

شناسایی مشخصه و تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پل‌ها با استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی و روش جدید تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده

فرهاد دانشجو* (استاد)

حمیدرضا احمدی (دکتری)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

قادر مبتکر (کارشناس ارشد)

اداره خط و سازه‌های فنی، شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران

مهندسی عمران شریف
دوره ۲-۱۴۰۰، شماره ۲، ص. ۳۷-۴۸

در این تحقیق روش اصلاح‌شده‌ی تفاضل ماتریسی با استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی برای شناسایی آسیب در پایه‌ی پل‌ها و محل آن پیشنهاد شده است. برای تأیید روش پیشنهادی از مدل پل قطور به طول ۴۴۸ متر و برای پردازش سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی پل‌ها از توابع زمان-بسامد شامل طیف تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه، طیف تبدیل موجک، توزیع‌های ویگنر-ویل، چوی-ویلیامز، شبه ویگنر-ویل هموارشده، و تداخلی کاهش‌یافته استفاده شده است و تابع زمان-بسامد تداخلی کاهش‌یافته به‌منزله‌ی تابع مطلوب برای پردازش سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی پل‌ها شناسایی شده است. پلان‌های زمان-بسامد محاسبه و مشخصه‌های دینامیکی سیستم استخراج شده است. روش پیشنهادی براساس پردازش سیگنال‌های لرزه‌ی خروجی پایه‌ریزی شده است، و لذا از مزیت‌های این روش بی‌نیازی به تعریف مدل تحلیلی و اندازه‌گیری نیروی ورودی و همچنین عدم نیاز به تحریک اجباری هارمونیک پل پس از وقوع زلزله برای تشخیص آسیب لرزه‌ی است.

واژگان کلیدی: شناسایی مشخصه، تشخیص آسیب، توابع زمان-بسامد، پل، تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده، همبستگی، فاصله‌ی مربعی کمینه.

۱. مقدمه

در بررسی و ارزیابی وضعیت و سلامتی سازه‌ی پل‌ها از روش‌های مشاهده‌ی، آزمایش‌های غیرمخرب محلی، و روش‌های استاتیکی بر مبنای اندازه‌گیری کرنش یا جابجایی تحت بارهای استاتیکی مشخص و روش‌های ارتعاش-پایه استفاده می‌شود. روش‌های ارتعاش-پایه سلامت سنجی بر مبنای تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های ارتعاشی و دینامیکی پس از بروز آسیب می‌باشند. در طول دو دهه‌ی گذشته، تحقیقات مفصلی پیرامون روش‌های ارتعاش-پایه انجام شده است، که منجر به پیدایش فنون، روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی شده است.^[۱،۲] این روش‌ها را می‌توان به روش‌های مودی و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد.

در روش‌های سیگنالی در حوزه‌ی زمان و در حوزه‌ی بسامد باید از سیگنال‌های مانا و ترجیحاً خطی استفاده شود، ولی پل‌ها دارای پاسخ غیرمانا هستند و پاسخ دینامیکی آن‌ها تحت تأثیر زلزله معمولاً متأثر از رفتار غیرخطی‌اند. لذا در این تحقیق برای اولین بار استفاده از روش سیگنالی حوزه‌ی زمان-بسامد بر مبنای توابع زمان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۴/۱۲، پذیرش ۱۳۹۰/۷/۱۳.

danesh_fa@modares.ac.ir
hamid.ahmadi@modares.ac.ir
ha_mobtaker51@yahoo.com

-بسامد مربعی برای استخراج مشخصه و شناسایی پل‌ها پیشنهاد می‌شود. تحلیل زمان-بسامد در رشته‌های مختلفی از جمله رادار، تصویربرداری، مهندسی پزشکی، ژئوفیزیک، مکانیک کوآتوم، پردازش سیگنال، مکانیک، و الکترونیک کاربرد دارد.^[۳] ولی تاکنون گزارشی درخصوص استفاده از این توابع برای استخراج مشخصه و شناسایی سیستم سازه‌ی پل‌ها منتشر نشده است.

برای این منظور از مدل پل راه‌آهن قطور که در مسیر راه‌آهن ایران-ترکیه و در نزدیکی شهر خوی قرار گرفته است، استفاده می‌شود و سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی این پل تحت تأثیر ۳ زلزله‌ی مختلف دورازگسل با استفاده از ۶ تابع زمان-بسامد مربعی مختلف پردازش می‌شود و تابع بهینه برای شناسایی سیستم مشخص می‌شود. سپس با استفاده از تابع بهینه و ۳ روش مختلف، نحوه‌ی تعیین محل آسیب ارزیابی می‌شود.

۲. روش‌های تحلیل زمان-بسامد

در روش‌های سیگنالی، تغییرات در مشخصه‌ی سازه مستقیماً از تاریخچه‌های زمانی

اندازه‌گیری شده به دست می‌آیند. روش‌های سیگنالی به ۳ دسته‌ی روش‌های حوزه‌ی: زمان، بسامد، و زمان-بسامد تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی بسامد معمولاً باید از سیگنال‌های مانا و خطی استفاده شود. مثلاً مدل خودرگرسیون (AR) را می‌توان برای سیگنال‌های مانا به‌کار برد،^[۴] و چنانچه برای پردازش سیگنال‌های غیرمانا استفاده شود، تخمین پارامترهای خودرگرسیونی مشکل می‌شود.^[۵] مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک (ARMA)^۱ غالباً برای پردازش سیگنال‌های مانا استفاده می‌شود.^[۵-۷]

چنانچه از این روش برای پردازش سیگنال‌های غیرمانا استفاده شود، زمان محاسبات افزایش می‌یابد.^[۷] علاوه‌بر آن، مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک فقط سیگنال‌های تعدیل‌یافته با بسامد و دامنه‌ی خطی را به‌صورت رضایت‌بخش پردازش می‌کند.^[۵] اساس غالب روش‌های حوزه‌ی بسامد مانند توابع پاسخ بسامد (FRFs) و چگالی طیفی توان (PSD) براساس تبدیل فوریه است. تبدیل فوریه برای محاسبه‌ی محتوای بسامدی سیگنال به‌کار می‌رود، اما نمی‌تواند زمان رویداد مؤلفه‌های بسامدی را مشخص کند.^[۸-۱۲] به‌عبارت دیگر، تبدیل فوریه برای پردازش سیگنال‌هایی که محتوای بسامدی آن‌ها با زمان تغییر نمی‌کند، مناسب است. اما چنانچه محتوای بسامدی سیگنال با زمان تغییر کند، تبدیل فوریه نمی‌تواند اطلاعات کاملی از رفتار سیستم ارائه کند.^[۱۱] با استفاده از تبدیل فوریه، محتوای بسامدی سیگنال به‌صورت مجموعه‌ی از توابع سینوسی وزن‌دار مشخص می‌شود؛ اما اطلاعات با اهمیت دیگری نظیر تغییر در ویژگی سیگنال شناسایی نمی‌شود. با توجه به این محدودیت‌ها به‌تازگی روش‌های دیگری که سیگنال‌ها را به‌طور مشترک و توأمان در حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی بسامد پردازش می‌کنند، پیشنهاد شده است.^[۱۳]

اصول اولیه‌ی توابع زمان-بسامد (TFR)^۲ سال‌ها پیش بنیان نهاده شده است، اما تاکنون استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی در استخراج مشخصه و شناسایی سیستم پل‌ها و به‌ویژه مشخص‌کردن آسیب در آن‌ها گزارش نشده است. در این تحقیق استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی برای استخراج مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ی پل‌ها پیشنهاد می‌شود. معمولاً سازه‌ها در مهندسی عمران دارای پاسخ‌های غیرمانا هستند و پاسخ‌های لرزه‌یی، متأثر از رفتار غیرخطی آن‌هاست.^[۱۴] مزیت تحلیل‌های زمان-بسامد این است که این تحلیل‌ها می‌توانند کلیه‌ی سیگنال‌های مانا، غیرمانا، و غیرخطی را پردازش کنند.^[۱۵] غالباً شناسایی مشخصه‌های سیگنال با مشاهده‌ی نمودار حوزه‌ی زمان مشکل است، ولی با استفاده از تحلیل‌های زمان-بسامد، به‌نمودار نمایش سیگنال بعد دیگری اضافه می‌شود و محتوای بسامدی نسبت به زمان (با برعکس) رسم می‌شود.

در این تحقیق استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی شامل طیف تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه^۳، طیف تبدیل موجک^۴، توزیع ویگنر-ویل (WVD)^۵، توزیع چوی-ویلیمز (CWD)^۶، توزیع تداخلی کاهش‌یافته (RID)^۷، و تابع شبه ویگنر-ویل هموارشده (SPWVD)^۸ ارزیابی می‌شوند.

به‌طورکلی روش‌های تئوری سلامت‌سنجی سیگنالی شامل دو فرایند اصلی: الف) استخراج مشخصه، و ب) شناسایی الگو (خصیصه) هستند.^[۱۶] روش‌های تحلیل زمان-بسامد یک جمله‌ی زمانی را به‌صورت دو بعدی که شامل محتوای بسامدی با توجه به زمان است، بیان می‌کنند. یک تابع زمان-بسامد با بیان محتوای بسامدی با توجه به تغییرات زمان، امکان تحلیل بهینه‌ی سیگنال‌ها را فراهم می‌سازد. توابع زمان-بسامد به ۳ دسته‌ی خطی، مربعی، و غیرخطی طبقه‌بندی می‌شوند.^[۱۷] با استفاده از تحلیل زمان-بسامد این امکان فراهم می‌شود که انرژی

سیگنال در حوزه‌ی زمان و در حوزه‌ی بسامد به‌صورت هم‌زمان قابل رؤیت باشد.

۳. تعریف مدل تحلیلی پل قطور

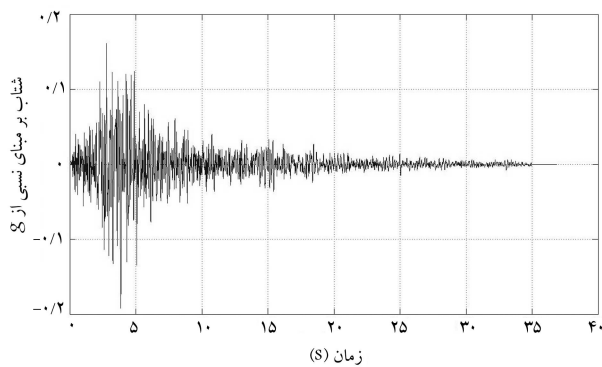
پل راه‌آهن قطور در شمال غرب ایران بر روی رودخانه‌ی قطور ساخته شده و در منطقه‌ی با طول جغرافیایی $30^{\circ}46'44''$ و عرض جغرافیایی $30^{\circ}29'38''$ در محدوده‌ی استان آذربایجان غربی قرار گرفته است. طول این پل ۴۴۸ متر و ارتفاع آن از سطح رودخانه ۱۱۸٫۲۸ متر است. یکی از دهانه‌ها به‌صورت خرپای فلزی با یال پایین قوسی و طول ۲۲۳ متر است. با احتساب این دهانه، پل قطور دارای ۹ دهانه است که بقیه‌ی دهانه‌ها روی پایه و یا کوله‌های بتن مسلح ساخته شده‌اند. عرشه‌ی پل نیز فلزی است. در شکل ۱، نمای جانبی این پل نشان داده شده است. اداره‌ی خط و سازه‌های فنی شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، فولاد و بتن به‌کاررفته در این پل را آزمایش کرده‌اند.^[۲۱] ۱۰ نمونه‌ی بتن از پایه‌ها و کوله‌ها، ۱۲ نمونه‌ی فولاد از عرشه و دهانه‌ی قوسی، و ۳ نمونه نیز از میلگرد به‌کاررفته در پایه‌ی پل برداشته و آزمایش شده‌اند.^[۲۲] با استفاده از نتایج آزمایش‌های: مقاومت فشاری بتن پل قطور، مقاومت کششی فولاد این پل، و مقاومت کششی میلگردهای آن، مقادیر متوسط مقاومت فشاری بتن، تنش جاری‌شدن و تنش نهایی فولاد استفاده‌شده در پل و مقاومت کششی میلگردهای به‌کاررفته در آن، مطابق جدول ۱ محاسبه شده‌اند. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، مدل پل در نسخه‌ی ۱۴ نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ تهیه و نمایی از آن، در شکل ۲ ارائه شده است. ستون‌ها، خرپا، و عرشه‌ی پل با المان قاب، و تکیه‌گاه‌های انتهایی قوس مشترک با پایه‌های فولادی، با المان solid مدل‌سازی شده‌اند. مدل این پل دارای ۱۶۸۶ گره، ۲۳۶۲ المان قاب، و ۵۰۲ المان solid است. مدل موردنظر با در نظر گرفتن بارهای ثقلی و رکوردهای زلزله تحلیل شده است.



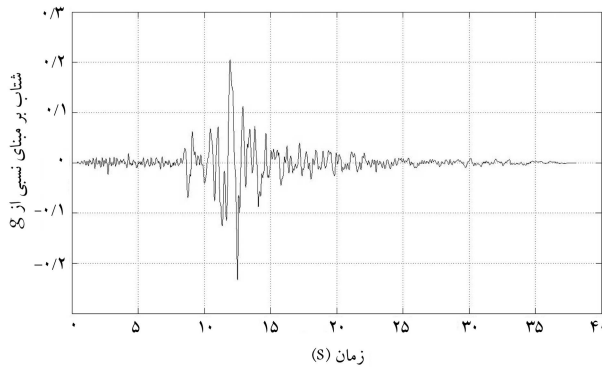
شکل ۱. نمای پل قطور.^[۲۳]

جدول ۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی بتن پل قطور.

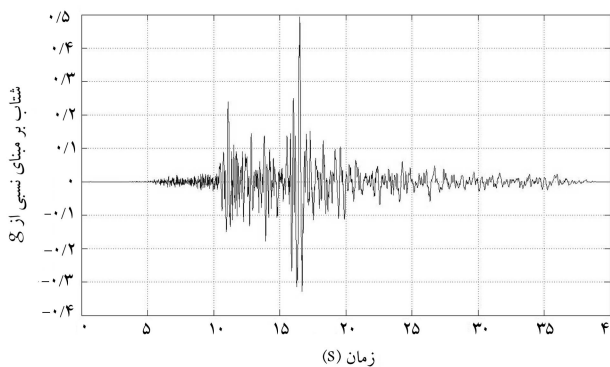
ردیف	مصالح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت جاری (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)
۱	بتن	۲۶٫۲	-	-
۲	فولاد	-	۲۸۸٫۵	۴۳۴٫۸
۳	میلگرد	-	۳۸۶٫۳	۵۹۷٫۸



شکل ۳. تاریخچه‌ی زمانی رکورد سن فرناندو.



شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی رکورد لوماپریتا.

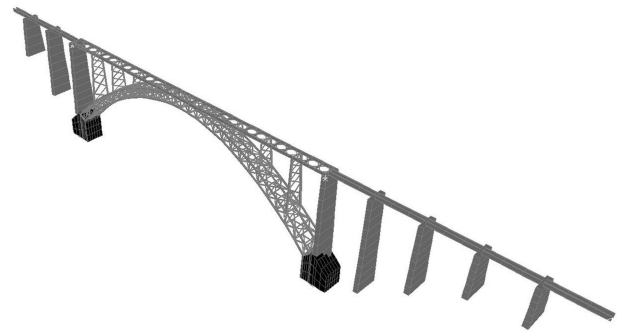


شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی رکورد نورث ریج.

سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی به دست آمده، با استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی پردازش و پلان زمان-بسامد هر یک رسم می‌شود. سپس با مقایسه‌ی این پلان‌ها تابع بهینه‌شناسایی و از آن برای تشخیص آسیب استفاده می‌شود. برای ارزیابی توابع زمان-بسامد، از سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی پل که در قسمت فوقانی پایه‌ی سوم ثبت شده‌اند، استفاده شده است. پردازش سیگنال‌ها در نرم‌افزار Matlab انجام شده است. این تذکر لازم است که تاکنون در ادبیات فنی برای شناسایی تابع زمان-بسامد مربعی بهینه برای پردازش سیگنال‌های پاسخ پل‌ها مطالعاتی انجام نشده و لذا در این تحقیق بررسی‌هایی برای شناسایی تابع بهینه انجام شده است.

۱.۴. تحلیل فوریه‌ی زمان کوتاه (STFT)^۹

روش تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه (STFT) با استفاده از یک پنجره‌ی زمانی ثابت $h(u-t)$ و ضرب آن در یک سیگنال مشخص و در نهایت انجام تبدیل فوریه،



شکل ۲. مدل تحلیلی پل قطور.

۴. شناسایی سیستم پل و تشخیص محل آسیب

در زمان وقوع زلزله عوامل متعددی می‌تواند باعث ایجاد آسیب در پایه‌ی پل‌ها شود. مثلاً، برای پایه‌های بتنی بلند، مقطع در اثر خوردشدن بتن در فشار و یا جاری شدن آرماتورها در کشش می‌تواند دچار شکست خمشی شود و برای پایه‌های کوتاه، علاوه بر این موارد، شکست برشی در هسته‌ی مرکزی مقطع بتنی، یا عمل شاخه‌یی شدن که منجر به تغییرشکل خمیری برشی در آرماتور شود، و یا لغزش در محل ترک‌ها نیز می‌تواند باعث شکست خمشی-برشی مقطع شود. آغاز جاری شدن در مقطع باعث کاهش سختی در مقطع نزدیک محل آسیب می‌شود. در مطالعات انجام شده توسط اداره خط و سازه‌های فنی راه آهن پیش‌بینی شده است که پایه‌ی سوم پل قطور در برابر زلزله آسیب‌پذیر است.^[۲۳] لذا در این تحقیق، آسیب به صورت کاهش سختی در پایه‌ی سوم معادل‌سازی شده و با کاهش ممان اینرسی مقطع مدل‌سازی شده است. به منظور بررسی ۶ تابع زمان-بسامد، مربعی در تعیین آسیب و تشخیص محل آن، در پایه‌ی سوم مدل پل قطور آسیب ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که آسیب ایجاد شده در مقطع میانی پایه، سبب کاهش حدود ۳۰٪ سختی آن می‌شود. رکوردهای تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌های سن فرناندو، لوماپریتا، و نورث ریج به مدل تحلیلی سالم و آسیب‌دیده‌ی پل قطور اعمال و پاسخ‌ها ثبت می‌شوند. رکوردها دور از گسل هستند و خاک محل ثبت آن‌ها متناسب با خاک محل پل قطور است. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۲ و شکل‌های ۳ الی ۵ نشان داده شده است.

برای بررسی دقیق الگوریتم و به منظور اجتناب از اعمال اثر مدل‌های رفتاری غیرخطی در نتایج، مدل سالم و آسیب‌دیده‌ی پل قطور تحت تأثیر زلزله‌های انتخابی تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی خطی می‌شوند و سیگنال‌های پاسخ در نقاط وسط و بالای ستون‌های بتنی ثبت می‌شوند. در عمل برای یک پل ساخته شده و در حال استفاده، با نصب حساسه‌هایی در بالا و وسط هر ستون می‌توان سیگنال‌های خروجی پاسخ لرزه‌ی سازه را در نقاطی که حساسه نصب شده است به صورت تاریخچه‌ی زمانی در زمان وقوع زلزله ثبت و برداشت کرد.

جدول ۲. رکوردهای اعمال شده به مدل پل قطور.

ردیف	نام رکورد	زمان رویداد	ایستگاه ثبت	PGA (g)
۱	سن فرناندو	۱۹۷۱	LAKE HUGHES	۰/۱۹۲
۲	لوماپریتا	۱۹۸۹	GOLDEN GATE BRIDGE	۰/۲۳۳
۳	نورث ریج	۱۹۹۴	LA-UNIV	۰/۴۹۳

ضرایب بسامدی سیگنال مربوط را به دست می‌دهد (رابطه‌ی ۱). [۲۵، ۲۴، ۳]

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-i\omega t} du \quad (1)$$

استفاده از توابع پایه‌ی سینوسی در این روش، تحلیل نقاط تیز در سیگنال‌های غیرمانا را با مشکل مواجه می‌کند که علت این موضوع استفاده از پنجره‌ی زمانی ثابت در کل طول سیگنال است. طیف تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه که به آن توزیع طیف نگاره^۱ نیز گویند، به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود. [۹]

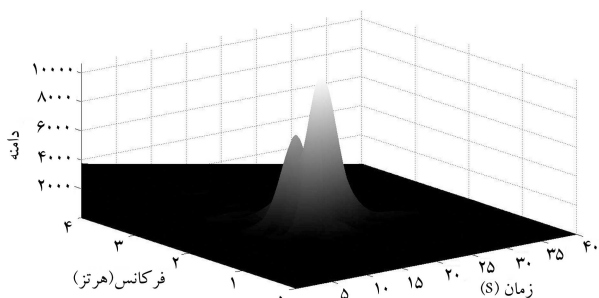
$$\text{SP}(t, \omega) = \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-i\omega t} du \right)^2 \quad (2)$$

در این تحقیق از پنجره‌ی Hanning برای تخمین طیفی در توابع زمان - بسامد استفاده شده است. رابطه‌ی تابع پنجره‌ی Hanning به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$\text{Hann}(\nu) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{2\pi\nu}{\tau}\right) \quad (3)$$

پلان زمان - بسامد طیف تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه به صورت سه بعدی در شکل‌های ۶ الی ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ الی ۸ دیده می‌شود در پلان‌های زمان - بسامد حاصل از توزیع طیف نگاره، تا حدودی پخش‌شدگی دیده می‌شود. براساس پلان زمان - بسامد حاصله از توزیع طیف نگاره، پیش از شدت‌گرفتن دامنه‌ی سیگنال در حوزه‌ی زمان، دامنه در پلان زمان - بسامد رو به افزایش است.



شکل ۸. پلان زمان - بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع طیف نگاره.

۲.۴. تبدیل موجک^{۱۱}

تبدیل موجک بر پایه‌ی تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه استوار است. در این تبدیل به جای استفاده از توابع سینوسی و کسینوسی، سیگنال بر روی دسته‌ی دیگری از توابع متعامد تصویر می‌شود. این توابع به توابع مادر^{۱۲} معروف هستند. توابع مادر امکان تحلیل سیگنال‌های غیرپریودیک را فراهم می‌کنند. تبدیل موجک مانند تبدیل فوریه معکوس پذیر است. در تبدیل موجک با استفاده از یک سری مراحل انتقال و اتساع توابع موجک مادر در طول مدت زمان سیگنال، ضرایب بسامدی مجزا به دست می‌آید. پنجره‌ی زمان - بسامد در تبدیل موجک به ضرایب اتساع موجک بستگی دارد. پنجره‌ی زمانی مورداستفاده در بسامدهای پایین بسیار بزرگ‌تر از بسامدهای بالاست. این قابلیت به دلیل پنجره‌های زمانی کوچک و نزدیک به هم سبب ایجاد وضوح خوب زمانی در نقاط تیز با بسامد بالا شده است که با کاهش بسامد از وضوح کاسته می‌شود.

تبدیل موجک به صورت ضرب داخلی سیگنال $x(t)$ در خانواده‌ی از توابع پایه تعریف می‌شود. خانواده‌ی موجک‌ها شامل فرزندانی هستند که از تابع مادر $(\psi(t))$ به وجود می‌آیند (رابطه‌ی ۴). [۲۶، ۲۴، ۳]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0, \quad b \in R \quad (4)$$

که در آن، a پارامتر مقیاس است که عرض پایه‌ی موجک را تعیین می‌کند، و b پارامتری است که برای محلی‌سازی و انتقال تابع موجک به کار می‌رود. تفاوت‌هایی که در توابع مختلف موجک حاصل از یک خانواده به وجود می‌آید، به علت اختلافات در ضرایب a و b است. چنانچه a کوچک باشد، مؤلفه‌های با بسامد بالای سیگنال پردازش و هنگامی که a بزرگ باشد، مؤلفه‌های با بسامد پایین سیگنال پردازش می‌شوند. [۲۶]

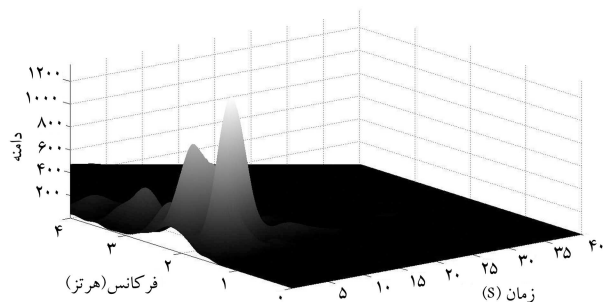
تبدیل موجک پیوسته به صورت رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود: [۲۶، ۲۴، ۳]

$$\text{CWT}(t, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(u)\psi\left(\frac{u-b}{a}\right) du \quad (5)$$

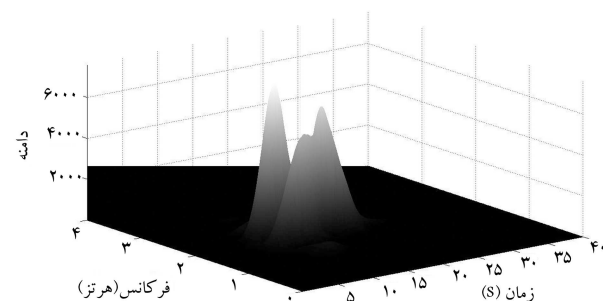
در این رابطه، $\psi(t)$ تابع مادر موجک و $x(t)$ سیگنال موردنظر است. همچنین علامت ستاره، نشان‌دهنده‌ی مزدوج مختلط تابع مادر موجک است. در این تحقیق از تابع مادر مورلت^{۱۳} که به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود، استفاده شده است.

$$\psi(t) = \cos(\Delta t)e^{-t^2/2} \quad (6)$$

به طیف تبدیل موجک، توزیع Scalogram گفته می‌شود. به عبارت دیگر، توزیع Scalogram دامنه‌ی مربعی تبدیل موجک است و به شکل رابطه‌ی ۷ تعریف



شکل ۶. پلان زمان - بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن فرناندو با استفاده از توزیع طیف نگاره.



شکل ۷. پلان زمان - بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع طیف نگاره.

برای یک سیگنال تحلیلی $x(t)$ ، توزیع ویگنر-ویل به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود: [۲۰]

$$WVD_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (۸)$$

سیگنال تحلیلی $x(t)$ نیز به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$x(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (۹)$$

در رابطه‌ی ۹، $s(t)$ سیگنال حقیقی است و $H(t)$ نشان‌دهنده‌ی تبدیل هیلبرت^{۱۴} است. تبدیل هیلبرت به صورت رابطه‌ی ۱۰ تعریف می‌شود: [۲۵، ۲۳]

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (۱۰)$$

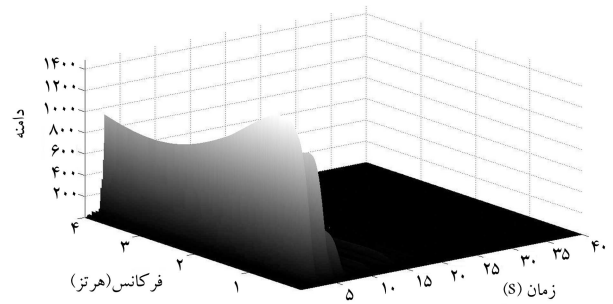
در رابطه‌ی ۱۰، PV نشان‌دهنده‌ی مقدار اصل کوشی^{۱۵} است. ویگنر در سال ۱۹۳۲ این توزیع را پیشنهاد کرد. توزیع ویگنر-ویل در حالت کلی یک تابع مقدار حقیقی است که شرایط مرزی را ارضاء می‌کند و در پردازش سیگنال‌ها، وضوح ایده‌آلی را در زمان و بسامد به‌وجود می‌آورد. [۱۳] ترم‌های تداخلی و مقادیر منفی مهم‌ترین موانع استفاده از توزیع ویگنر-ویل به‌منزله‌ی یک ابزار شناسایی برای کلیه‌ی سیگنال‌هاست. تابع $x(t)$ دو بار و به‌صورت‌های x و x^* در انتگرال ظاهر می‌شوند که توزیع دو خطی یا درجه‌ی دوم را ممکن می‌سازند. در توزیع ویگنر-ویل تداخل ترم عرضی از ترم مربعی $x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)$ و هنگامی‌که مؤلفه‌های سیگنالی متعددی در سیگنال وجود دارد، تداخل نوسانی زیادی تولید می‌شود. با این وجود ارضاء شرایط مرزی و بسیاری خواص مطلوب دیگر موجب گستردگی استفاده از توزیع ویگنر-ویل شده است. پلان‌های زمان-بسامد محاسبه‌شده با توزیع ویگنر-ویل در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ قابل مشاهده است. همان‌طورکه در پلان‌های زمان-بسامد به‌دست‌آمده از توزیع ویگنر-ویل مشاهده می‌شود، وجود ترم‌های تداخلی فراوان کاملاً مشخص است. این موضوع استخراج مشخصات دینامیکی از سیگنال‌ها را مشکل کرده است.

۴.۴. توزیع چوی-ویلیامز (CWD)

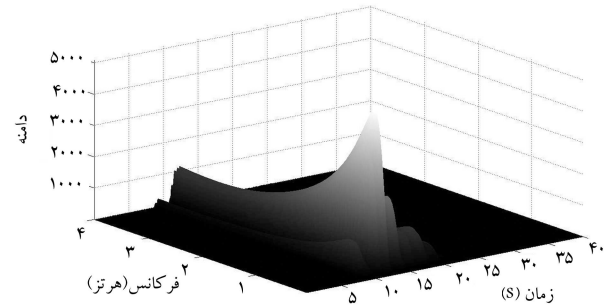
توزیع چوی-ویلیامز به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ نشان داده می‌شود: [۱۹، ۱۳]

$$CW(t, \omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{\alpha}{16\pi\tau^2}} e^{\left(\frac{-v\tau\alpha}{16\tau^2}\right)} x\left(t + v + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + v - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} dv d\tau \quad (۱۱)$$

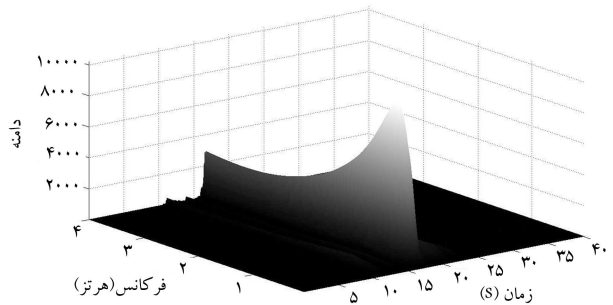
هنگامی‌که α به سمت صفر میل می‌کند، توزیع چوی-ویلیامز به‌صورت توزیع ویگنر-ویل تغییر می‌کند. پلان‌های زمان-بسامد توزیع چوی-ویلیامز در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ رسم شده است. مطابق با پلان‌های زمان-بسامد محاسبه‌شده، توزیع چوی-ویلیامز به‌ویژه در مقایسه با توزیع Scalogram و توزیع ویگنر-ویل دارای عملکرد بهتری است.



شکل ۹. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن‌فرناندو با استفاده از توزیع طیف نگاره.



شکل ۱۰. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع طیف نگاره.



شکل ۱۱. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع طیف نگاره.

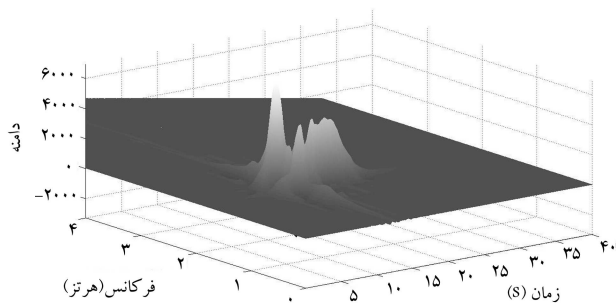
می‌شود: [۹]

$$\text{Scalogram}(t, a) = \frac{1}{a} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{u-b}{a}\right) du \right)^2 \quad (۷)$$

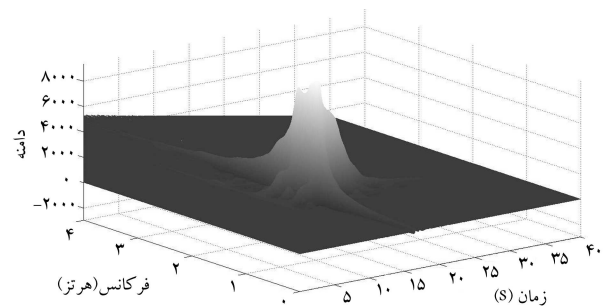
در شکل‌های ۹ تا ۱۱، پلان‌های زمان-بسامد توزیع Scalogram رسم شده است. چنان‌که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ دیده می‌شود، پلان زمان-بسامد حاصل از توزیع Scalogram عملکرد بسیار ضعیفی را نشان داده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، توزیع Scalogram با دامنه‌ی که در طول محور بسامد گسترده شده است، تشخیص و تشریح مشخصات دینامیکی پل را عملاً غیرممکن ساخته است.

۳.۴. توزیع ویگنر-ویل (WVD)

توزیع ویگنر-ویل پایه‌ی‌ترین روش در روش‌های زمان-بسامد محسوب می‌شود. روش‌های زمان-بسامد دیگر (مانند Spectrogram یا Scalogram) را می‌توان از توزیع ویگنر-ویل با انتخاب مناسب فاکتورهای هموارسازی به‌دست آورد. [۲۰، ۲۳]



شکل ۱۶. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع CWD.



شکل ۱۷. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع CWD.

۵.۴. توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده (SPWVD)

هدف استفاده از توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده، کاهش تجلی ترم‌های تداخلی است. معادله‌ی این توزیع به صورت رابطه‌ی ۱۲ است: [۲۵۹]

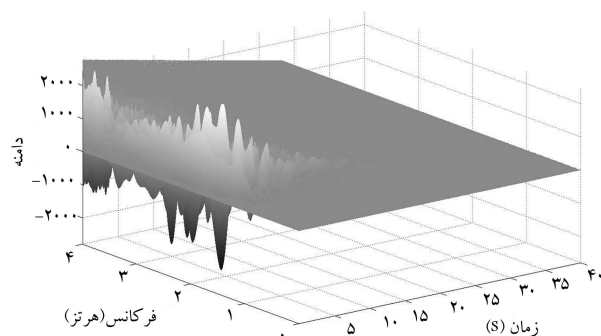
$$SPWVD_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} g(u-t)x\left(u + \frac{\tau}{\gamma}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{\gamma}\right) du e^{-i\omega t} d\tau \quad (12)$$

واژه‌ی شبه در اینجا به تابع هموارکننده‌ی $h(\tau)$ ارجاع می‌شود. در واقع این تابع یک پنجره‌ی بسامد-هموارکننده در حوزه‌ی زمان است. علاوه بر آن هموارشدگی به تابع زمان-هموارکننده‌ی $g(t)$ ارجاع می‌شود. پلان‌های زمان-بسامد محاسبه شده با استفاده از توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ نمایش داده شده‌اند.

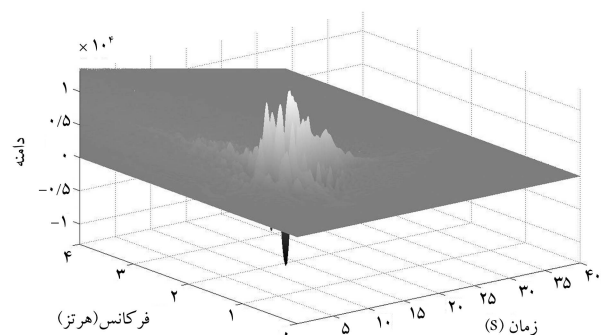
توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده دارای ترم‌های تداخلی کمتری از ۴ توزیع پیشین است، اما دارای مقداری پخش‌شدگی در طول محور زمان است. البته این موضوع نسبت به توزیع طیف نگاره بهبود یافته است.

۶.۴. توزیع تداخلی کاهش یافته (RID)

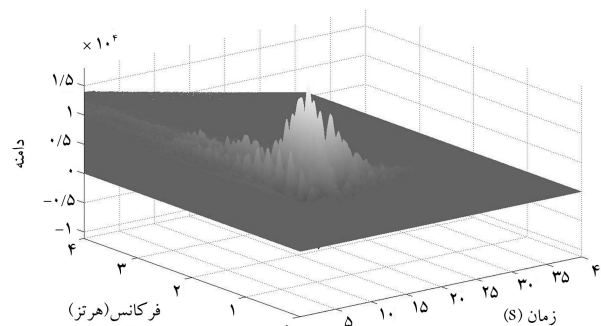
توزیع تداخلی کاهش یافته نسبت به توزیع ویگنر-ویل دارای مزایایی است. توزیع تداخلی کاهش یافته و توزیع ویگنر-ویل هر دو در کلاس کوهن قرار دارند. اما روش‌های تداخلی کاهش یافته برای سیگنال‌های گذرا و غیرمانا مناسب‌تر هستند. چرا که تداخل مربعی که بیان توزیع ویگنر-ویل را پیچیده می‌کند، در توزیع RID کاهش می‌یابد. توزیع تداخلی کاهش یافته‌ی $(RID(t, \omega))$ با هسته‌ی $R_x(t, \tau)$



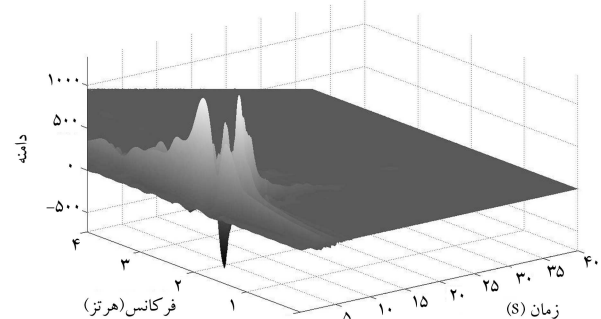
شکل ۱۲. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن فرناندو با استفاده از توزیع WVD.



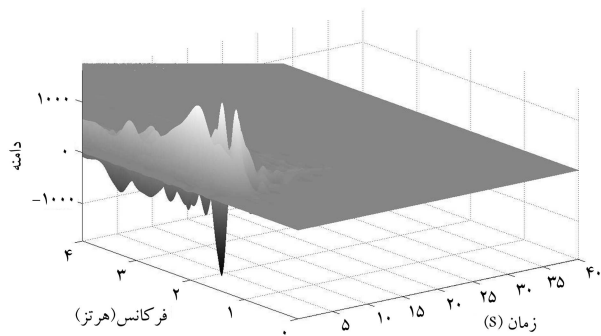
شکل ۱۳. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع WVD.



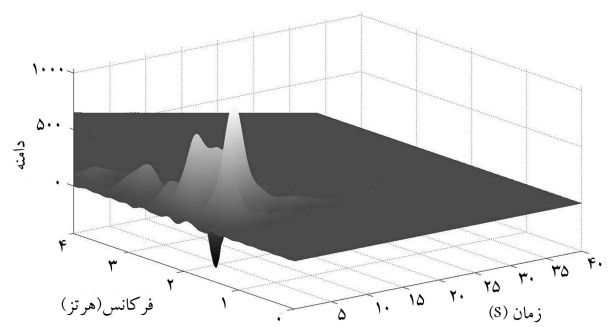
شکل ۱۴. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع WVD.



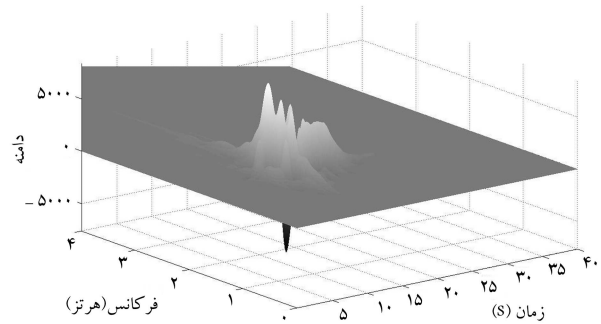
شکل ۱۵. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن فرناندو با استفاده از توزیع CWD.



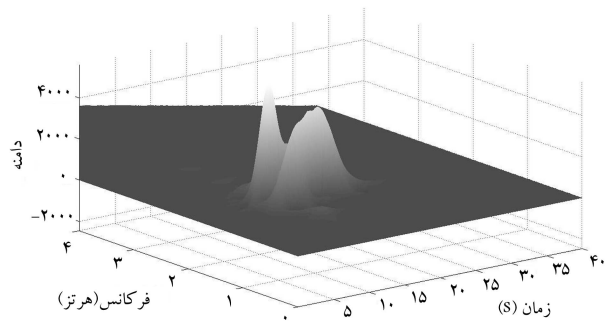
شکل ۲۱. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن فرناندو با استفاده از توزیع RID.



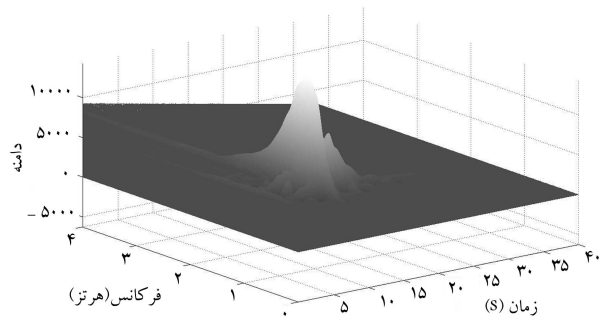
شکل ۱۸. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی سن فرناندو با استفاده از توزیع SPWV.



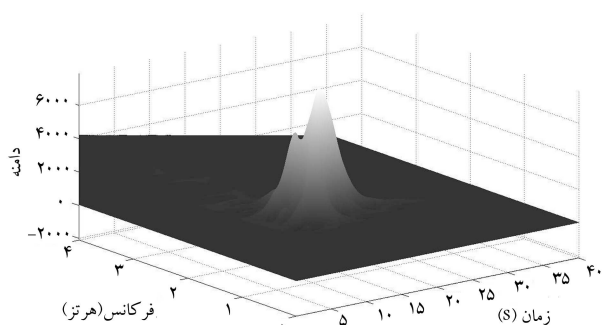
شکل ۲۲. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع RID.



شکل ۱۹. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی لوماپریتا با استفاده از توزیع SPWV.



شکل ۲۳. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع RID.



شکل ۲۰. پلان زمان-بسامد پاسخ پل قطور تحت تأثیر زلزله‌ی نورث ریج با استفاده از توزیع SPWV.

۷.۴. انتخاب تابع زمان-بسامد مطلوب

نحوه‌ی عملکرد هر یک از توزیع‌های زمان-بسامد مربعی استفاده‌شده برای پردازش پاسخ لرزه‌یی پایه‌ی بتنی پل قطور در پلان‌های زمان-بسامد نشان داده شده است. از نمودار دو بعدی طیف چگالی و طیف سه بعدی نمودار زمان-بسامد، بازه‌ی بسامدی که در آن محدوده‌ی مقدار طیفی از ۵٪ بیشینه‌ی طیف چگالی بیشتر باشد، مشخص می‌شود. همچنین از نمودار پاسخ سازه در بازه‌ی زمان و طیف سه بعدی نمودار زمان-بسامد، زمان بیشینه‌ی دامنه‌ها مشخص می‌شوند. دو بازه‌ی بسامد مشخص شده و زمان‌های بیشینه‌ی مشخص شده با هم مقایسه می‌شوند. هر تابعی که بیشترین تطابق را در دو بعد زمان و بسامد نشان دهد، به منزله‌ی تابع مطلوب شناسایی می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع Scalogram در طول محور بسامد گسترش

برای سیگنال تحلیلی $x(t)$ به صورت رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ تعریف می‌شود: [۱۳،۲]

$$RID(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) R_x(t, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (13)$$

$$R_x(t, \tau) = \int_{-|t|}^{|t|} \frac{g(\nu)}{|\tau|} \left(1 + \cos \frac{2\pi\nu}{\tau} \right) x \left(t + \nu + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left(t + \nu - \frac{\tau}{2} \right) d\nu \quad (14)$$

در این فرمولاسیون، $h(\tau)$ یک پنجره‌ی زمان هموارکننده، و $g(\nu)$ یک پنجره‌ی بسامد هموارکننده است. پلان‌های زمان-بسامد محاسبه‌شده با استفاده از توزیع تداخلی کاهش یافته را می‌توان در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳ مشاهده کرد.

یافته و عملکرد بسیار ضعیفی را نمایش داده است. توزیع ویگنر-ویل ترم‌های تداخلی فراوانی را به اشتباه تولید کرده است. مطابق با پلان‌های زمان-بسامد محاسبه‌شده با استفاده از توزیع ویگنر-ویل انرژی سیگنال علاوه بر بسامدهای صحیح، در بسامدهای دیگری نیز نمایش داده شده است، که براساس چگالی طیفی انرژی، سیگنال در آن بسامدها دارای تمرکز انرژی نیست. پلان زمان-بسامد محاسبه‌شده توسط توزیع طیف نگاره دارای پخش‌شدگی به‌ویژه در طول محور زمان است. به عبارت دیگر، هنگامی که پلان زمان-بسامد به دست آمده با حوزه‌ی زمان یا حوزه‌ی بسامد مقایسه شود، مشاهده می‌شود که پیش از شدت‌گرفتن دامنه‌ی سیگنال در حوزه‌ی زمان یا بسامد، دامنه‌ی سیگنال در حوزه‌ی زمان-بسامد رو به افزایش است. توزیع چوی-ویلیامز با وجود اینکه در مقایسه با توزیع طیف نگاره دارای پخش‌شدگی کمتری است، در مقایسه با توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده و توزیع تداخلی کاهش‌یافته، ترم‌های تداخلی بیشتری تولید کرده است. پلان زمان-بسامد به دست آمده از توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده مشابه با پلان زمان-بسامد حاصل از توزیع طیف نگاره است، با این تفاوت که مقدار پخش‌شدگی کاهش یافته است. در مقایسه با توزیع چوی-ویلیامز، پلان زمان-بسامد محاسبه‌شده با توزیع شبه ویگنر-ویل هموارشده ترم‌های تداخلی کمتری را تولید کرده است. با دقت در پلان‌های زمان-بسامد به دست آمده و تطابق ترم‌های اصلی با سیگنال پاسخ پایه‌ی پل و تبدیل فوری آن، مشخص می‌شود که توزیع تداخلی کاهش‌یافته به‌ویژه در نمایش خاصیت لحظه‌ی سیگنال عملکرد بهتری از خود ارائه کرده است، لذا در ادامه‌ی تحقیق از این توزیع برای پردازش سیگنال‌های پاسخ پایه‌های بتنی پل قطور استفاده خواهد شد.

۵. تشخیص آسیب

به کمک تحلیل‌های زمان-بسامد می‌توان انرژی سیگنال را در حوزه‌ی بسامد و حوزه‌ی زمان به‌طور هم‌زمان مشاهده کرد. آسیب، رابطه‌ی مستقیم با توازن انرژی در سازه دارد. بنابراین چنانچه توزیع انرژی یک سیگنال در حوزه‌ی بسامد و حوزه‌ی زمان به صورت هم‌زمان مقصور باشد، می‌توان این توزیع را با شدت، محل، و زمان رویداد آسیب هم‌بسته کرد.

برای یک توزیع انرژی زمان-بسامد $P(t, \omega)$ ، انرژی لحظه‌ی $|x(t)|^2$ و طیف چگالی انرژی $|S(\omega)|^2$ با استفاده از رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ تعریف می‌شوند.

$$|x(t)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, \omega) d\omega \quad (15)$$

$$|S(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, \omega) dt \quad (16)$$

چنانچه شرایط مرزی ارضا شود، انرژی کل سیگنال به صورت رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, \omega) d\omega dt \quad (17)$$

در این تحقیق از سه روش برای تشخیص آسیب استفاده شده است که در ادامه معرفی و نتایج هر یک در تعیین محل آسیب نیز نشان داده شده است.

۱.۵. روش تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده (روش پیشنهادی)

این روش که در این تحقیق پیشنهاد و به نام روش تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده نام‌گذاری شده است، ساده و در عین حال کاربردی است. ایده‌ی اولیه‌ی این روش در بعد بسامد از مراجع ۲۷ و ۲۸ استنتاج شده است؛ اما با توجه به توابع زمان-بسامد، تغییراتی در آن ایجاد شده است و به منزه‌ی روش تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده معرفی شده است. در واقع، با عنایت به قابلیت توابع زمان-بسامد، علاوه بر بعد بسامد، بعد زمان به روش تفاضل ماتریسی اضافه شده است. در این روش همان‌طور که در پلان‌های زمان-بسامد مشاهده شد، پلان‌ها در حالت قبل و بعد از ایجاد آسیب با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین به نظر می‌رسد با این اختلاف بتوان آسیب را تشخیص داد. بدین منظور ماتریس پلان زمان-بسامد هنگامی که سازه‌ی پل سالم است، به صورت TF_S و پس از ایجاد آسیب به صورت TF_D در نظر گرفته می‌شوند. این ماتریس‌ها به صورت رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ هستند. هر یک از درایه‌های این دو ماتریس با استفاده از روش توزیع تداخلی کاهش‌یافته و رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شوند. ابعاد ماتریس‌های زمان-بسامد متناسب با گام‌های زمانی ثبت سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی هستند. در این تحقیق براساس تحلیل‌های تاریخی‌چهی زمانی انجام و رکوردهای زلزله‌ی ورودی طول این گام‌ها ۱/۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد ستون‌های ماتریس‌های زمان-بسامد برابر با طول رکوردهای اعمالی تقسیم بر ۱/۰ است. علاوه بر آن جهت افزایش رزولوشن پلان‌های زمان-بسامد و افزایش دقت در تشخیص آسیب، تعداد سطرهای ماتریس‌های زمان-بسامد نیز برابر با تعداد ستون‌ها در نظر گرفته شده است.

$$TF_S = \begin{bmatrix} TF_S(f_1, t_1) & TF_S(f_1, t_2) & \dots & TF_S(f_1, t_n) \\ TF_S(f_2, t_1) & TF_S(f_2, t_2) & \dots & TF_S(f_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TF_S(f_m, t_1) & TF_S(f_m, t_2) & \dots & TF_S(f_m, t_n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$TF_D = \begin{bmatrix} TF_D(f_1, t_1) & TF_D(f_1, t_2) & \dots & TF_D(f_1, t_n) \\ TF_D(f_2, t_1) & TF_D(f_2, t_2) & \dots & TF_D(f_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TF_D(f_m, t_1) & TF_D(f_m, t_2) & \dots & TF_D(f_m, t_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

در این روابط، m تعداد مخازن بسامدی در نظر گرفته‌شده و n تعداد گام‌های زمانی است. سپس Δ ، ماتریس تفاضل ماتریس‌های TF_S و TF_D با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ محاسبه می‌شود.

$$\Delta(i, j) = TF_S(f_i, t_j) - TF_D(f_i, t_j) \quad (20)$$

در ماتریس Δ ، هر درایه نشان‌دهنده‌ی اختلاف بین ماتریس‌های پلان زمان-بسامد است. تغییر کلی به‌وجودآمده در گام‌های زمانی و مخازن بسامدی مختلف را می‌توان با جمع درایه‌های ماتریس Δ تخمین زد (رابطه‌ی ۲۱).

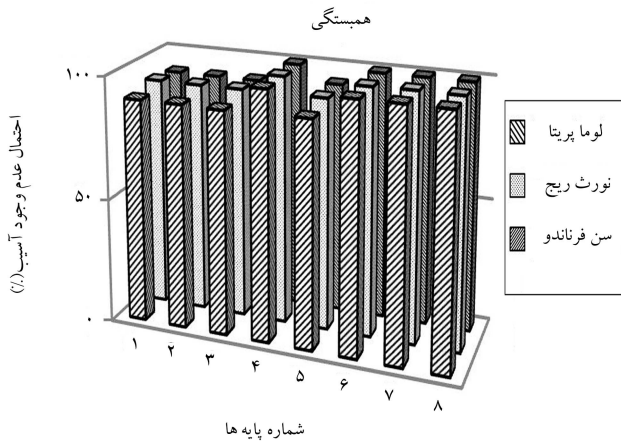
$$\text{Difference} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\Delta(i, j)| \quad (21)$$

گسترده در شناسایی صدا و اثر انگشت استفاده شده است. در این روش با تطابق بین اطلاعات جدید با الگوهای ذخیره شده، الگوی مورد نظر شناسایی می شود. در این تحقیق از دو الگوریتم مطرح در روش های تطابقی برای تشخیص آسیب استفاده شده است.

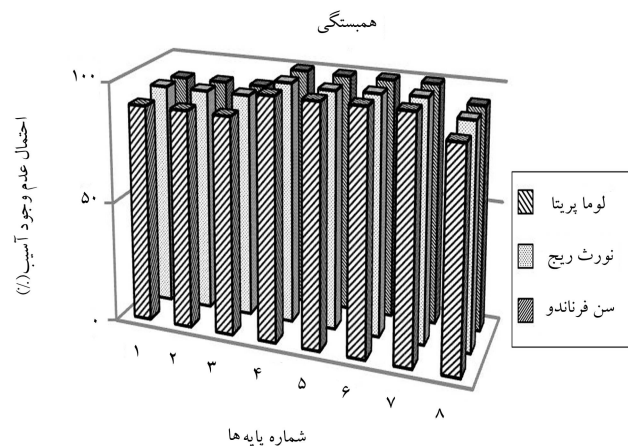
۱.۲.۵. همبستگی^{۱۶}

در تحلیل همبستگی، ضریب همبستگی بین دو الگو (C_{ij}) محاسبه می شود. مقدار همبستگی ۱ بدین معنی است که دو الگو کاملاً با هم یکسان هستند. در صورت محاسبه ی عدد صفر، حاکی از تفاوت کامل بین دو الگو است و چنانچه عدد -۱ حاصل شود، دو الگو مطلقاً معکوس یکدیگر هستند. هر چه نتیجه به ۱ نزدیک تر باشد، نشان دهنده ی تطابق نزدیک تر بین دو الگو است. رابطه ی مورد استفاده به شرح رابطه ی ۲۲ است:^[۱۷،۱۸]

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (S_i(k) - \bar{S}_i)(S_j(k) - \bar{S}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (S_i(k) - \bar{S}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (S_j(k) - \bar{S}_j)^2}} \quad (22)$$

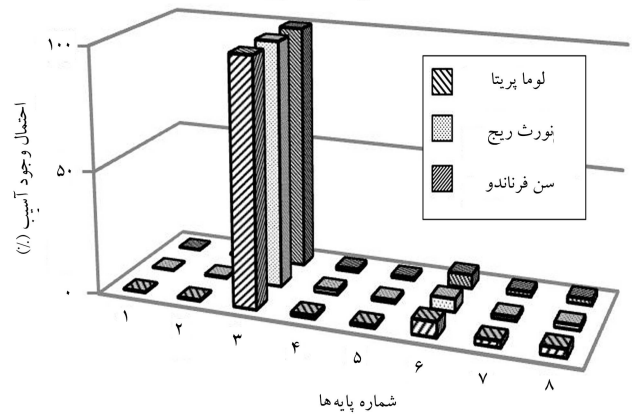


شکل ۲۶. نمودار تشخیص آسیب ایجاد شده با استفاده از روش همبستگی براساس پاسخ ثبت شده در بالای پایه های بتنی.



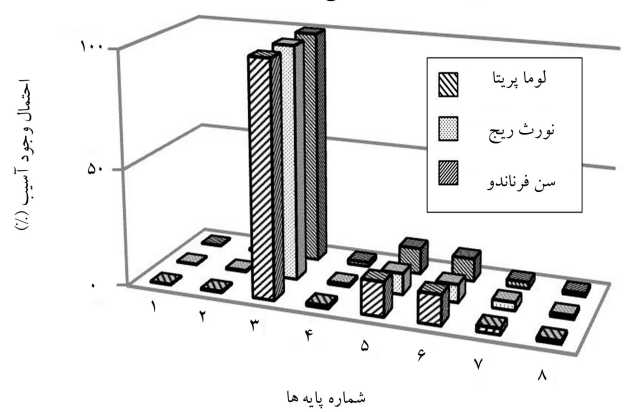
شکل ۲۷. نمودار تشخیص آسیب ایجاد شده با استفاده از روش همبستگی براساس پاسخ ثبت شده در میانه ی پایه های بتنی.

تفاضل ماتریسی اصلاح شده



شکل ۲۴. نمودار تشخیص آسیب ایجاد شده با استفاده از روش تفاضل ماتریسی براساس پاسخ ثبت شده در بالای پایه های بتنی.

تفاضل ماتریسی اصلاح شده



شکل ۲۵. نمودار تشخیص آسیب ایجاد شده با استفاده از روش تفاضل ماتریسی براساس پاسخ ثبت شده در میانه ی پایه های بتنی.

درصد احتمال وجود آسیب از طریق محاسبه ی مقدار تغییرهای کلی در دو تراز میانه و بالای پایه ها و نرمال کردن آن ها در هر تراز برحسب عدد بزرگ تر به دست می آید. سپس با مقایسه ی نتایج، پایه ی آسیب دیده شناسایی می شود.

حال با استفاده از پلان های زمان-بسامد محاسبه شده، عملکرد این روش ارزیابی شده است. نتایج محاسبات در شکل های ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل ها، تحت تأثیر ۳ رکورد زلزله ی سن فرناندو، لوما پریتا و نورث ریج با استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده ی پیشنهادی، احتمال وجود آسیب در پایه ی سوم برابر با ۱۰۰٪ به دست آمده است. این در حالی است که احتمال وجود آسیب در سایر پایه ها مقدار کوچک و یا صفر محاسبه شده است. لذا مشاهده می شود که این الگوریتم پیشنهادی، در تشخیص آسیبی که در پایه ی سوم ایجاد شده بود، به صورت کاملاً موفق عمل کرده است.

۲.۵. روش های تطابقی

یکی از روش های بسیار شناخته شده برای الگوشناسی و تشخیص آسیب، تطابق است. در حالت کلی تطابق برای تعیین شباهت بین دو حالت (نقاط، منحنی ها و شکل ها) که دارای نوع یکسانی هستند، به کار می رود. روش تطابق الگو به طور

مطابق شکل‌های ۲۸ و ۲۹، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از روش فاصله‌ی مربعی کمینه عملکرد بسیار مطلوبی را در تعیین آسیب و شناسایی محل آن ارائه کرده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، هر دو روش تشخیص آسیب تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده‌اند و فاصله‌ی کمینه‌ی مربع دارای عملکرد رضایت‌بخش هستند.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش اصلاح‌شده‌ی تفاضل ماتریسی با استفاده از توابع زمان-بسامد مربعی برای شناسایی آسیب و محل آن در پایه‌ی پل‌ها پیشنهاد شده است. برای تأیید روش پیشنهادی از مدل پل قطور به طول ۴۴۸ متر و توابع زمان-بسامد مربعی شامل طیف تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه، طیف تبدیل موجک، توزیع‌های ویگنر-ویل، چوی-ویلیامز، شبه ویگنر-ویل هموارشده و تداخلی کاهش‌یافته، برای پردازش سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی پل‌ها استفاده شده و تابع زمان-بسامد تداخلی کاهش‌یافته به‌منزله‌ی تابع مطلوب برای پردازش سیگنال‌های پاسخ لرزه‌ی پل‌ها شناسایی شده است.

برای شناسایی آسیب، روش تفاضل ماتریسی پیشنهادی همراه با دو روش تطابقی استفاده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به‌منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، پل قطور که دارای ابعاد قابل‌توجه و پیچیدگی‌های ویژه‌ی است، برای نمونه‌ی سازی‌ی انتخاب شده است. جهت ساخت مدل تحلیلی مطابق با وضع موجود پل، مشخصات مصالح و خواص اعضاء از طریق آزمایش‌های مختلف به‌دست آمده است.

برای یک پل ساخته‌شده و درحال استفاده، با نصب حساسه‌هایی در بالا و وسط هر ستون می‌توان سیگنال‌های خروجی پاسخ لرزه‌ی سازه را در نقاطی که حساسه نصب شده است، به‌صورت تاریخچه‌ی زمانی در زمان وقوع پیش‌لرزه‌ها و زلزله‌ی اصلی ثبت و برداشت کرد و سپس با استفاده از توزیع تداخلی کاهش‌یافته و روش تفاضل ماتریس اصلاح‌شده‌ی پیشنهادی، این سیگنال‌های لرزه‌ی خروجی را پردازش و محل آسیب را شناسایی کرد. لذا با توجه به اینکه روش پیشنهادی فقط براساس پردازش سیگنال‌های لرزه‌ی خروجی است، درعمل نیازی به تعریف مدل تحلیلی نیست.

همچنین از آنجا که اساس این روش بر پایه‌ی پردازش سیگنال‌های لرزه‌ی خروجی است، در روش پیشنهادی برخلاف بسیاری از روش‌های دیگر (مانند روش‌های پارامتریک از قبیل مدل فضای حالت، آرما و...)، نیازی به اندازه‌گیری نیروی ورودی نیز نیست.

در برخی از روش‌ها برای تشخیص آسیب، پس از وقوع زلزله مجدداً سازه را تحت تحریک اجباری هارمونیک قرار می‌دهند و با پردازش سیگنال‌های ثبت‌شده از تحریک هارمونیک نسبت به تشخیص محل آسیب اقدام می‌شود. اما یکی دیگر از مزیت‌های این روش استفاده از خود سیگنال‌های ثبت‌شده در زمان وقوع زلزله و بی‌نیازی به تحریک اجباری پل با استفاده از دستگاه‌های موتور ارتعاش اجباری برای تشخیص آسیب لرزه‌ی است.

براساس محاسبات انجام‌شده در دو تراز میانه و بالای پایه‌ها، روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح‌شده و فاصله‌ی مربعی کمینه، وجود آسیب را در پایه‌ی سوم تحت تأثیر ۳ رکورد زلزله به‌خوبی شناسایی کرده‌اند. بیشترین مقدار خطا در محاسبه‌ی احتمال وجود آسیب در پایه‌ها با کاربرد ماتریس‌های زمان-بسامد مربوط به سیگنال‌های

در این رابطه، n تعداد نقاط برداری در الگو، $S_i(k)$ و $S_j(k)$ مقادیر برداری الگوهای i و j در نقطه‌ی k است و مقادیر \bar{S}_i و \bar{S}_j میانگین الگوهای i و j هستند. محاسبات انجام‌شده با استفاده از روش همبستگی برای تشخیص آسیب و تعیین محل آن در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ قابل مشاهده هستند.

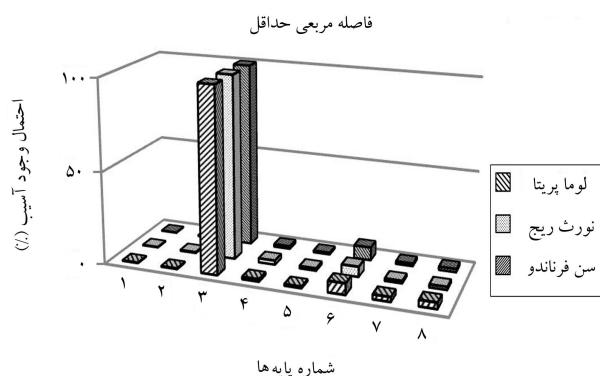
همان‌طور که گفته شد، در روش همبستگی عدد کوچک‌تر نشان‌دهنده‌ی اختلاف بیشتر است. بنابراین در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نمودارهای کوچک‌تر نشان‌دهنده‌ی محل آسیب هستند. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که روش همبستگی برای تشخیص محل آسیب عملکرد مطلوبی نداشته است.

۲.۲.۵. فاصله‌ی مربعی کمینه (LSD)^{۱۷}

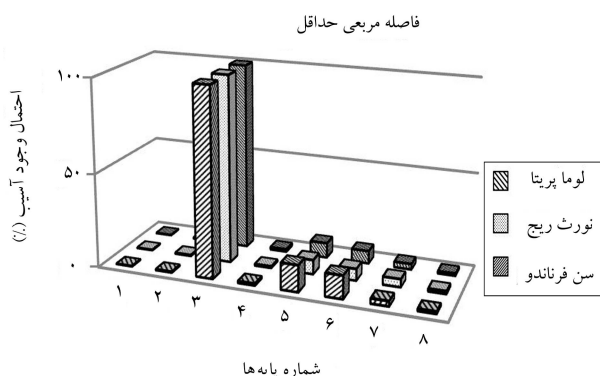
فاصله‌ی مربعی کمینه (LSD) به‌طور گسترده برای تشخیص صدا و اثر انگشت استفاده شده است. این روش به‌صورت رابطه‌ی ۲۳ تعریف می‌شود:^[۱۷،۱۸]

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^n (S_i(k) - S_j(k))^2 \right)^{0.5} \quad (23)$$

هر چه مقدار فاصله‌ی مربعی کمینه کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی همبستگی بیشتر است. در این رابطه، n تعداد نقاط برداری در الگو، $S_i(k)$ و $S_j(k)$ مقادیر برداری الگوهای i و j در نقطه‌ی k هستند. d_{ij} فاصله‌ی مربعی کمینه بین دو الگو است. هر چه مقدار فاصله‌ی مربعی کمینه کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی شباهت بیشتر دو الگو است. نتایج محاسبات در شکل‌های ۲۸ و ۲۹ نمایش داده شده است.



شکل ۲۸. نمودار تشخیص آسیب ایجادشده با استفاده از روش فاصله‌ی کمینه‌ی مربع براساس پاسخ ثبت‌شده در بالای پایه‌های بتنی.



شکل ۲۹. نمودار تشخیص آسیب ایجادشده با استفاده از روش فاصله‌ی کمینه‌ی مربع براساس پاسخ ثبت‌شده در میانه‌ی پایه‌های بتنی.

ماتریسی اصلاح شده و فاصله‌ی مربعی کمیته، ۱۴٪ به دست آمده است. لذا با عنایت به سادگی الگوریتم پیشنهادی، این الگو می‌تواند برای سلامت‌سنجی پل‌ها استفاده شود.

ثبت شده در بالای پایه‌ها، با استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، ۶٪ و با استفاده از روش فاصله‌ی مربعی کمیته، ۷٪ محاسبه شده‌اند. علاوه بر آن مقدار خطا با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده در میانه‌ی پایه‌ها در هر دو روش تفاضل

پانویس‌ها

1. auto-regressive moving average
2. time-frequency representation (TFR)
3. spectrogram
4. scalogram
5. Wigner-Ville distribution (WVD)
6. Choi-Williams distribution (CWD)
7. reduced interference distribution (RID)
8. smoothed pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD)
9. short time fourier transform (STFT)
10. spectrogram
11. wavelet transform
12. mother wavelet
13. Morlet
14. Hilbert
15. Cauchy principal value
16. correlation
17. least square distance (LSD)

منابع (References)

1. Doebling, S., Farrar, C., Prime, M. and Shevitz, D. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review", *LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, USA* (1996).
2. Sohn, H., Farrar, C., Hemez, F., Shunk, D., Stinemates, D. and Nadler, B. "A review of structural health monitoring literature", *LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, USA* (2003).
3. Boashash, B., *Time Frequency Signal Analysis and Processing*, UK, Elsevier Publications of Related Interest (2003).
4. De Lautour, O.R. "Assessment of seismic damage to civil structures using statistical pattern recognition techniques and time series analysis", PhD thesis, New Zealand, University of Auckland (2008).
5. Cheng, J., Yu, D. and Yang, Y. "A fault diagnosis approach for gears based on IMF AR model and SVM", *EURASIP J. on Advances in Signal Processing*, pp. 1-7 (2008).
6. Bonato, P., Ceravolo, R. and De Stefano, A. "The use of wind excitation in structural identification", *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, **74-76**, pp. 709-718 (1998).
7. De Stefano, A., Ceravolo, R. and Sabia, D. "Output only dynamic identification in time-frequency domain", *proceedings of the American Control Conference*, Arlington, pp. 447-449 (2001).
8. Zhou, Z. "Vibration-based damage detection of simple bridge superstructures", PhD thesis, Canada, University of Saskatchewan (2008).
9. Wang, H. and Chen, P. "Fuzzy diagnosis method for rotating machinery in Variable rotating speed", *IEEE Sensors J.*, **11**(1), pp. 23-34 (2011).
10. Qiao, L., "Structural damage detection using signal-based pattern recognition", PhD thesis, USA, Kansas State University (2009).
11. Melhem, H. and Kim, H. "Damage detection in concrete by fourier and wavelets analysis", *J. of Eng. Mechanics*, **129**(5), pp. 571-577 (2003).
12. Neild, S.A., McFadden, P.D. and Williams, M.S. "A review of time-frequency methods for structural vibration analysis", *Eng. Structures*, **25**, pp. 713-728 (2003).
13. Bradford, S.C. "Time-frequency analysis of systems with changing dynamic properties", PhD thesis, USA, California Institute of Technology (2006).
14. Zhang, Z., Hua, H., Xu, X. and Huang, Z. "Modal parameter identification through gabor expansion of response signals", *J. of Sound and Vibration*, **226**, pp. 943-955 (2003).
15. Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F., *Time-Frequency and Cross-Time-Frequency Based Techniques for Structural Identification of Systems*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Pittsburgh, Pennsylvania (1998).
16. Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F. "Use of cross-time-frequency estimators for structural identification in non-stationary conditions and under unknown excitation", *J. of Sound and Vibration*, **237**(5), pp. 775-791 (2000).
17. Qiao, L., Esmaeily, A. and Melhem, H.G. "Structural damage detection using signal pattern-recognition", *Key Eng. Materials*, **400-402**, pp. 465-470 (2009).
18. Melhem, H. and Kim, H. "Damage detection in concrete by fourier and wavelets analysis", *J. of Eng. Mechanics*, **129**(5), pp. 571-577 (2003).
19. Zou, J. and Chen, J. "A comparative study on time-frequency feature of cracked rotor by Wigner-Ville distribution and wavelet transform", *J. of Sound and Vibration*, **276**, pp. 1-11 (2004).
20. Peng, Z.K., Tse, P.W. and Chu, F.L. "An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis", *J. of Sound and Vibration*, **286**, pp. 187-205 (2005).
21. Hlawatsch, F. and Boudreaux-Bartels, G.F. "Linear and quadratic time-frequency signal representations", *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 21-67 (1992).
22. Track & Technical Structures Department of Iran Railways, "Strength of materials test results of diameters railway bridge". I.R. of Iran, Tehran (In Persian) (2008).

23. Track & Technical Structures Department of Iran Railways, "Preliminary design of seismic retrofit of ghotour railway bridge", I.R. of Iran, Tehran (In Persain) (2009).
24. Mertin, A., *Signal Analysis (Wavelets, Filter Bank, Time-Frequency Transforms and Applications)*, England, John Wiley & Sons Ltd (1999).
25. Auger, F., Flandrin, P., Goncalve, P. and Lemoine, O., *Time-Frequency Toolbox for Use with MATLAB*, CNRS (France) and Rice University (USA), England, ISIS (2005).
26. Matlab (The Language of Technical Computing), Version 7.6, The MathWorks (1984-2007).
27. Beskhyroun, S., Oshima, T., Mikami, S. and Tsubota, Y. "Structural damage identification algorithm based on changes in power spectral density", *J. of Applied Mechanics*, **8**, pp. 73-84 (2005).
28. Beskhyroun, S., Oshimay, T. and Mikami, S. "Wavelet-based technique for structural damage detection", *Structural Control and Health Monitoring*, **17**, pp. 473-494 (2010).

SYSTEM IDENTIFICATION AND DAMAGE DETECTION OF BRIDGE CONCRETE PIERS, USING TIME-FREQUENCY REPRESENTATION AND A NEW MODIFIED MATRIX SUBTRACTION METHOD

F. Daneshjoo(corresponding author)

danesh_f@modares.ac.ir

H.R. Ahmadi

hamid.ahmadi@modares.ac.ir

**Dept. of Civil and Environmental Engineering
Tarbiat Modares University**

G. Mobtaker

ha_mobtaker51@yahoo.com

**Track & Technical Structures Department I.R.
Iran Railways**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 37-48, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 8 March 2011; received in revised form 3 July 2011; accepted 5 October 2011.

Abstract

In this research, a new modified matrix subtraction method is proposed using square time-frequency representations to detect bridge pier damage and its location. The new proposed method is confirmed, using the seismic response of the 448 meter long Ghotour Bridge model, and compared with correlation and least square distance methods. Time frequency plans of damaged and non-damaged bridge matrix elements are calculated using reduced interference distribution. The difference matrix is calculated by subtraction of corresponding matrix elements. The possibility of an existing damage index is calculated by summation of all elements of difference matrices and then normalizing them with a maximum value. Linear time history analyses and earthquake acceleration records of San Fernando, Loma Prieta and Northridge earthquakes are used for seismic response analysis.

In previous response analyses of the Ghotour Bridge, as stated in reference [23], the third pier from the left is considered more vulnerable to seismic damage. Therefore, for the purpose of this study, a reduction of thirty percent in the stiffness of that pier is considered, to simulate the seismic damage in the damaged analytical model. It is shown that the proposed method could satisfactorily identify the damage location. For the seismic response of the top of the bridge piers, the maximum error in locating the damage is 6 percent, while, for the seismic response of the middle of the bridge piers, it is 14 percent.

The time-frequency representations used include: the short time Fourier transform spectrum, wavelet transform spectrum, Wigner-Ville Distribution, Choi-Williams distribution, smoothed pseudo Wigner-Ville distribution and reduced interference distribution, which are finally identified as optimal performance time-frequency representation for bridge seismic response signal processing. Reduced interference distribution and Wigner-Ville distribution are both in the Cohen class, but reduced interference distribution methods are more appropriate for processing seismic bridge transient nonstationary response signals. Time-frequency planes have been calculated and dynamic specifications of the system have been estimated.

The proposed algorithm is a seismic output-only method. Therefore, it has the advantage of not needing to define the bridge analytical model and measuring seismic input loading, and, also, not needing to use harmonic forced vibration analysis after earthquake occurrence for bridge seismic damage detection, as is general in some other methods.

Key Words: Bridge system identification, damage detection, time-frequency representation, modified matrix subtraction.