

# ارزیابی و مقایسه توزیع‌های ویگنر-ویل و ژائو-اطلس-مارکس در استخراج مشخصات دینامیکی قابهای خمشی فولادی با استفاده از سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای

حمیدرضا احمدی<sup>۱</sup>، \* فرهاد دانشجو<sup>۲</sup>

## چکیده

تکنیکهای پردازش سیگنال جهت استخراج مشخصه، به سه دسته روش‌های حوزه زمان، روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان-فرکانس دسته‌بندی شده‌اند. در روش‌های حوزه زمان و حوزه فرکانس معمولاً باید از سیگنالهای مانا و خطی استفاده شود. این در حالیست که سیگنالهای پاسخ سازه‌ها تحت اثر زلزله به صورت غیرمانا می‌باشند. با این وجود در این تحقیق به منظور پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای و استخراج مشخصات دینامیکی آنها از تابعهای زمان-فرکانس استفاده شده است. مزیت تابعهای زمان-فرکانس اینست که این تابعها می‌توانند کلیه سیگنالهای مانا، غیرمانا و غیرخطی را پردازش نمایند. تعداد قابل توجهی تابع زمان-فرکانس در ادبیات فنی موجود است که البته قابلیت این تابعها نیز در استخراج مشخصات دینامیکی سیگنالها با یکدیگر تفاوت می‌نماید. بنابراین به منظور مطالعه تابعهای زمان-فرکانس در استخراج مشخصات دینامیکی قابهای خمشی فولادی، در این تحقیق دو تابع زمان-فرکانس توزیع ویگنر-ویل و ژائو-اطلس-مارکس مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور سه قاب فولادی، طراحی و مدلسازی شده‌اند. سپس رکوردهای زمین‌لرزه به مدلها اعمال و پاسخ قابها اندازه‌گیری شده است. سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابها با تابعهای زمان-فرکانس پردازش شده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه گردیده است. با استفاده از نتایج بدست آمده، تابعهای مورد نظر با یکدیگر مقایسه و تابع مطلوب برای پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی شناسایی شده است.

## کلمات کلیدی

توزیع ویگنر-ویل، توزیع ژائو-اطلس-مارکس، استخراج مشخصه، قاب خمشی فولادی، سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای

۱. دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، [hamid.ahmadi@modares.ac.ir](mailto:hamid.ahmadi@modares.ac.ir)

۲. استاد گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، [danesh\\_f@modares.ac.ir](mailto:danesh_f@modares.ac.ir)

توانایی تابعهای زمان-فرکانس مربعی در پردازش انواع سیگنال، در این تحقیق ضمن معرفی دو تابع زمان-فرکانس توزیع ویگنر-ویل و توزیع ژائو-اطلس-مارکس، جهت پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای سه قاب فولادی از این تابعها استفاده و مشخصات دینامیکی استخراج شده است.

## ۲- روش‌های در حوزه زمان-فرکانس

روشهای تحلیل زمان-فرکانس یک سری زمانی را به صورت دو بعدی که شامل محتوای فرکانسی نسبت به زمان می‌باشد، بیان می‌دارند. یک تابع زمان-فرکانس (Time-Frequency Representation) با بیان محتوای فرکانسی با توجه به تغییرات زمان، امکان تحلیل بهینه سیگنالها را فراهم می‌آورد. با استفاده از تحلیل زمان-فرکانس این امکان فراهم می‌آید که انرژی سیگنال در حوزه زمان و در حوزه فرکانس به صورت همزمان قابل رویت باشد. [۹]

## ۲-۱- توزیع ویگنر-ویل (Wigner-Ville Distribution)

توزیع ویگنر-ویل پایه‌ای‌ترین تابع در تابعهای زمان-فرکانس مربعی محسوب می‌شود. تابعهای زمان-فرکانس دیگر (مانند طیف‌نگار یا مقیاس ترکیبی) را می‌توان از توزیع ویگنر-ویل با انتخاب مناسب فاکتورهای هموارسازی بدست آورد. برای یک سیگنال  $s(t)$ ، با همبسته تحلیلی  $x(t)$ ، توزیع ویگنر-ویل به صورت فرمول شماره (۱) تعریف می‌شود. [۱۱، ۱۰، ۸]

$$WVD(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

در معادله بالا  $t$  و  $\omega$  به ترتیب زمان و فرکانس زاویه‌ای می‌باشند.  $x(t)$  سیگنال تحلیلی و علامت \* نشاندهنده مزدوج مختلط می‌باشد.

توزیع ویگنر-ویل در حالت کلی یک تابع مقدار حقیقی است که شرایط مرزی را ارضاء می‌کند و برای سیگنالها وضوح نسبتاً مطلوبی را در زمان و فرکانس بوجود می‌آورد. جملات تداخلی و مقادیر منفی مهمترین موانع استفاده از توزیع ویگنر-ویل به عنوان یک ابزار شناسایی برای کلیه سیگنالها می‌باشند. تابع  $x(t)$  دو بار و به صورتهای  $x$  و  $x^*$  در انتگرال ظاهر می‌

به طور کلی روشهای تئوری سلامت‌سنجی سیگنالی شامل دو فرآیند اصلی الف) استخراج مشخصه ب) شناسایی الگو (خصیصه) می‌باشند. [۱، ۲] روش‌های گوناگونی برای استخراج مشخصه پیشنهاد شده است. این روش‌ها را می‌توان بر مبنای نوع داده اندازه‌گیری شده، پارامتر بررسی شده و روش اتخاذ شده برای کمی‌سازی دسته‌بندی کرد. [۳]

تکنیکهای استخراج مشخصه بر اساس اندازه‌گیری پاسخهای سازه، به طور کلی به دو دسته روشهای استاتیکی-پایه یا دینامیکی ارتعاش-پایه تقسیم می‌شوند. [۴] در روشهای استاتیکی-پایه نیاز به اندازه‌گیری حجم گسترده‌ای از اطلاعات بوده و موجب اختلال در سرویس‌دهی سازه می‌گردد. [۵] روشهای استخراج مشخصات دینامیکی سازه‌ها را می‌توان به روشهای مودی و روشهای سیگنالی تقسیم‌بندی نمود. اگرچه روشهای مودی برای استخراج مشخصه در سازه‌ها قابل استفاده می‌باشند اما روشهای سیگنالی به دلیل کارآمدی بیشتر در سازه‌ها با رفتار پیچیده و همچنین توانایی بالاتر در پردازش پاسخهای سازه با پارازیت، مورد توجه فراوانی در رشته‌های هوافضا، عمران و مکانیک قرار گرفته‌اند. [۶، ۷]

در روشهای سیگنالی تغییرات در مشخصه سازه مستقیماً از تاریخچه‌های زمانی اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. بر اساس تکنیکهای پردازش سیگنال مختلف، روشهای سیگنالی به سه دسته روشهای حوزه زمان، روشهای حوزه فرکانس و روشهای حوزه زمان-فرکانس تقسیم‌بندی می‌شوند. [۱] در روشهای حوزه زمان از تابعهای تاریخچه زمانی برای استخراج مشخصه-های سازه استفاده می‌شود. در روشهای حوزه فرکانس از تحلیل‌های فوریه برای استخراج مشخصه در پنجره زمانی داده شده استفاده می‌گردد. در روشهای زمان-فرکانس می‌توان از تابعهای زمان-فرکانس برای استخراج مشخصه‌های سازه‌ها استفاده نمود. مزیت تابعهای زمان-فرکانس اینست که این تابعها می‌توانند کلیه سیگنالهای مانا، غیرمانا و غیرخطی را پردازش نمایند. [۸] با استفاده از تابعهای زمان-فرکانس مربعی، پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده و تغییرات محتوای فرکانسی نسبت به زمان قابل مشاهده می‌باشند. با عنایت به



شود که توزیع دو خطی یا درجه دوم را ممکن می‌سازد. ارضاء شرایط مرزی و بسیاری خواص مطلوب دیگر موجب گستردگی استفاده از توزیع ویگنر-ویل شده است. [۸،۱۰،۱۱]

## ۲-۲- توزیع ژائو-اطلس-مارکس ( Zhao-Atlas-Marks Distribution)

توزیع ژائو-اطلس-مارکس معمولاً به عنوان توزیع مخروطی شکل شناخته می‌شود. این توزیع می‌تواند به طور کامل، جملات تداخلی را از جملات اصلی در فرکانسهای یکسان حذف نماید. معادله توزیع ژائو-اطلس-مارکس به صورت زیر می‌باشد. [۱۲]

$$ZAM(t, \omega) = \int_{-2t}^{2t} e^{-i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} x\left(v + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(v - \frac{\tau}{2}\right) f(t-v, \tau) dv d\tau \quad (2)$$

$$f(t, \tau) = \begin{cases} \frac{1}{\tau} e^{-\alpha\tau^2} & |\tau| \geq 2|t| \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

هسته توزیع ژائو-اطلس-مارکس به صورت  $\Phi_C = \frac{\sin(\pi\omega t)}{\pi\omega t} e^{-\alpha t^2}$  تعریف شده است. توزیع ژائو-اطلس-مارکس به صورت گسترده در پردازش سیگنالهای صوتی بکار گرفته شده است.

## ۳- معرفی مدل‌های مورد مطالعه

به منظور بررسی و ارزیابی تابعهای زمان-فرکانس مورد نظر، سه قاب فولادی خمشی ۳ طبقه، ۹ طبقه و ۱۵ طبقه طراحی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۱۳] در کلیه قابها بار مرده برابر ۲۵/۵ N/mm و بار زنده ۷/۸۵ N/mm می‌باشد. در طراحی این قابها، ساختگاه زمین نوع II و خطر نسبی زلزله، خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. جهت انجام ارزیابی جامع، نسبت ارتفاع به بعد پایه قابها طوری در نظر گرفته شده که هر یک از قابها دارای شکل جابجایی متفاوت بوده و سه شکل مختلف جابجایی مورد نظر قرار گیرد. [۱۴] بدین منظور نسبت ارتفاع به بعد پایه در قاب ۳ طبقه کمتر از ۱/۵، برای قاب ۹ طبقه بین ۱/۵ و ۳ و برای قاب ۱۵ طبقه بزرگتر از ۳ در نظر گرفته شده



است. نمایی از قابهای مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. علاوه بر آن مشخصات مصالح، پروفیل‌های مورد استفاده و پیوند طبیعی قابها به ترتیب در جدولهای ۱ تا ۳ معرفی شده است. به منظور انجام تحلیل، قابها در نرم‌افزار ZEUS-NL [۱۵] نسخه ۱،۹،۰ مدل‌سازی شده‌اند.

## ۴- مدل‌سازی و تحلیل

جهت ارزیابی و بررسی توزیعهای ویگنر-ویل و ژائو-اطلس-مارکس لازمست توانایی آنها در پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی مورد مطالعه قرار گیرد. بدین منظور پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی ۳، ۹ و ۱۵ طبقه در طبقه آخر تحت اثر زلزله‌های مختلف ثبت شده است. سپس سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای ثبت شده با این تابعها پردازش شده و پلانهای زمان-فرکانس هر یک از تابعها محاسبه گردیده است. در نهایت با مقایسه و ارزیابی پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده، تابع مطلوب برای پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی شناسایی شده است.

جدول (۱): مشخصات مصالح

شماره	خواص مصالح	تنش تسلیم	تنش گسیختگی	مدول الاستیسیته
۱	تیرها و ستونها	۲۳۵/۴ (MPa)	۳۹۲ (MPa)	۲۰۰۰۰ (MPa)

جدول (۲): پیوندهای طبیعی قابها

شماره	نوع قاب	تعداد طبقه	پیوند اول	پیوند دوم	پیوند سوم	پیوند چهارم
۱	H/B < ۱/۵	۳	۰/۷۰	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۰۷
۲	۱/۵ < H/B < ۳	۹	۱/۴۸	۰/۴۹	۰/۲۸	۰/۱۹
۳	۳ < H/B	۱۵	۱/۸۴	۰/۷۲	۰/۴۲	۰/۳۰

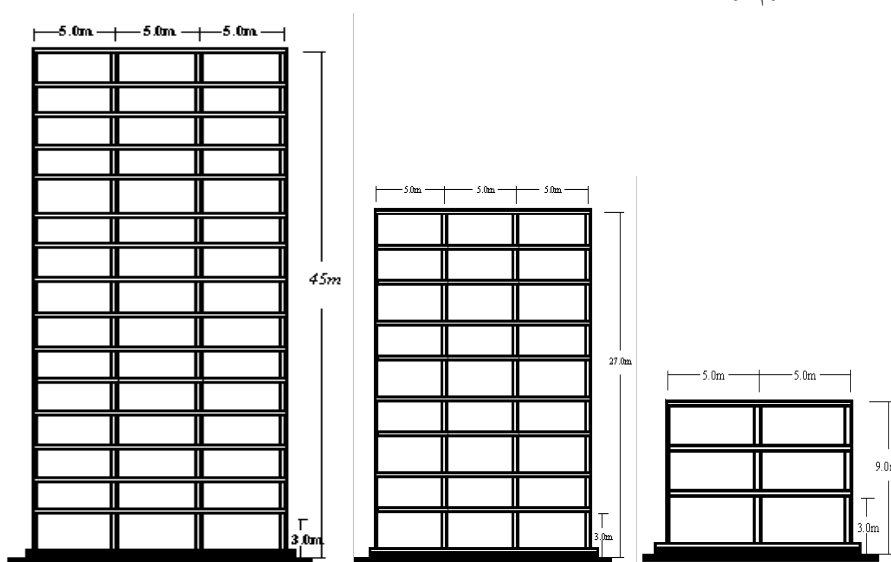
به منظور ثبت پاسخ لرزه‌ای قابها، سه رکورد زمین‌لرزه فریولی (Friuli)، لیورمور (Livermore) و کیپ‌مندوسینو (Cape Mendocino) به مدل‌های تحلیلی قابهای خمشی فولادی اعمال و پاسخها در طبقه آخر ثبت شده‌اند. رکوردها متناسب با شتاب ۰/۳۵g، مقیاس گردیده و به قابها اعمال شده‌اند. رکوردها در زمین نوع II ثبت گردیده‌اند و همگی دور از گسل می‌باشند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۴ و شکل‌های ۲،

پذیرفته است. پس از پردازش، پلانهای زمان-فرکانس هر یک محاسبه گردیده است. پلانهای زمان-فرکانس اطلاعات بسیار باارزشی پیرامون تغییرات محتوای فرکانسی سیگنال نسبت به زمان را بدست می‌دهند. به منظور ارزیابی تابعهای زمان-فرکانس ویگنر-ویل و ژائو-اتلس-مارکس، پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده با این تابعها، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکلهای ۵ تا ۱۳ پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده با استفاده از تابعهای زمان-فرکانس ویگنر-ویل و ژائو-اتلس-مارکس نشان داده شده‌اند.

۳ و ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است جهت بررسی دقیق تابعهای زمان-فرکانس و به منظور اجتناب از اعمال اثر مدل‌های رفتاری غیرخطی در پاسخها، مدل تحلیلی پل تحت تاثیر رکوردها به صورت دینامیکی تاریخچه زمانی خطی تحلیل گردیده است.

### ۵- پردازش سیگنالهای لرزه‌ای

همانطور که گفته شد به منظور ارزیابی و مطالعه تابعهای زمان-فرکانس ویگنر-ویل و ژائو-اتلس-مارکس، سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی با این تابعها پردازش شده‌اند. پردازش سیگنالها در نرم‌افزار [۱۶] MatLab صورت



شکل ۱-نمایی از قابهای خمشی فولادی

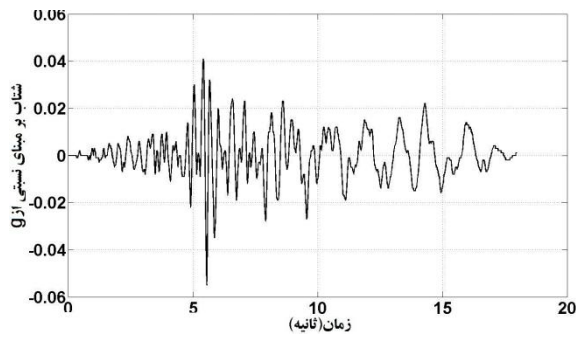
جدول (۳): مشخصات مصالح

تیر	ستونهای داخلی	ستونهای خارجی	طبقه	قاب
IPE40 IPE40	IPB24 IPB20	IPB24 IPB20	۱ ۳ و ۲	۳ طبقه
IPE40 IPE40 IPE40	IPB34 IPB30 IPB28	IPB34 IPB30 IPB28	۳ و ۲، ۱ ۶ و ۵، ۴ ۹ و ۸، ۷	۹ طبقه
IPE45 IPE45 IPE45 IPE45 IPE40 IPE40 IPE40 IPE40 IPE40 IPE40	P135x40x3 P135x35x3 P130x30x3 P135x35x3 P130x30x2.5 P130x30x2.5 P125x25x2.5 P125x25x1.5 P125x25x1.5 P120x20x1.5	P135x40x3 P135x35x3 P135x35x3 P130x30x2.5 P130x30x2.5 P125x25x2.5 P125x25x1.5 P125x25x1.5 P120x20x1.5 P120x20x1.5	۱ ۳، ۲ ۵، ۴ ۷، ۶ ۸ ۱۰، ۹ ۱۲، ۱۱ ۱۳ ۱۴ ۱۵	۱۵ طبقه

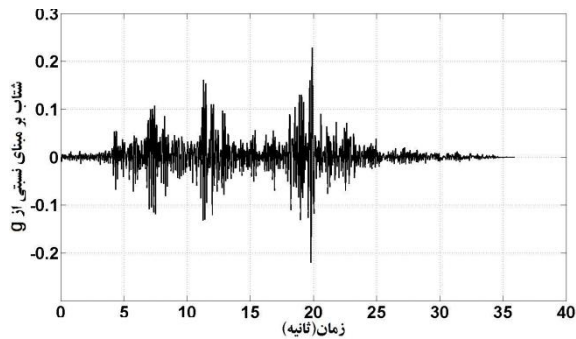


جدول (۴): رکوردهای اعمال شده به قابهای خمشی فولادی

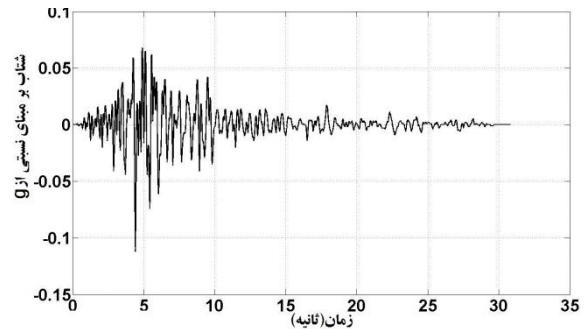
ردیف	نام رکورد	زمان رویداد	ایستگاه ثبت	PGA (g)
۱	فریولی	۱۹۷۶	Forgaria Cornino	۰/۱۱۲
۲	لیورمور	۱۹۸۰	Fremont Mission	۰/۰۵۵
۳	کیپ مندوسینو	۱۹۹۲	Shelter Cove Airport	۰/۲۲۹



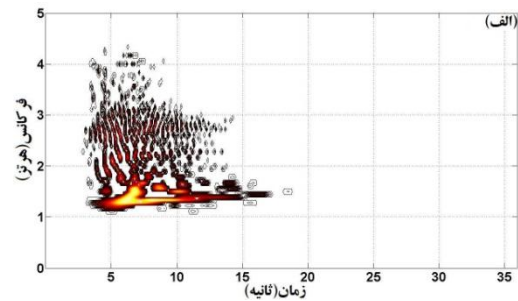
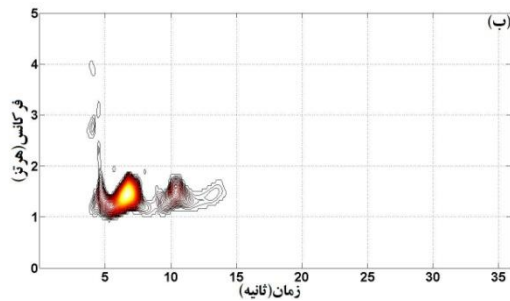
شکل ۳- رکورد زمین لرزه لیورمور



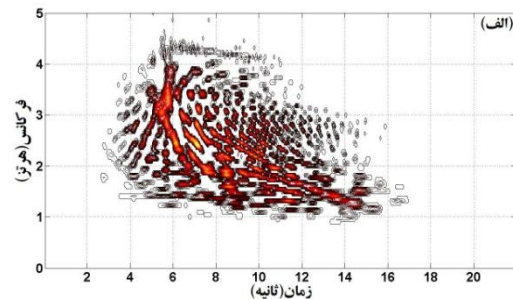
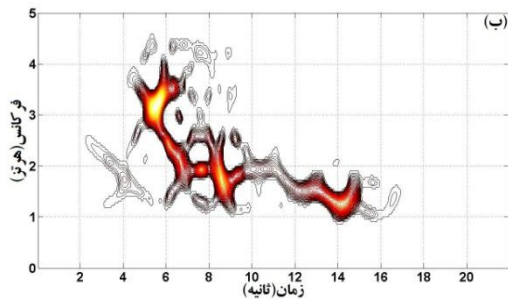
شکل ۴- رکورد زمین لرزه کیپ مندوسینو



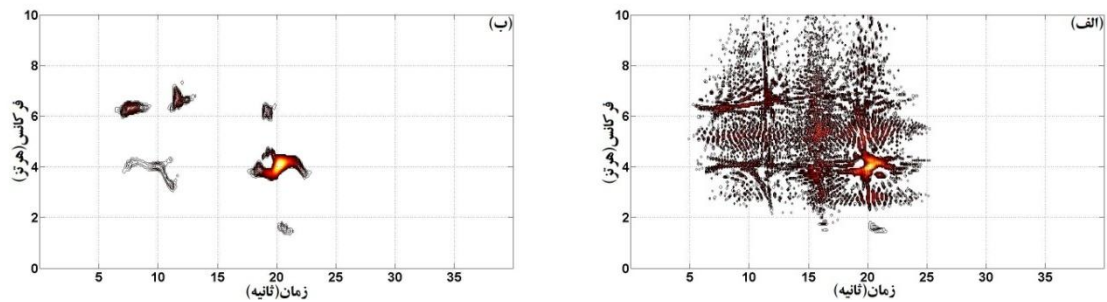
شکل ۲- رکورد زمین لرزه فریولی



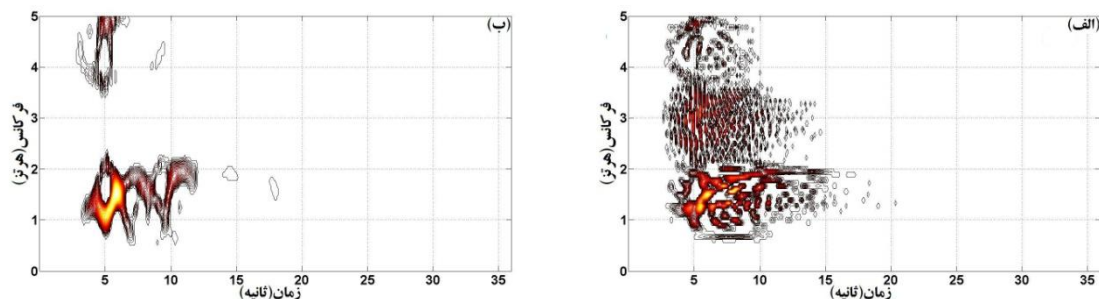
شکل ۵- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اطلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۳ طبقه تحت اثر زلزله فریولی



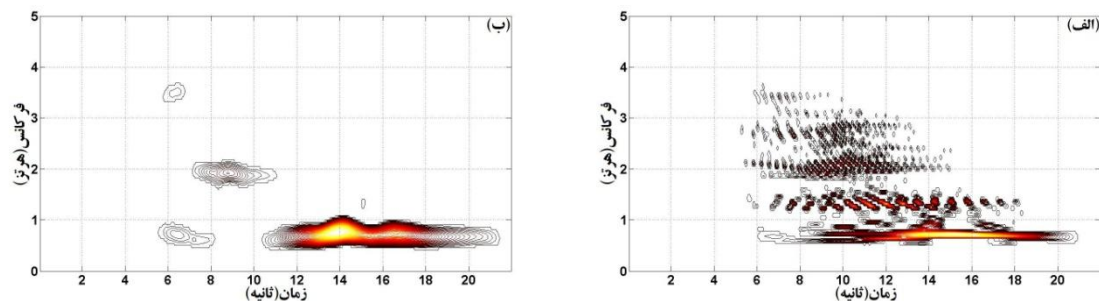
شکل ۶- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اطلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۳ طبقه تحت اثر زلزله لیورمور



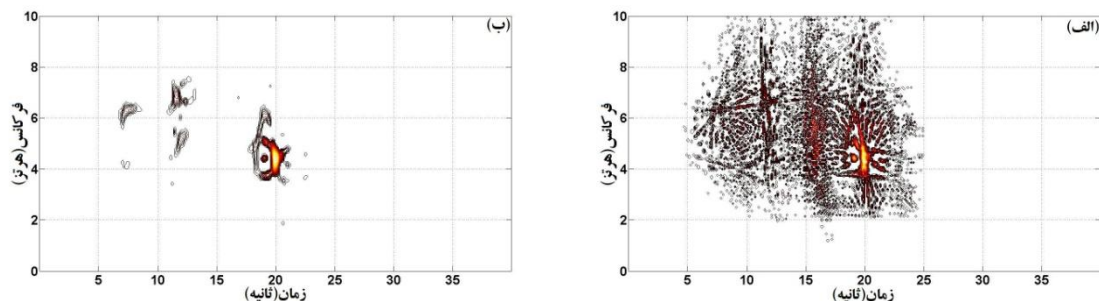
شکل ۷- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اتلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۳ طبقه تحت اثر زلزله کیپ‌مندوسینو



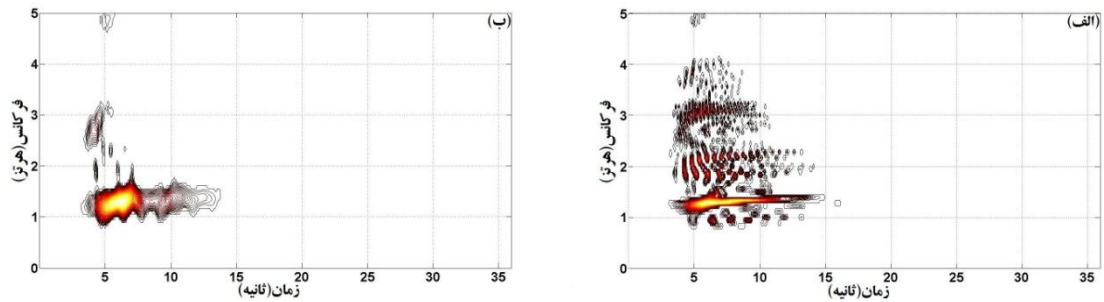
شکل ۸- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اتلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۹ طبقه تحت اثر زلزله فریولی



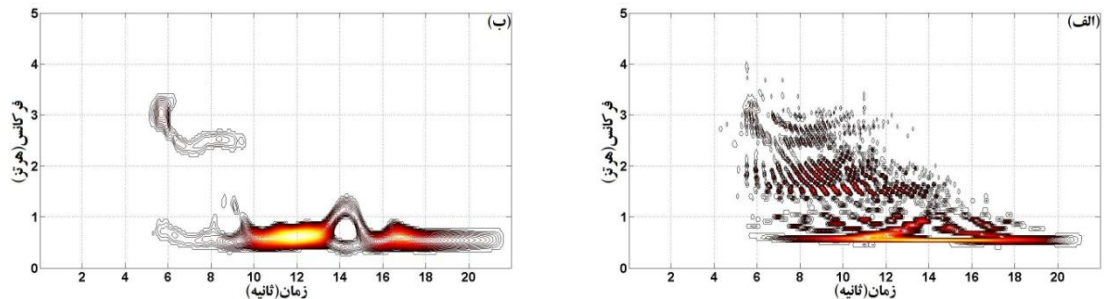
شکل ۹- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اتلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۹ طبقه تحت اثر زلزله لیورمور



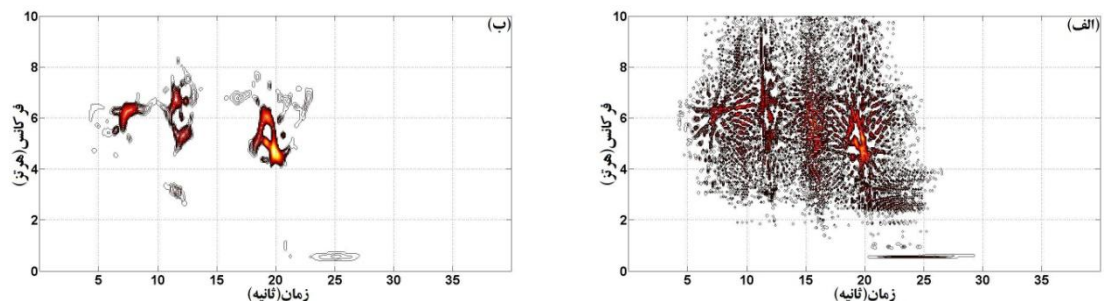
شکل ۱۰- پلان زمان-فرکانس (الف) توزیع ویگنر-ویل (ب) توزیع ژائو-اتلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۹ طبقه تحت اثر زلزله کیپ‌مندوسینو



شکل ۱۱- پلان زمان-فرکانس الف) توزیع ویگنر-ویل ب) توزیع ژائو-اطلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۱۵ طبقه تحت اثر زلزله فریولی



شکل ۱۲- پلان زمان-فرکانس الف) توزیع ویگنر-ویل ب) توزیع ژائو-اطلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۱۵ طبقه تحت اثر زلزله لیورمور



شکل ۱۳- پلان زمان-فرکانس الف) توزیع ویگنر-ویل ب) توزیع ژائو-اطلس-مارکس با پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قاب ۱۵ طبقه تحت اثر زلزله کیپ‌مندوسینو

انرژی، سیگنال در آن فرکانسها دارای تمرکز انرژی نمی- باشد. همانطور که در پلانهای زمان-فرکانس مشاهده می‌شود توزیع ژائو-اطلس-مارکس در مقایسه با توزیع ویگنر-ویل، جملات تداخلی بسیار کمتری را ایجاد نموده است. علاوه بر آن رزولوشن پلانهای زمان-فرکانس هم در محور زمان و هم در محور فرکانس به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

نحوه عملکرد هر یک از توزیعهای زمان-فرکانس استفاده شده برای پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی در پلانهای زمان-فرکانس نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل‌های ۵ تا ۱۳ بدست می- آید که توزیع ویگنر-ویل حدفاصل جملات اصلی، جملات تداخلی تولید نموده است. به عبارت دیگر در پلانهای زمان-فرکانس حاصل از توزیع ویگنر-ویل، انرژی سیگنال علاوه بر فرکانسهای صحیح، در فرکانسهای دیگری نیز نمایش داده شده که بر اساس چگالی طیفی

## ۶- نتیجه گیری

استخراج مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها به ویژه برای وضعیت سنجی و ارزیابی آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این تحقیق جهت استخراج مشخصات دینامیکی قابهای خمشی فولادی استفاده از توزیعهای زمان-فرکانس پیشنهاد شده و دو توزیع ویگنر-ویل و ژائو-اطلس-مارکس برای استخراج مشخصات دینامیکی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جهت انجام مقایسه، سه قاب فولادی خمشی با نسبتهای مختلف ارتفاع به بعد پایه، طراحی و در نرم‌افزار ZEUS-NL مدل‌سازی گردیده‌اند. بر اساس نوع زمین در نظر گرفته شده در طراحی قابها، سه رکورد زمین‌لرزه انتخاب و با مقیاس متناسب با شتاب مبنای زلزله، به قابها اعمال شده‌اند. پاسخ لرزه‌ای قابها در طبقه بام ثبت گردیده و سیگنالهای ثبت شده با توزیعهای زمان-فرکانس ویگنر-ویل و ژائو-اطلس-مارکس پردازش گردیده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده‌اند. با استفاده از پلانهای زمان-فرکانس می‌توان تغییرات محتوای فرکانسی پاسخ لرزه‌ای سازه را نسبت به زمان ردگیری نمود.

بر اساس نتایج بدست آمده توزیع ویگنر-ویل جملات تداخلی فراوانی را تولید کرده و تمرکز انرژی سیگنال را به درستی گزارش نموده است. در پلانهای زمان-فرکانس بدست آمده از توزیع ویگنر-ویل به دلیل فراوانی جملات تداخلی، استخراج مشخصات دینامیکی سیگنالها بدرستی امکان‌پذیر نمی‌باشد و بنابراین برای ردیابی تغییرات فرکانسی سیگنالهای حاصل از پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی، مناسب نمی‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده با توزیع ژائو-اطلس-مارکس در مقایسه با توزیع ویگنر-ویل، با دقت نسبتاً مطلوب، تغییرات محتوای فرکانسی نسبت به زمان را نمایش داده و محل تمرکز انرژی سیگنال را مشخص نموده‌اند. در پلانهای زمان-فرکانس حاصل از توزیع ژائو-اطلس-مارکس، جملات تداخلی در مقایسه با پلانهای زمان-فرکانس حاصل از توزیع ویگنر-ویل بسیار کاهش

یافته است. بنابر نتایج بدست آمده توزیع ژائو-اطلس-مارکس در مقایسه با توزیع ویگنر-ویل برای پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای حاصل از قابهای خمشی فولادی دارای عملکرد مطلوبتری می‌باشد.

## مراجع

- [1] دانشجو، فرهاد، احمدی، حمیدرضا، مبتکر، قادر، "شناسایی مشخصه و تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پل‌ها با استفاده از توابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده"، پذیرفته شده در مجله علمی-پژوهشی شریف، ۱۳۹۰.
- [2] D. Balageas, C.P. Fritzen, A. Güemes. Structural Health Monitoring. ISTE Ltd, London, UK, ۲۰۰۶.
- [3] L. Qiao. Structural Damage Detection Using Signal-Based Pattern Recognition. ph.D thesis. Kansas State University, USA, ۲۰۰۹.
- [4] احمدی، حمیدرضا، دانشجو، فرهاد، "استخراج مشخصات دینامیکی عرشه خرپایی پل راه‌آهن فیروزه با استفاده از توابع زمان-فرکانس"، اولین کنفرانس ملی سازه و فولاد، ۷ صفحه، هتل المپیک، تهران، ۱۳۸۹.
- [5] Y. Yan, L. Cheng, Z. Wu, L. Yam. Development in Vibration-Based Structural Damage Detection Technique. Mechanical Systems and Signal Processing, vol(21), ۲۰۰۷.
- [6] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, D. Shevitz. 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.
- [7] H. Sohn, C. Farrar, F. Hemez, D. Shunk, D. Stinemat, B. Nadler. A Review of Structural Health Monitoring Literature. LA-۱۳۹۷۶-MS, Los Alamos National Laboratory, USA, ۲۰۰۳.
- [8] B. Boashash. Time Frequency Signal Analysis and Processing. Elsevier Publications of Related Interest, UK, ۲۰۰۳.
- [9] L. Cohen. Time-frequency distributions-A review. Proceeding of the IEEE, vol(77), no(7), 1989.
- [10] A. Mertin. Signal Analysis (Wavelets, Filter Bank, Time-Frequency Transforms and



Applications). John Wiley & Sons Ltd, England, ۱۹۹۹.

- [11] S.C. Bradford, J. Yang, T. Heaton. Vibration in the Dynamic Properties of Structures: the Wigner-Ville Distributin, Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 2006, California, USA.
- [12] Y. Zhao, L.E. Atlas, R.J. Marks. The Use of Cone-Shaped Kernels for Generalized Time-Frequency Representations of Nonstationary Signals. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol (38), no(7), 1990.
- [13] A. Nicknam, H.R. Ahmadi, N. Mahdavi, A comparative study of the traditional performance and The Incremental Dynamic Analysis approaches (IDA), 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, Beijing, China.
- [14] F. Naeim. The seismic design handbook. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2001.
- [15] ZEUS-NL. A program for inelastic static and dynamic analysis of structures, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, ۲۰۱۱.
- [16] Matlab (The Language of Technical Computing). Version 7.6, The MathWorks, USA, 2008.