترجیح می دهیم که اطلاعات را در یک محدوده فرکانسی با یک دقت مشخص داشته باشیم تا اینکه تمام اطلاعات را در فرکانس های بالاتر و پایین تر که ممکن است خطاهای بزرگی را به همراه داشته باشند، حفظ نماییم [۴].

## آشنایی با فیلتر به عنوان مهمترین ابزار حذف خطای شتاب نگاشتها

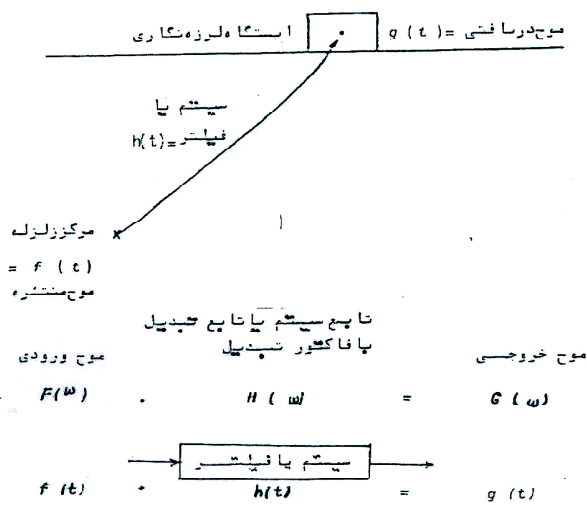
همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد برای حذف خطاهای فرکانس بالا و پرپود بلند پدیده آمده در شتاب نگاشتها لازم است که رکوردهای زلزله را در یک محدوده فرکانسی خاص فیلتر نماییم. اصولاً فیلتر یکی از مفاهیم مهم در ژئوفیزیک است که به دو صورت کاملاً متفاوت مطرح می گردد:

- الف- فیلتر طبیعی: این فیلتر به طور طبیعی وارد مسائل شده و از آن گریزی نیست.
  - ب- فیلتر مصنوعی: این فیلتر به وسیله عملیات محاسباتی بر داده ها اعمال می شود.
- رکوردها به طور طبیعی ترکیبی از پدیده ها (انواع

- ۲- خطاهای ناشی از بزرگنمایی و چاپ نگاتیوها ناشی از نقص لنزها
- ۳- اثر پواسون بر روی فیلم ها در مرحله کپی کردن (فیلم اصلی و کپی آن باید 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 عددی ساز
- ۶- اثرات فیلتر پایین گذر روی عددی کردن با ماشین مکانیکی عددی ساز (تخمین یک تابع پیوسته از روی یک سری نقاط گسسته همواره همراه با خطاست).
- ۷- خطاهای سیستماتیک و اتفاقی عددی سازی که عبارتند از:
  - نقص عملکرد مکانیکی دستگاه باعث خطاهای پرپود بلند می شود.
  - نقص اپراتور باعث خطاهای با فرکانس بالا و متوسط می گردد.
  - جابجایی خط مبنا در مراحل عددی سازی به صورت خطای با پرپود بلند ظاهر می شود.
- به طور کلی می توان گفت شتابی را که دستگاه شتاب نگار دریافت می نماید قبل از اینکه به صورت شتاب تصحیح نشده در دسترس باشد تحت تأثیر دو اغتشاش بزرگ واقع می شود. اولین اغتشاش مربوط به ترانس دیوسر دستگاه شتاب نگار است که در زمان ثبت رکورد ایجاد می گردد. برای نشان دادن طبیعت این اغتشاش، یک شتاب ثابت را که دارای فرکانس  $f_i$  می باشد ( $f_i > f_n$ ) و  $f_n$  فرکانس طبیعی مبدل یا ترانس دیوسر دستگاه شتابنگار می باشد) در نظر می گیریم که دستگاه شتاب نگار را تحت تأثیر قرار می دهد (قسمت الف شکل ۱). از طرفی به علت خصوصیات مکانیکی ترانس دیوسر، دستگاه شتاب نگار قادر خواهد بود تا امواجی با فرکانس حداکثر  $f_n$  را به طور دقیق ثبت نماید و بعد از آن آفتی خواهد داشت، بدین جهت رکوردی که دستگاه شتاب نگار ثبت می نماید نموداری مانند قسمت (ج) شکل (۱) خواهد بود. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در فرکانس های بالای  $f_n$  خطا خواهیم داشت که ناشی از دستگاه شتاب نگار است.



شکل ۱: تغییرات شتاب در مراحل ثبت و عددی نمودن آن [۴].



شکل ۲: عملکرد فیلترها [۴].

$\frac{2\pi}{\omega_1}$  می باشد و تمام مؤلفه های باپریود کوتاه (فرکانس های بالا) حذف شده اند.

در شکل (۳-ب) فیلتر ایده آل بالا گذر نشان داده شده است که بر خلاف فیلتر پایین گذر تمام مؤلفه های با فرکانس پایین (فرکانس های پایین تر از  $\omega_0$ ) را حذف می نماید. موج ورودی به این فیلترها همان موج ورودی فیلتر پایین گذر می باشد اما در خروجی فقط مؤلفه هایی باقی مانده اند که دارای پریود کوتاه می باشند و مؤلفه با

پریود بلند  $\frac{2\pi}{\omega_1}$  حذف شده است.

و بالاخره در شکل (۳-ج) یک فیلتر ایده آل Band-pass نشان داده می شود که این فیلتر هر دو مؤلفه های با فرکانس بالا و پایین را حذف می نماید.

همانطور که در شکل مشاهده می شود این فیلتر دارای دوحد فرکانسی بالا ( $\omega_b$ ) و فرکانس پایین ( $\omega_a$ ) است، که فقط مؤلفه هایی را که دارای فرکانسی بین این دو مقدار باشند حفظ نموده و بقیه مؤلفه ها را حذف می نماید. موج ورودی به این فیلتر دارای مؤلفه هایی با پریود بلند  $\frac{2\pi}{\omega_1}$  ( $\omega_1 < \omega_a$ ) و پریود متوسط  $\frac{2\pi}{\omega_2}$

( $\omega_a < \omega_2 < \omega_b$ ) و پریود کوتاه ( $\omega_3 > \omega_b$ ) می باشد.

موج خروجی از این فیلتر فقط دارای مؤلفه هایی با پریود متوسط  $\frac{2\pi}{\omega_2}$  می باشد و بقیه مؤلفه های با پریود بلند و کوتاه حذف شده اند.

### روش پردازش رکوردها

پردازش داده های شتابنگاشت همزمان با عددی کردن رکوردهای آنالوگ پس از ثبت اولین رکورد زلزله در ۱۰ مارس ۱۹۳۳ طی زلزله Long Beach در کالیفرنیا آغاز گردید. پردازش داده ها احتیاج به محاسبات دستی طولانی یا استفاده از کامپیوترهای آنالوگ داشت.

از سال ۱۹۶۰ تعداد ثبت رکوردها رشد سریعی پیدا کرد و استفاده از کامپیوترهای دیجیتال رواج یافت. بنابراین روشهای نوین پردازش داده ها به آرامی از لحاظ سرعت، دقت، دسترسی و عمومیت توسعه پیدا کرد. پس از وقوع

مختلف امواج ترکیبی، ... را دربردارند و مناسب است که فقط مؤلفه ای از آن، که تحت مطالعه و بررسی ما می باشد استخراج گردد. این عمل به وسیله فیلترهای اعمال شده انجام می شود. به وسیله یک فیلتر، می توان یک سری موج ورودی  $f(t)$  را صاف نموده و تبدیل به موج خروجی  $g(t)$  کرد. برای روشن شدن موضوع یک مثال خاص از موج لرزه نگاری و حرکت آن در درون زمین را در نظر می گیریم. فرض کنید که  $f(t)$  موجی از منبع زمین لرزه است، در حالی که موج دریافت شده به وسیله یک ایستگاه لرزه نگاری  $g(t)$  می باشد. خصوصیات فیلتر یا به عبارت دیگر سیستم در این حالت مشخص کننده رابطه بین موج منتشره و موج رسیده به ایستگاه لرزه نگاری می باشد (شکل ۲). ارتباط بین یک سیگنال ورودی  $f(t)$  و خروجی آن  $g(t)$  توسط یک فیلتر ثابت زمانی به وسیله انتگرال کانولوشن قابل بیان است:

$$g(t) = f(t) * h(t) \quad (1)$$

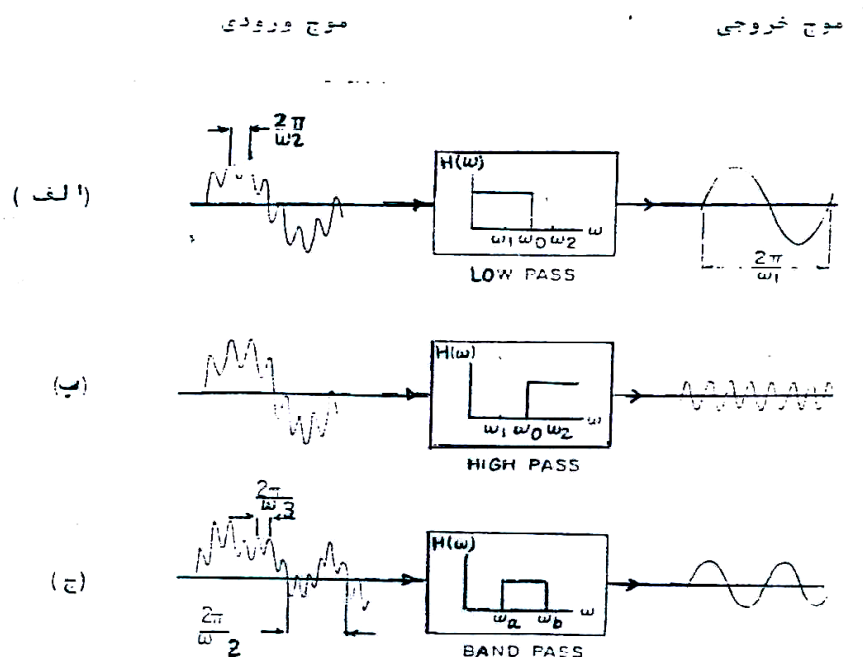
که در رابطه فوق  $h(t)$ ، پاسخ سیستم به ازای تابع ورودی واحد  $\delta(t)$  است. کانولوشن دو تابع را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$g(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

که در این صورت تبدیل فوریه آنها برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} f(t) \leftrightarrow F(\omega) \\ h(t) \leftrightarrow H(\omega) \Rightarrow G(\omega) = F(\omega)H(\omega) \\ g(t) \leftrightarrow G(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

شکل (۳) کارایی انواع فیلترهای مورد نیاز برای پردازش داده های شتاب نگاشت را نشان می دهد. شکل (۳-الف) یک فیلتر ایده آل پایین گذر را نشان می دهد که دارای فرکانس cut-off،  $\omega_0$  می باشد. این فیلتر تمام مؤلفه های با فرکانس بالا را (فرکانس های بالاتر از فرکانس  $\omega_0$ ) حذف می کند. همانطور که در شکل (۳) دیده می شود موج ورودی به این فیلتر دارای مؤلفه هایی با پریود بلند  $\frac{2\pi}{\omega_1}$  ( $\omega_1 < \omega_0$ ) و پریود کوتاه  $\frac{2\pi}{\omega_2}$  ( $\omega_2 > \omega_0$ ) بوده، درحالیکه موج خروجی فقط دارای مؤلفه ای با پریود بلند



شکل ۳: انواع فیلترهای ایده آل [۴].

می توان دریافت این است که تمام روشها از یک سری اصول کلی و ثابت تبعیت می کنند و گام های اصلی پردازش در تمام آنها ثابت است. پایه و اساس تمام روشهای پردازشی که تاکنون توسط محققین ارائه گردیده است همان روش Trifunac & Lee می باشد که در سال ۱۹۷۳ ارائه گردیده است [۱۲] و در حقیقت محققین بعدی فقط از ابزارهای جدید جهت رفع بعضی خطاهای روش فوق استفاده نموده اند.

### تعیین مقادیر $F_L$ و $F_H$ برای تصحیح شتاب نگاشتها

خطاهای فرکانس بالا و در مواردی پریودهای بلند در داده های شتاب نگاشت با استفاده از تکنیک فیلتر کردن از داده های شتاب حذف می گردند. تعیین بلندترین پریود  $(\frac{1}{F_L})$  و بالاترین فرکانس  $(F_H)$  در پردازش داده های شتابنگاشت از اهمیت بالایی برخوردار است. این دو مقدار در حقیقت مشخص کننده محدود فرکانسی عملیات پردازش می باشند که سعی ما بر آن

زلزله San Fernando در سال ۱۹۷۱ در کالیفرنیا ثبت تعداد زیاد رکورد و احتیاج محققین جهت مقایسه آنها با هم بر پایه یک اصل مشترک، منجر به ارائه یک روش نوین و اصولی برای پردازش شتاب نگاشتهای زلزله گردید. این روش نوین پردازش در دهه ۷۰ میلادی توسط Trifunac & Lee در سال ۱۹۷۳ کامل شد [۵].

از آن زمان تا کنون روشهای مختلفی جهت اصلاح شتابنگاشتها توسط افراد مختلف ارائه شده است. Newmark در سال ۱۹۷۳ [۶]، Taheri در سال ۱۹۷۷ [۷]، Kurata & Iai در سال ۱۹۷۸، Trifunac & Lee در سال ۱۹۷۹ [۸]، Sunder & Conner در سال ۱۹۸۲ [۹]، Erdik & Kubin در سال ۱۹۸۱ [۱۰]، Trifunac & Lee در سال ۱۹۹۰ [۵]، Converse در سال ۱۹۹۲ [۲] هر کدام روشی جدید جهت پردازش رکوردها ارائه نموده اند. در ضمن بر اساس بعضی از این روشها بسته های نرم افزاری جهت پردازش داده ها تهیه شده است که از آن جمله می توان به [۱۱] SWS، BAP [۲] و SIVA [۹] اشاره کرد.

نکته مهمی که از بررسی روشهای مختلف پردازش داده ها

واقعی که تشخیص signal و noise مشکل است، سخت می‌گردد [۱۳]. بررسی نتایج کار زارع نشان می‌دهد که این محقق در بعضی رکوردها مقادیر بالایی را برای  $F_L$  مورد استفاده قرار داده است و عملاً بسیاری از امواج مؤثر بر سازه‌ها را حذف نموده است بنابراین شتاب نگاشتهای تصحیح شده حاصل برای مقاصد سازه‌ای غیر قابل استفاده هستند. در ضمن گاهی فرکانس‌های بالای ۲۵ هرتز را برای  $F_H$  در تصحیح شتاب نگاشتهای ثبت شده توسط دستگاه SMA1 انتخاب نموده است که با توجه به اینکه این دستگاهها دارای فرکانس طبیعی حداکثر ۲۵ هرتز هستند، انتخاب مقادیر بالای ۲۵ هرتز درست نمی‌باشد. مهدویان نیز با توجه به فلسفه فیلتر کردن رکوردها و با استفاده از اشکال طیف پاسخ به تصحیح رکوردهای زلزله پرداخته است که در اکثر رکوردها  $F_L$  بین ۰/۱ تا ۰/۳ انتخاب شده است. با توجه به اینکه اکثر ساختمانها فرکانس طبیعی بین ۰/۳ تا ۱۰ هرتز دارند شتاب نگاشتهای تصحیح شده در محدوده فرکانسی انتخابی، برای مقاصد سازه‌ای قابل استفاده می‌باشند [۱۴].

### انتخاب زیر مجموعه‌ای مناسب از رکوردها

مجموعه‌ای شامل ۲۵۰۰ رکورد تصحیح نشده تا آخر سال ۲۰۰۰ میلادی که در شبکه شتابنگاری کشور ثبت گردیده و توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن جمع‌آوری شده است تهیه گردید. با توجه به زیاد بودن تعداد داده‌ها، لازم بود زیر مجموعه‌ای مناسب از آنها برای تصحیح و انجام مراحل تحقیق انتخاب گردد. برای این گزینش دو پارامتر مهم در نظر گرفته شده است که مختصراً به آنها اشاره می‌شود.

#### مشخص بودن زلزله مسبب

جهت مستند بودن رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق و با توجه به تقسیم بندی رکوردها براساس بزرگ و فاصله کانونی، داشتن مشخصات زلزله مسبب ضروری می‌باشد. بنابراین زیرمجموعه‌ای از رکوردها انتخاب گردیده است که دستیابی به مشخصات زلزله مسبب آن مقدور باشد. برای دستیابی به مشخصات زلزله، لازم است از کاتالوگهای تهیه شده برای داده‌های پایه شتابنگاشتها استفاده گردد. با توجه به اینکه هنوز کاتالوگ

است تا داده‌های حاصل از یک رکورد در این محدوده فرکانسی دارای دقت قابل قبول باشد و داده‌های مربوط به فرکانس‌های خارج از این محدوده ( $F_L, F_H$ ) که ممکن است خطاهای بزرگی را به همراه داشته باشند، حذف گردد. انتخاب نادرست این دو مقدار باعث حذف امواج فیزیکی واقعی زلزله از شتاب نگاشت طی عملیات پردازش می‌گردد و یا اینکه خطاهای فرکانس بالا و پایین را به طور کامل از شتاب نگاشت حذف نمی‌نماید و در هر دو حالت از ارزش محتوایی شتاب نگاشت کاسته می‌شود و شتاب نگاشت حاصل، دیگر نمایشگر حرکت واقعی زمین نیست. هدف اصلی انجام این تحقیق تعیین محدوده فرکانسی مناسب برای پردازش داده‌های شتابنگاشت ثبت شده در ایران برای انواع شرایط ساختگاهی است.

### مروری بر تحقیقات انجام شده در ایران

در ایران محققین زیادی در مورد پردازش رکوردها فعالیت نموده اند اما هیچ یک به صورت مشخص محدوده فرکانسی مناسب برای شرایط ساختگاهی مختلف ارائه نداده اند. در حقیقت می‌توان گفت که این تحقیق اولین نمونه‌ای است که سعی کرده است با دید مهندسی زلزله به قضیه بنگرد و به صورت مشخص، محدوده فرکانسی مطلوب جهت تصحیح را برای شرایط مختلف ارائه نماید. در میان کسانی که در این زمینه فعالیت داشته اند می‌توان به زارع [۱۳] و مهدویان [۱۴] و اشاره کرد. زارع برای تعیین مقادیر  $F_L$  و  $F_H$  از روش نسبت signal به noise استفاده نموده است. در این روش برای هر رکورد تبدیل فوریه سیگنال ( $S(f)$ ) در طول زمان  $t_s$  و تبدیل فوریه noise ( $N(f)$ ) در طول زمان  $t_n$  محاسبه می‌گردد.  $R_{sn}$  نسبت نرمال شده طیف signal به noise به صورت رابطه زیر نشان داده شده است:

$$R_{sn} = \frac{S(f) / \sqrt{t_s}}{N(f) / \sqrt{t_n}} \quad (4)$$

با انتخاب مقدار  $R_{sn} = 3$  به عنوان حد آستانه مطلوب، مقادیر فرکانس تصحیح از روی منحنی  $R_{sn}$  برای هر رکورد تعیین می‌گردد. زارع برای کنترل درستی بازه انتخابی از مدل  $\omega^{-2}$  استفاده نموده است. این روش در

الف - رکوردهای انتخابی از لحاظ محل ثبت، کلیه مناطق لرزه خیز ایران را پوشش دهند.

ب - پراکندگی مناسبی از لحاظ بزرگا و فاصله داشته باشند.

## تصحیح خط مبنا و Tapering داده های خام شتابنگاشت

برای محاسبه سرعت و تغییر مکان بایستی از رکوردها انتگرال گرفت و برای این منظور لازم است اعوجاجهای خط پایه کنترل گردد. به منظور کاهش زمان محاسباتی مربوط به عملیات فیلتر، بهتر است ابتدا کلیه انحرافات خطی شاخص از رکورد حذف گردد. ساده ترین روش حذف این خطا استفاده از میانگین داده ها است یعنی اینکه ابتدا میانگین داده ها محاسبه شده سپس مقادیر خام از این میانگین کسر گردد.

در ضمن به علت اینکه لرزه نگار با وقفه کوتاهی پس از رسیدن اولین موج زلزله شروع به کار می کند و همچنین ثبت امواج زلزله پس از اتمام حرکات زمین به طور کامل امکان پذیر نیست لذا علائم ثبت شده یا عددی شده فقط قسمتی از کل تاریخچه زمانی زلزله را تشکیل می دهند، بنابراین مشکلات مربوط به نشت (Leakage) در داده های شتاب نگاشت وجود دارد. این موضوع از دقت محاسبات دامنه فوریه می کاهد. برای به حداقل رساندن این اثر باید سری زمانی شتاب در یک فیلتر مناسب ضرب گردد. این عمل به Tapering موسوم است. در این تحقیق از فیلتر نیم کسینوس برای Tapering داده ها استفاده شده است که ۵۰ داده ابتدایی و انتهایی رکوردها با کمک این فیلتر تصحیح می شوند.

برای تصحیح خط مبنا و Tapering داده های خام شتابنگاشت برنامه کامپیوتری تحت Visual Basic با نام FFT Correction1 نوشته شده است که این برنامه نتیجه را به صورت ۶ منحنی در یک فایل خروجی تحت نرم افزار EXCEL ارائه می دهد. این ۶ منحنی تاریخچه زمانی شتاب تصحیح شده سه مؤلفه و طیف دامنه فوریه آنها را شامل می شود. نمونه ای از خروجی این برنامه همراه با منحنی های تصحیح نشده آنها در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است. این منحنی ها مربوط به شتاب نگاشت شماره ۱۴۹۷ می باشد که زلزله زنجیران را در

دقیق، کامل و جامعی از مشخصات رکوردهای ثبت شده در ایران وجود ندارد، لازم است کاتالوگهای مختلف و پراکنده موجود مورد بررسی قرار گیرد. در راه انتخاب رکوردهای مناسب، سه کاتالوگ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن با عنوان داده های پایه شتاب نگاشت های شبکه شتابنگاری کشور [۱]، کاتالوگ زارع [۱۳] و کاتالوگ مهدویان [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته شده است.

## مشخص بودن شرایط ساختگاهی ایستگاه ثبت رکورد زلزله

هدف اصلی ما در این تحقیق پیشنهاد باند فرکانسی مناسب برای تصحیح شتاب نگاشتها در شرایط مختلف ساختگاهی است لذا باید رکوردهایی انتخاب شوند که شرایط ساختگاهی آنها بادقت بالایی تعیین شده است. برای این منظور لازم بود تحقیقاتی که در ایران برای تعیین نوع زمین ایستگاههای ثبت رکورد زلزله صورت گرفته است مورد مطالعه قرار گیرد که بدین منظور مشخصات ایستگاههای شبکه شتابنگاری کشور ارائه شده توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [۱۵]، تحقیقات زارع [۱۶]، مهدویان [۱۴] و کمک پناه [۱۷] در زمینه تعیین مشخصات ایستگاههای شبکه شتابنگاری کشور مورد بررسی قرار گرفته شده است.

با توجه به اینکه بسیاری از رکوردهای ارائه شده در کاتالوگ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن مخصوصاً رکوردهای ثبت شده در سالهای اخیر فاقد فاصله کانونی و بزرگا می باشند نمی توان از این مرجع استفاده کرد. کاتالوگ ارائه شده توسط زارع هم از لحاظ پراکندگی بزرگا و فاصله تأمین کننده هدف پژوهش حاضر نمی باشد بنابراین با بررسی های صورت گرفته، کاتالوگ ارائه شده توسط مهدویان به علت جامعیت کافی برای انجام این تحقیق به عنوان مرجع اصلی حصول اطلاعات انتخاب گردید. در مورد شرایط ساختگاهی نیز تقسیم بندی صورت گرفته توسط مهدویان ملاک کار قرار گرفته شده است چرا که این تقسیم بندی از دقت بالا تری نسبت به سایر تحقیقات برخوردار است. لذا از میان ۲۵۰ رکورد ارائه شده در کاتالوگ مهدویان ۷۸ رکورد که کیفیت ثبت بهتری داشته اند انتخاب گردیده است که در انتخاب آنها موارد زیر نیز مورد توجه قرار گرفته شده است:



تا ۲۵ هرتز هستند بنابراین حداکثر مقداری که می توان برای  $F_H$  در تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاهها انتخاب نمود فرکانس ۲۵ هرتز می باشد مشروط بر آنکه در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۲۵ هرتز تصحیحات دستگاهی صورت پذیرد و امواج با فرکانس های بالاتر از ۲۵ هرتز حذف گردد. در این تحقیق برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاههای SMA1 با شرط تصحیحات دستگاهی، باند فرکانسی ۲۰-۲۳ هرتز انتخاب گردیده است. با توجه به اینکه این محدوده فرکانسی معادل پریود ۰/۰۵- ۰/۰۴ ثانیه است و تمام سازه های موجود زمان تناوبی بالاتر از ۰/۰۴ ثانیه دارند (به جز سازه های خاص مانند نیروگاههای هسته ای)، رکوردهای تصحیح شده در این محدوده فرکانسی کاملاً قابل استفاده در تحلیل سازه ها می باشند.

دستگاههای SSA2 دارای فرکانس طبیعی حداکثر تا ۱۰۰ هرتز هستند که تا محدوده ۵۰ هرتز رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاهها نیازی به تصحیحات دستگاهی ندارند و می توان مقدار  $F_H$  را در تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاهها تا ۵۰ هرتز انتخاب نمود اما با توجه به اینکه فرکانس طبیعی کلیه سازه های موجود حتی نیروگاههای هسته ای که کاملاً صلب هستند حداکثر ۳۳ هرتز می باشد و امواج با فرکانس های بالاتر از ۳۳ هرتز عملاً کاربردی در تحلیل سازه ها ندارند در این تحقیق در تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاه باند فرکانسی ۳۰-۳۳ هرتز انتخاب گردیده است. البته خاطر نشان می شود که می توان برای تحلیل سازه هایی غیر از سازه های خاص، باند فرکانسی ۲۰ تا ۲۵ هرتز (مشابه دستگاه SMA1) را برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SSA2 انتخاب نمود.

به صورت خلاصه می توان گفت که اگر شتاب نگاشت تصحیح شده برای تحلیل سازه هایی غیر از سازه های خاص استفاده می گردد به شرط اعمال تصحیحات دستگاهی باند فرکانسی ۲۰-۲۵ هرتز برای هر دو نوع دستگاه ثبت مناسب ترین باند تصحیح فرکانس بالا است و در موارد خاص بر حسب نیاز می توان برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SSA2 مقدار  $F_H$  را تا ۵۰ هرتز و بدون تصحیحات دستگاهی انتخاب نمود.

تاریخ ۲۰ ژون ۱۹۹۴ با بزرگای  $M_s = 5.8$  در فاصله کانونی ۶۰ کیلومتر در ایستگاه فراش بند ثبت نموده است.

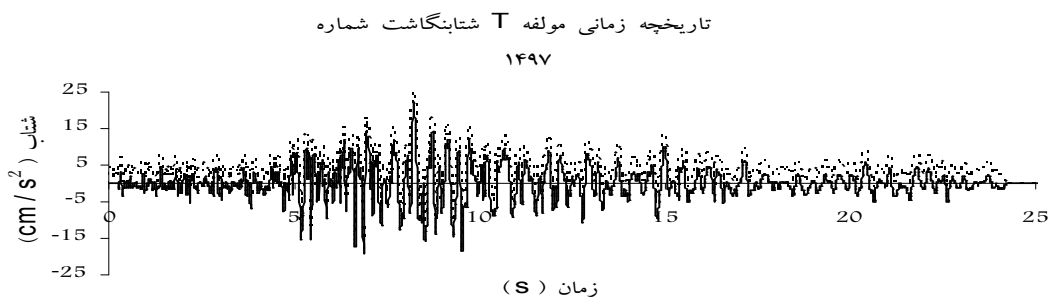
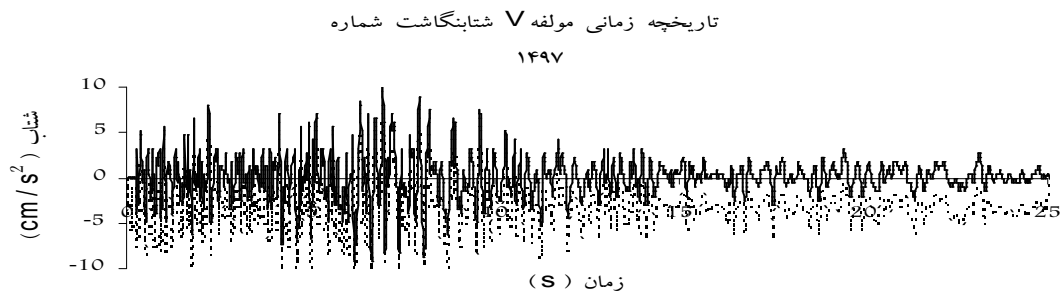
مقایسه داده های خام و تصحیح شده نشان می دهد که تصحیح خط مبنا حتی به صورت یک تصحیح خیلی ساده مانند کم کردن مقادیر خام از میانگین آنها باعث تغییرات قابل توجهی در تاریخچه زمانی شتاب و طیف دامنه فوریه آن می شود. در سری های زمانی شتاب، تصحیح خط مبنا داده ها را به روی محور صفر شتاب منتقل می نماید که این عمل باعث واقعی تر شدن شکل سری های زمانی می گردد.

بررسی منحنی های طیف دامنه فوریه نشان می دهد که تصحیح خط مبنا تأثیر چندانی در دامنه فوریه فرکانس های بالا ندارد و تأثیر آن در فرکانس های پایین دیده می شود و این امر طبیعی است چرا که جابجایی خط مبنا از نوع خطاهای پریود بلند (فرکانس پایین) می باشد. نکته قابل توجه دیگری که از بررسی منحنی های طیف دامنه فوریه می توان دریافت این است که پس از تصحیح، مقدار دامنه فوریه در فرکانس های دارای خطا، کاهش پیدا می کند. به عبارت دیگر خطای جابجایی خط مبنا باعث می گردد مقادیر دامنه فوریه در محدوده فرکانسی دارای خطا به صورت کاذب افزایش پیدا کند.

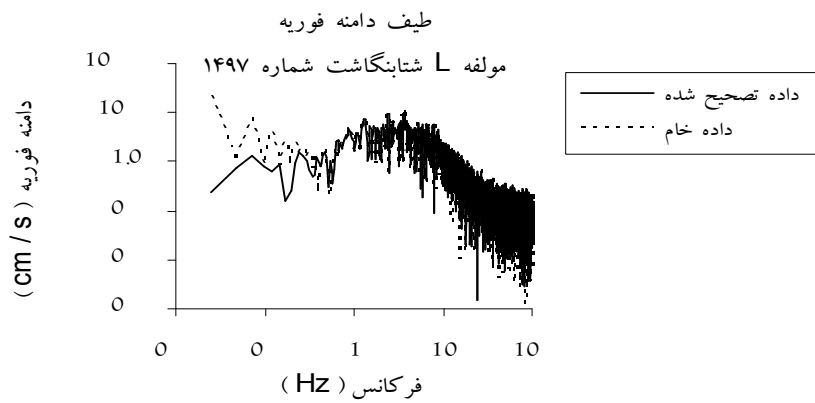
### انتخاب $F_H$ برای حذف خطاهای فرکانس بالا

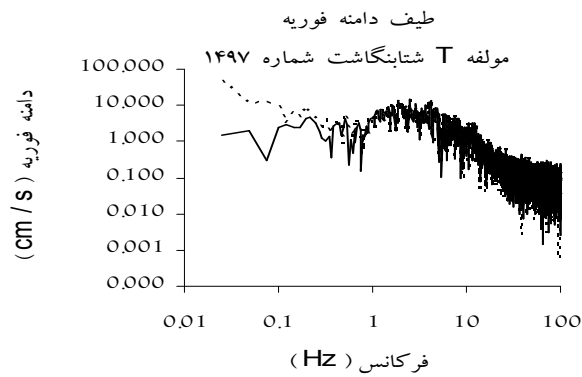
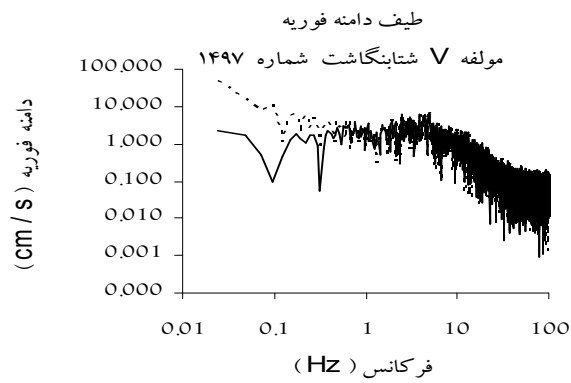
در بحث منابع خطای شتابنگاشتها اشاره شد که به علت خصوصیات مکانیکی ترانس دیوسر، دستگاه شتاب نگار قادر است تا حداکثر، امواجی با فرکانس  $f_n$  (فرکانس طبیعی دستگاه) را به صورت دقیق ثبت نماید و بعد از آن افتی خواهد داشت (شکل (۱-ب)). بدین جهت اگر تصحیحات دستگاهی بر داده ها اعمال نگردد، رکورد ثبت شده توسط دستگاه تا فرکانس  $f_n$  عاری از خطا خواهد بود در حالی که امواج ثبت شده با فرکانس های بالاتر از  $f_n$  همراه با اغتشاشاتی است که تشخیص این دو از هم عملاً غیرممکن است. بدین جهت بلندترین فرکانسی که می تواند با دقت از یک رکورد استخراج گردد برابر با  $f_n$  خواهد بود و این مقدار محدودیت فرکانس بالا در عملیات پردازش است.

دستگاههای SMA1 دارای فرکانس طبیعی حداکثر

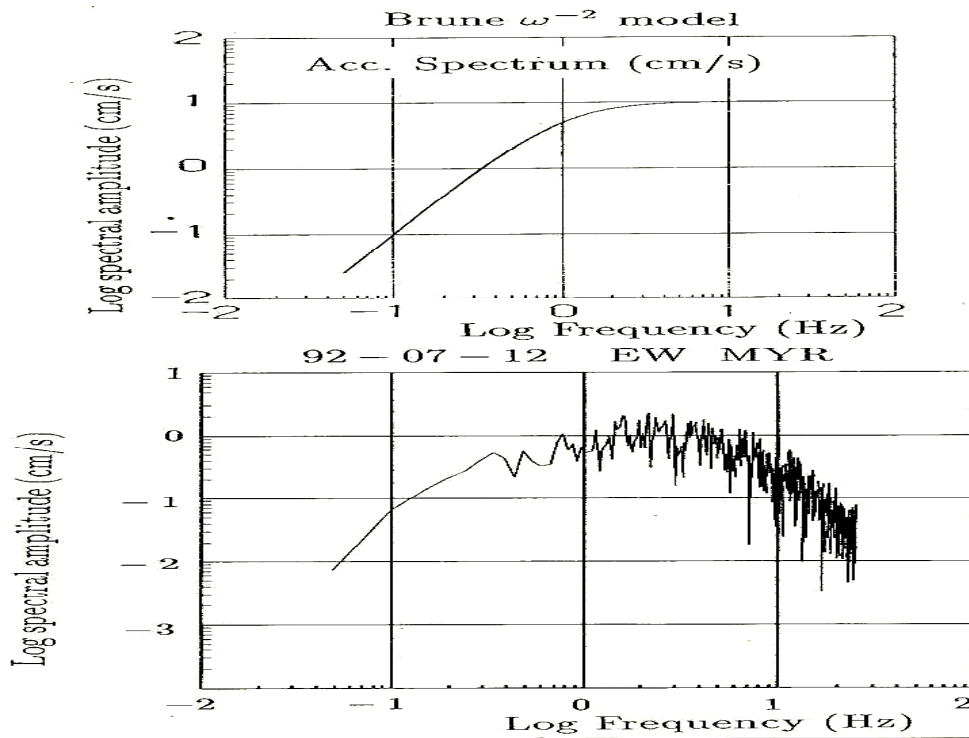


شکل ۴: جیح خط مبنا بر تاریخچه زمانی شتاب.





شکل ۵: اثر تصحیح خط مبنا بر طیف دامنه فوریه شتاب.



شکل ۶: مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زمین لرزه ۱۲ ژوئای ۱۹۹۲ ژاپن ثبت شده در ایستگاه MYR با طیف دامنه فوریه مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  [۱۹].

## انتخاب $F_L$ برای حذف خطاهای فرکانس پایین

برای بدست آوردن بلندترین پریود ( $\frac{1}{F_L}$ ) تاکنون

آزمایشات زیادی انجام شده است. در این آزمایشات تغییر مکان زمین به وسیله یک آزمایشگاه دقیق سنجش زمین در یک زمان مشخص بدست آمده است و نتایج آن با منحنی های حاصل از انتگرال گیری دوبل از شتاب ثبت شده مقایسه گردیده است. این آزمایشات نشان داده است که برای یک شتاب نگاشت، متوسط بلندترین پریودی که می توان استخراج نمود در حدود ۱۶ ثانیه (فرکانس ۰/۰۶ هرتز) می باشد. این مقدار مدتها به عنوان پایین ترین فرکانس مورد قبول در پردازش داده ها مورد استفاده قرار گرفت تا زمانی که زلزله San Fernando در کالیفرنیا اتفاق افتاد. بررسی دامنه های جابجایی حاصل از شتاب نگاشت های این زلزله مشخص نمود که انتخاب  $F_L = 0.06$  هرتز به عنوان کمترین فرکانس قابل قبول در تمام رکوردها قطعی نیست و می تواند برای بعضی از رکوردها خطایی در حدود چند سانتی متر را برای تغییر مکان حاصل نماید. از آن زمان به بعد در پردازش رکوردهای زلزله برای هر شتاب نگاشت و حتی برای هر یک از مؤلفه های آن مقدار  $F_L$  به صورت مجزا تعیین می گردد و شتاب نگاشت های مختلف با مقادیر مختلف  $F_L$  پردازش می شوند [۸].

روشهای مختلفی برای تعیین  $F_L$  وجود دارد که از جمله می توان به روش نسبت signal به noise و مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  برای طیف دامنه فوریه نزدیک ساختمانی اشاره کرد. با توجه به اینکه تشخیص signal و noise از یکدیگر کاری کاملاً تخصصی است و در مواقعی که تشخیص signal و noise از یکدیگر مشکل باشد استفاده از روش نسبت signal به noise عملاً غیر ممکن است. لذا در این تحقیق از مدل  $\omega^{-2}$  برای تعیین  $F_L$  استفاده شده است.

### مدل استاندارد $\omega^{-2}$

براساس نظریه Brune (1970) [۱۸]، مدل

$\omega^{-2}$  برای مدل سازی منبع زلزله طبق رابطه زیر برای

طیف شتاب تعریف می شود:

$$A(f) = \frac{CM_0}{R} \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (5)$$

مقدار C از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = \frac{R1.F_s.P}{4\pi\rho V_s^3} \quad (6)$$

در این روابط R1 ضریب الگوی تشعشع،  $F_s$  ضریب تقویت در سطح آزاد، P فاکتور کاهش است که جهت تفکیک انرژی بین دو مؤلفه افقی محاسبه می گردد،  $\rho$  و  $V_s$  چگالی و سرعت امواج برشی،  $M_0$  گشتاور لرزه ای،  $f_c$  فرکانس گوشه و R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر می باشد.

شکل مدل  $\omega^{-2}$  برای شتاب نشان می دهد که طیف شتاب تا قبل از فرکانس گوشه حالت کاملاً صعودی دارد و پس از آن صاف می شود. برای ارزیابی مدل  $\omega^{-2}$ ، اگر طیف دامنه فوریه شتاب امواج برشی را با مدل تئوری در شکل (۶) مقایسه نماییم، مشاهده می شود که در فرکانس های پایین با افزایش فرکانس مقدار دامنه فوریه افزایش می یابد اما در فرکانس های بالا با افزایش فرکانس مقدار دامنه فوریه کاهش پیدا می کند. قسمت اول کاملاً بر مدل  $\omega^{-2}$  منطبق است اما قسمت دوم با مدل تناقض دارد چرا که مدل  $\omega^{-2}$  طیف صاف را در فرکانس های بالا نشان می دهد در حالی که همانطور که در بالا اشاره شد تمام طیفهای امواج برشی در فرکانس های بالا حالت نزولی را نشان می دهند. این تفاوت را می توان اثر مسیر و ساختگاه بر طیف شتاب توصیف کرد [۱۹].

روش تعیین فرکانس تصحیح  $F_L$  با استفاده از مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  بدین صورت بوده است که ابتدا با استفاده از برنامه نرم افزاری که تهیه شده است منحنی طیف دامنه فوریه شتاب برای هر سه مؤلفه یک رکورد رسم می شود. این منحنی ها برای داده های شتابی که تصحیح خط مبنا و عملیات Tapering با استفاده از تابع نیم کسینوس روی آنها انجام گرفته است ترسیم می گردند. سپس هر منحنی با مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  مقایسه می گردد و با توجه به اینکه طیف دامنه فوریه در مدل  $\omega^{-2}$  تا فرکانس گوشه حالت

مرکز وقوع زمین لرزه از ایستگاه ثبت رکورد می باشد. برای بررسی این پارامتر بر روی فرکانس تصحیح، تعدادی رکورد از میان ۷۸ رکورد انتخابی، گزینش شده اند. در گزینش این رکوردها سعی شده است که غیر از فاصله کانونی سایر شرایط و مشخصات آنها یکسان باشد. برای رکوردهای انتخابی مطابق روشی که در قسمتهای قبل توضیح داده شده است، فرکانس تصحیح تعیین گردید و رکوردها با استفاده از نرم افزار SWS در باند فرکانسی انتخابی تصحیح شده اند. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که با افزایش فاصله کانونی، مقدار فرکانس تصحیح ( $F_L$ ) افزایش می یابد. به عبارت دیگر اگر زمین لرزه ای در فاصله ای دورتر ثبت گردد، رکورد حاصل به دلیل وجود امواج با پریودهای بلند خطای پریود بلند بیشتری دارد و لازم است با دقت بیشتری تصحیح گردد.

### بررسی اثر بزرگا بر فرکانس تصحیح

یکی دیگر از پارامترهای مهم و تأثیر گذار بر مقدار فرکانس تصحیح رکوردها، بزرگای زمین لرزه می باشد. بررسی نتایج باندهای فرکانس تصحیح برای رکوردهای مختلف با بزرگای متفاوت نشان می دهد که مقدار فرکانس تصحیح ( $F_L$ ) با افزایش بزرگا، کاهش پیدا می کند. به عبارت دیگر زلزله‌های با بزرگای بیشتر دارای خطای پریود بلند کمتری هستند و در هنگام ثبت و عددی نمودن آنها، noise های با فرکانس پایین، کمتر با داده ها آمیخته می شوند. لذا در این رکوردها می توان پس از تصحیح، باند فرکانسی وسیعتری را در اختیار داشت. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب رکوردهای گوناگون با بزرگای مختلف همچنین نشان می دهد که با افزایش بزرگا پهنای باند فرکانسی افزایش می یابد و فرکانس گوشه کاهش پیدا می کند که نشان دهنده آن است که حرکات با فرکانس پایین رخ خواهند داد. این مسئله را می توان در شکل های (۷) و (۸) به وضوح مشاهده کرد.

شکل (۷) مربوط است به طیف دامنه فوریه رکورد شماره ۱۷۲۴ که زمین لرزه سرعین را در تاریخ ۲۸ فوریه ۱۹۹۷ با بزرگای  $M_s = 6.1$  در ایستگاه نمین ثبت کرده است و شکل (۸) هم طیف دامنه فوریه رکورد شماره ۱۶۸۸ را که زلزله ای با بزرگای  $M_s = 4.8$  در تاریخ ۲

کاملاً صعودی دارد، در طیف دامنه فوریه بدست آمده از رکوردها، بلندترین فرکانسی که تطابق با مدل  $\omega^{-2}$  را نقض می کند تقریباً به عنوان  $F_L$  تعیین می گردد.

برای اطمینان از اینکه فرکانس تصحیح درست انتخاب شده است لازم است که طیف دامنه فوریه شتاب تصحیح شده نیز ترسیم گردد و با مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  مطابقت داده شود. بدین منظور رکوردها در باند فرکانسی تعیین شده با استفاده از نرم افزار SWS پردازش گردیده اند. این نرم افزار بر اساس روش ارائه شده توسط Tnifunac & Lee در سال ۱۹۷۹ در مؤسسه تکنولوژی کالیفرنیا (Caltech) تهیه شده است. شتاب نگاشتها با استفاده از این نرم افزار برای خط پایه و خصوصیات دینامیکی شتابنگار و حذف امواج noise با فرکانس های بالا و پایین، تصحیح می گردند. سپس برنامه نرم افزاری تحت Visual Basic با نام FFT Correction2 تهیه گردیده است که شتاب تصحیح شده را می خواند و با استفاده از تکنیک تبدیل سریع فوریه (FFT)، طیف دامنه فوریه آن را محاسبه می نماید. خروجی این برنامه ۶ منحنی تحت نرم افزار EXCEL می باشد که این ۶ منحنی سری زمانی شتاب تصحیح شده و طیف دامنه فوریه هر سه مؤلفه را نمایش می دهند. طیف دامنه فوریه شتاب تصحیح شده را با مدل  $\omega^{-2}$  مقایسه می نماییم. در صورتی که همانند مدل استاندارد، طیف حاصل حالت کاملاً صعودی تا فرکانس گوشه داشته باشد نشانگر این است که باند تصحیح درست انتخاب شده است در غیر این صورت لازم است باند تصحیح دیگری جهت پردازش انتخاب گردد و عملیات بالا تا حصول نتیجه مطلوب مجدداً تکرار شود. با توجه به اینکه در پردازش رکوردها برای هر سه مؤلفه فقط یک فرکانس تصحیح تعریف می گردد و ممکن است مؤلفه های مختلف یک رکورد،  $F_L$  های مختلف داشته باشند باید با یک قضاوت مهندسی بهترین مقدار را برای فرکانس تصحیح از میان آنها انتخاب نمود.

### بررسی اثر فاصله کانونی بر فرکانس تصحیح رکوردها

یکی از پارامترهای مهمی که فرکانس تصحیح شتاب نگاشتها را تحت تأثیر قرار می دهد، فاصله کانونی

شده در شرایط سنگ و خاک تفاوت‌هایی وجود دارد. طیف دامنه فوریه رکوردهای ثبت شده در ساختگاه سنگی در پرپوده‌های کوتاه (فرکانس بالا) قوی تر است در حالی که در رکوردهای ثبت شده در ساختگاه خاک، طیف فوریه در فرکانس های پایین قوی تر می باشد. به عنوان مثال می توان طیف دامنه فوریه رکورد شماره ۱۶۹۱ را با رکورد شماره ۱۷۰۲ در شکل (۹) مقایسه نمود. همانطور که مشاهده می شود طیف دامنه فوریه برای رکورد شماره ۱۷۰۲ که در ساختگاه خاک ثبت گردیده است در فرکانس های پایین (زیر ۵ هرتز) قوی تر است درحالیکه برای رکورد ۱۶۹۱ که در ساختگاه سنگ ثبت شده است، طیف دامنه فوریه در فرکانس های بالا (بالای ۵ هرتز) قویتر می باشد. این مساله به خاطر اثر تقویت خاک در فرکانسهای پایین است. از نظر مقادیر فرکانس تصحیح، مقایسه اعداد نشان می دهد که رکوردهایی که در شرایط ساختگاهی خاک ثبت گردیده اند، در شرایط یکسان در فرکانس پایین تری تصحیح می گردند تا اثرات ساختگاهی بر روی شتاب نگاشتها حذف نگردد. در جدول (۱) بر اساس نتایج حاصل، محدوده مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها در شرایط ساختگاهی مختلف پیشنهاد شده است که البته لازم است در انتخاب این مقادیر اثر بزرگا و فاصله کانونی هم لحاظ شود.

### نتیجه گیری

در این تحقیق مجموعه ای شامل ۷۸ رکورد زلزله ثبت شده در ایران از کاتا لوگ ارائه شده توسط مهدویان انتخاب گردیده است. در این انتخاب معین بودن زلزله مسبب رکورد و مشخص بودن نوع زمین ایستگاه ثبت رکورد مدنظر قرار گرفته شده است. سپس با استفاده از برنامه نرم افزاری تهیه شده، طیف دامنه فوریه شتاب مؤلفه های سه گانه هر یک از رکوردهای انتخابی محاسبه گردیده و منحنی آنها ترسیم شده است. از تطابق طیف دامنه فوریه با مدل استاندارد  $\omega^{-2}$ ، فرکانس تصحیح رکورد ها تعیین شده سپس رکوردها با استفاده از نرم افزار پردازشگر SWS در باند فرکانسی انتخابی تصحیح گردیده اند. اثر پارامترهای مختلف از جمله بزرگا، فاصله کانونی ایستگاه ثبت رکورد تا محل وقوع زمین لرزه و

فوریه ۱۹۹۷ در همان ایستگاه ثبت نموده است، نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد پهنای باند در شکل (۷) که بزرگای زلزله آن بیشتر است عریض تر می باشد. این مسئله با مبانی تئوری نیز مطابقت دارد. در سال ۱۹۷۰، Brune رابطه زیر را برای مقدار فرکانس گوشه ارائه داده است:

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s \left[ \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right]^{1/3} \quad (7)$$

که در رابطه فوق  $V_s$  سرعت موج برشی بر حسب  $M_0$  Km/sec بزرگا بر حسب dyne-cm و  $\Delta\sigma$  که به آن پارامتر تنش یا افت تنش می گویند، بر حسب bar می باشد [۱۸]. همانطور که در رابطه بالا دیده می شود مقدار فرکانس گوشه با ریشه سوم بزرگا نسبت عکس دارد و با افزایش بزرگا مقدار فرکانس گوشه کاهش پیدا می کند و به تبع آن عرض باند فرکانسی افزایش می یابد که در طیفهای فوریه بدست آمده در این تحقیق کاملاً مشهود است.

### اثر شرایط زمین ساختی ایستگاه ثبت رکورد بر شکل طیف دامنه فوریه و مقدار فرکانس تصحیح

سالهاست که محققین از تأثیر شرایط محلی زمین شناسی بر شدت لرزشهای زمین و خرابیهای ناشی از زلزله آگاهند. ویژگیهای زمین شناسی ساختگاهی و ژئوتکنیکی مانند نوع خاک یا سنگ، تعداد لایه ها، ضخامت و شیب آنها، شرایط آب زیر زمینی، شرایط توپوگرافی و مدولهای دینامیکی لایه ها که خود تابعی از سرعت امواج در لایه و جرم مخصوص آنها هستند نقش مهمی در دامنه و محتوای فرکانسی شتابنگاشت حاصل دارند. برای بررسی چگونگی این تأثیر رکوردها به دو گروه ثبت شده در شرایط سنگ و خاک تقسیم شده اند و فرکانس تصحیح آنها با استفاده از مدل استاندارد  $\omega^{-2}$  تعیین گردیده است سپس داده های خام با کمک نرم افزار SWS در باند فرکانسی انتخابی تصحیح شده اند.

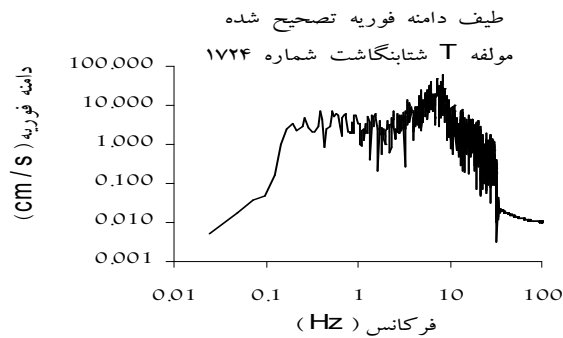
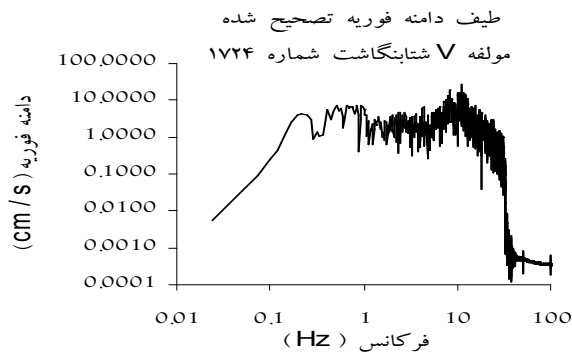
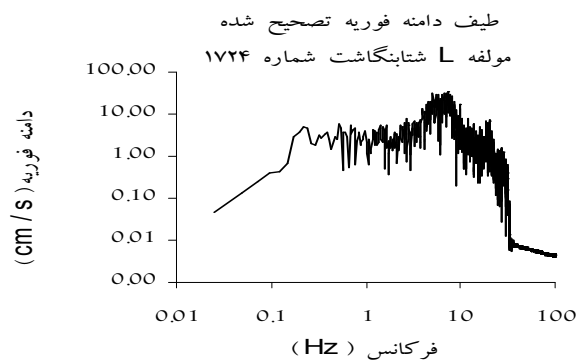
از مقایسه اشکال طیف دامنه فوریه و تاریخچه زمانی شتاب رکوردها می توان دریافت که میان رکوردهای ثبت

مورد بررسی قرار گرفته شده است.

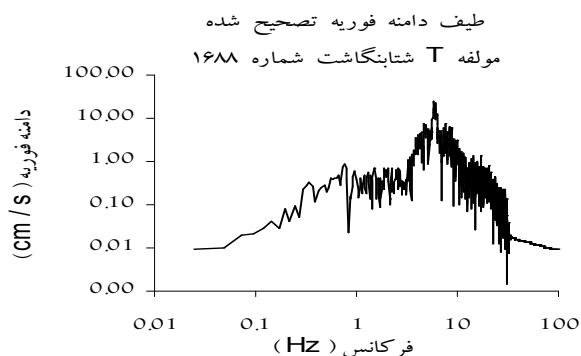
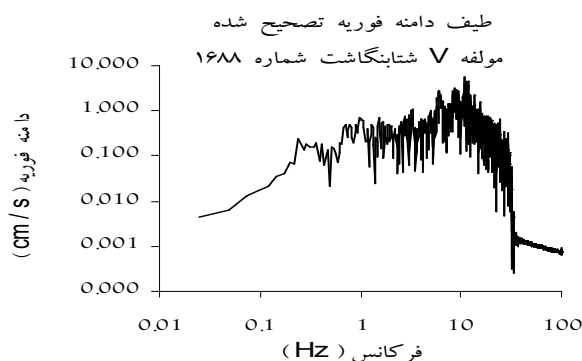
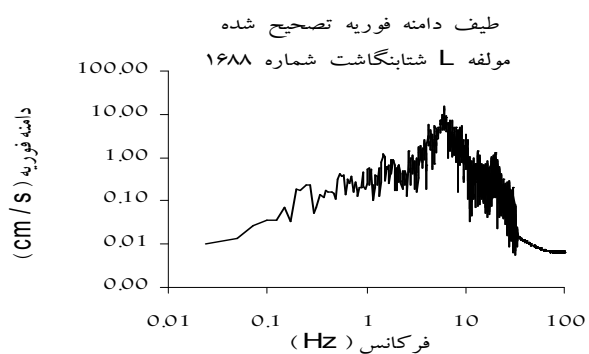
شرایط ساختگاهی ایستگاه ثبت رکورد بر فرکانس تصحیح

جدول ۱: مقادیر پیشنهادی فرکانس تصحیح رکوردها در شرایط مختلف ساختگاهی.

نوع ساختگاه	نوع دستگاه ثبت	محدوده مناسب $F_L$	محدوده مناسب $F_H$
سنگ	SSA2	0.15 - 0.2	30 - 33
سنگ	SMA1	0.15 - 0.25	20 - 23
خاک	SSA2	0.07 - 0.2	30 - 33
خاک	SMA1	0.15 - 0.2	20 - 23



شکل ۷: طیف دامنه فوریه زمین لرزه ای با بزرگای زیاد.



شکل ۸: طیف دامنه فوریه زمین لرزه ای با بزرگای کم.

۳- با توجه به اینکه فرکانس طبیعی دستگاههای SMA1 حداکثر ۲۵ هرتز می باشد، لازم است برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاه مقدار  $F_H$  (حد بالای باند تصحیح) بین ۲۰ تا ۲۳ هرتز انتخاب گردد. مشروط به اینکه تصحیحات دستگاهی نیز در این محدوده صورت پذیرد.

۴- فرکانس طبیعی دستگاههای SSA2 حداکثر تا ۵۰ هرتز صاف می باشد بنابراین می توان در تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط این دستگاه مقدار  $F_H$  را بدون تصحیحات دستگاهی تا ۵۰ هرتز انتخاب نمود اما با توجه

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

۱- لازم است برای از بین بردن اثر نشت در رکوردهای ثبت شده، عملیات Tapering بر روی داده ها صورت گیرد تا دقت محاسبات افزایش یابد.

۲- جابجایی خط مبنا باعث خطای پیروی بلند قابل توجهی در طیف دامنه فوریه شتاب می شود و خطای زیادی در تغییر مکان محاسبه شده از طریق انتگرال گیری از منحنی شتاب ایجاد می کند بنابراین لازم است این خطا به صورت کامل از داده های شتاب حذف گردد.



۹- رکوردهای ثبت شده در ساختگاههای خاکی در شرایط یکسان در فرکانس پایین تری تصحیح می گردند تا اثر شرایط ساختگاهی از بین نرود.

۱۰- پیشنهاد می گردد در شرایط مختلف با در نظر گرفتن اثر بزرگا و فاصله کانونی مقدار  $F_L$  (حد پایین باند فرکانسی تصحیح رکوردها) در محدوده های زیر انتخاب گردد:

الف- محدوده (0.15 - 0.20) هرتز برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SMA1 در ساختگاه خاکی

ب- محدوده (0.07 - 0.20) هرتز برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SSA2 در ساختگاه خاک

ج- محدوده (0.15 - 0.25) هرتز برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SMA1 در ساختگاه سنگ

د- محدوده (0.15 - 0.20) هرتز برای تصحیح رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه SSA2 در ساختگاه سنگ

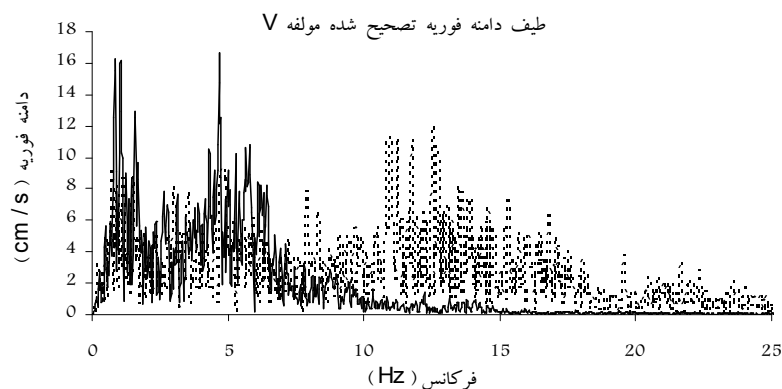
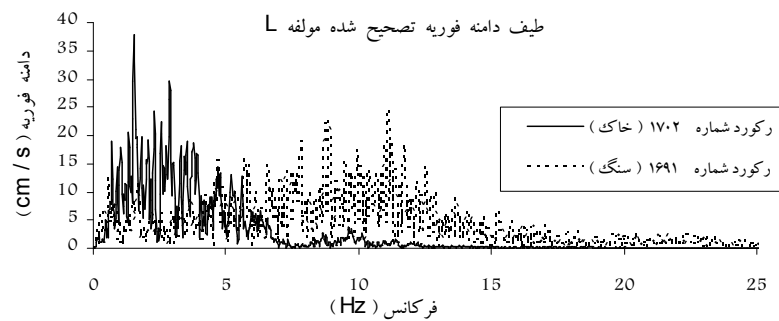
به اینکه تمام سازه های موجود حتی سازه های خاص، حداکثر دارای فرکانس طبیعی ۳۳ هرتز می باشند امواج با فرکانس بالاتر از ۳۳ هرتز عملاً کاربردی در تحلیل سازه ها ندارند، لذا پیشنهاد می گردد که برای تصحیح رکورد های ثبت شده توسط دستگاه SSA2 مقدار  $F_H$  بین ۳۰ تا ۳۳ هرتز انتخاب گردد.

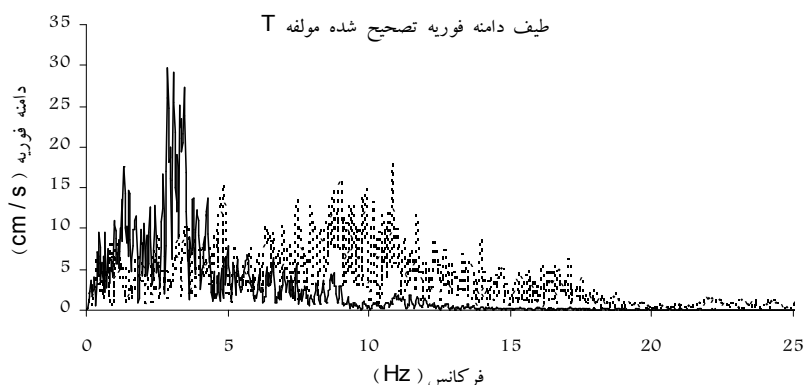
۵- در شرایط یکسان با افزایش فاصله کانونی مقدار  $F_L$  افزایش می یابد.

۶- در شرایط یکسان با افزایش بزرگا مقدار  $F_L$  کاهش پیدا می کند.

۷- با افزایش بزرگا مقدار  $f_c$  (فرکانس گوشه در مدل استاندارد  $\omega^2$ ) کاهش می یابد و پهنای باند فرکانسی افزایش پیدا می کند.

۸- طیف دامنه فوریه رکوردهای ثبت شده در ساختگاه سنگی در پریودهای کوتاه (فرکانس بالا) قوی تر است در حالیکه در رکورد های ثبت شده در ساختگاه خاک، طیف دامنه فوریه در فرکانس های پایین قوی تر است.





شکل ۹: مقایسه محتوای فرکانسی شتاب ثبت شده یک زمین لرزه در شرایط مختلف ساختگاهی.

<b>فهرست علائم</b>	
$M_0$ : گشتاور لرزه ای	$A(f)$ : تابع طیف شتاب در مدل $\omega^{-2}$
$M_S$ : بزرگای امواج سطحی	$a(t)$ : زمین
$N(f)$ : تبدیل فوریه noise	$\delta(t)$ : تابع واحد
$P$ : فاکتور کاهش تفکیک انرژی	$d(t)$ : زمین
$\rho$ : چگالی امواج برشی	$\Delta\sigma$ : پارامتر تنش یا افت تنش
$R$ : فاصله کانونی	$f$ : فرکانس
$R_l$ : ضریب الگوی تشعشع	$f_c$ : فرکانس گوشه
$R_{sn}$ : نسبت نرمال شده طیف signal به noise	$F_H$ : حد بالای مرحله عددی نمودن رکوردها
$S(f)$ : تبدیل فوریه signal	$F_L$ : حد پایین مرحله عددی نمودن رکوردها
$t_n$ : مدت زمان noise در رکورد زلزله	$f_n$ : فرکانس طبیعی مبدل یا ترانس دیوسر
$t_s$ : مدت زمان signal در رکورد زلزله	$F_S$ : ضریب تقویت در سطح آزاد
$V_S$ : سرعت موج برشی	$h(t)$ : تابع فیلتر در حوزه زمان (پاسخ سیستم به ازای تابع ورودی واحد)
$\omega$ : فرکانس دورانی	$H(\omega)$ : تابع فیلتر در حوزه فرکانس
$h(t)$	

## مراجع

- ۱- رمزی، ح. "داده های پایه شتاب نگاشت های شبکه شتاب نگاری کشور." مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۵۶، زمستان (۱۳۷۶).
- 2 - Converse, A. M. (1992). *BAP: Basic Strong-Motion Accelerogram Processing Software*, Open-File Report 92-196a, U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Denver, Colorado.
- 3 - Trifunac, M. D., Vdwadia, F. E. and Brady, A. G., (1973). *Analysis of Errors in Digitized Strong Motion Accelerograms*, Bulletin of the Seismological Society America, Vol. 63, PP. 157-187.
- ۴- مبینی پور، س. ا. "تهیه برنامه کامپیوتری برای پردازش همه جانبه داده های شتابنگاشت." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، تابستان (۱۳۷۰).
- 5 - Lee, V. W. and Trifunac, M. D., (1990). *Automatic Digitization and Processing of Accelerograms using PC*, University of Southern California, Report No. 90-02, PP. 1-115.

- 6 - Newmark, N. M. (1973). *An Exact Correction for Accelerometer Error in Dynamic Seismic Analysis*, Bulletin of the Seismological Society America, Vol. 59, PP. 705-715.
- 7 - Taheri, J. S. (1980). *A New Assessment of Errors from Digitization and Baseline Corrections of Strong Motion Accelerograms*, Bulletin of the Seismological Society America, Vol. 70, PP. 293-303.
- 8 - Trifunac, M. D. and Lee, V. W. (1979). *Automatic Digitization and Processing of Strong-Motion Accelerograms*, University of Southern California, Report No. 74-15 I,II.
- 9 - Sunder, S. S. and Conner, J. J. (1982). *A New Procedure for Processing Strong-Motion Earthquake Signals*, Bulletin of the Seismological Society America, Vol. 72, PP. 643-661.
- 10 - Erdik, M. and Kubin, J. (1981). "A procedure for the accelerogram processing." *International Research Conference on Engineering*, Skopje, Yugoslavia, PP. 123-132.
- 11- SWS, *Seismic Work Station Software Inc*, Pasadena, California, 1990.
- 12 - Trifunac, M. D. and Lee, V. W. (1973). "Routine computer processing of strong-motion accelerograms." *EERL 73-03*, Caltech, Pasadena, California.
- 13 - Zare, M., Bard, P. Y. and Ghafory-Ashtiany, M. (1999). "The Iranian Accelerometric data bank: a revision and data correction." *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 1, No. 1, PP. 1-22.
- 14 - Mahdavian, A. (2001). "Design response spectra for large dam in Iran." *International Commission of Large Dams (ICOLD)*, China.
- ۱۵- میرزایی علویچه، ح. و فرزندگان، ا. "مشخصات ایستگاههای شبکه شتابنگاری کشور." مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۸۰، چاپ اول، تابستان (۱۳۷۷).
- 16 - Zare, M., Bard, P. Y. and Ghafory-Ashtiany, M. (1999). "Site characterizations for the Iranian strong motion network." *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 2, PP. 101-123.
- 17 - Komakpanah, A., Hafezi Moghaddas, N. (2002). "Site effect classification in east-central of Iran." *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 1, PP. 37-46.
- 18 - Brune, J. N. (1970). "Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, PP. 4997-5009.
- 19 - Mahdavian, A. (1993). *A Study of the Characterization and Predictive Modeling of Strong Ground Motion during Earthquake around Hokkaido*, Ph.D. Thesis, Hokkaido University, Japan.