

«یادداشت تحقیقاتی»

تحلیل شتاب‌نگاشت زلزله با استفاده از تبدیل موجک پیوسته

علی حیدری^{۱*}، داریوش جلیلی^۲

۱- استادیار مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی دزفول

*شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵

aliheidari@yahoo.com

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

چکیده - تبدیل موجک روش ریاضی جدیدی است که در سالهای اخیر علاقه فراوانی برای استفاده از آن در حل مسائل مهندسی مشاهده می‌شود. این روش برای تحلیل موجهای غیرپایا مناسب است. با استفاده از تبدیل موجک می‌توان بررسیهای مکانی در حوزه زمان و فرکانس را انجام داد. از تبدیل موجک در زمینه‌های تحلیل امواج، تحلیل تصاویر، حل معادلات دیفرانسیل، تحلیل عددی، نظریه ارتباطات، تحلیل دینامیکی و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله از تبدیل پیوسته موجک در تجزیه زمان - فرکانس امواج زلزله استفاده شده و نحوه محاسبه زمان وقوع فرکانسهای موجود در موج زلزله بیان می‌شود. در این روش از یک تابع پنجره استفاده شده که از ابتدا تا انتهای موج حرکت داده می‌شود. سپس این فرایند به‌ازای پنجره‌هایی با ابعاد مختلف تکرار می‌شود. نتایج حاصل نشان‌دهنده زمان وقوع مقیاسهای مختلف است. نتایج به‌خوبی نشان‌دهنده توانایی این روش در محاسبه زمان وقوع فرکانسهای مختلف موجود در موج زلزله بوده و با استفاده از آن می‌توان دید جدیدی نسبت به شتاب‌نگاشت زلزله به‌دست آورد. در این مقاله با استفاده از تبدیل پیوسته موجک، شتاب‌نگاشت زلزله در بازه زمان - فرکانس تجزیه می‌شود. نتایج حاصل نشان‌دهنده زمان وقوع هر یک از فرکانسهای موجود در موج زلزله است. در این روش خطای محاسباتی کم است. با استفاده از این روش شتاب‌نگاشت‌های متعددی تجزیه شده و نتایج حاصل از آن با تبدیل فوریه مقایسه شده است.

کلید واژگان: تبدیل پیوسته موجک، تبدیل فوریه، شتاب‌نگاشت زلزله، بازنمایش، زمان - فرکانس.

۱- مقدمه

دینامیکی نشان داده است [۱] تا [۶]. در تبدیل فوریه برای پیدا کردن فرکانسهای موجود، سیگنال موردنظر بر روی توابع سینوس و کسینوس و هارمونیکهای آنها تصویر می‌شود. در تبدیل موجک، سیگنال بر روی دسته‌ای از توابع، که موجک نامیده شده و با $g_{b,\tau}(t)$ نشان داده می‌شوند تصویر می‌شود. $g(t)$ تابع مادر و پارامترهای 'b' و 'τ'، مقیاس و انتقال

زمانی که محققان دریافتند تبدیل فوریه پاسخگوی تمامی نیازها در زمینه تحلیل فرکانسی نیست، تبدیل موجک (WT)^۱ به وجود آمد. تبدیل موجک به‌خوبی توانایی خود را در تحلیل‌های دینامیکی و بهینه‌سازی

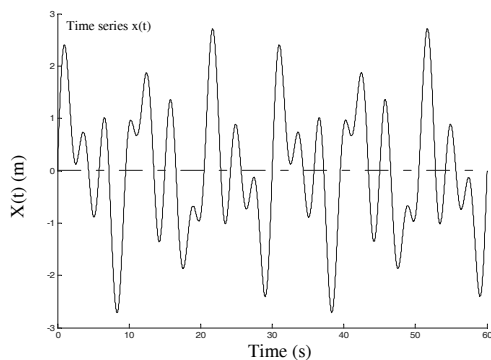
1. Wavelet Transform

سیگنال مذکور به دلیل اینکه فرکانسهای تشکیل دهنده آن در کل بازه زمانی اتفاق می‌افتند، پایا نامیده می‌شود:

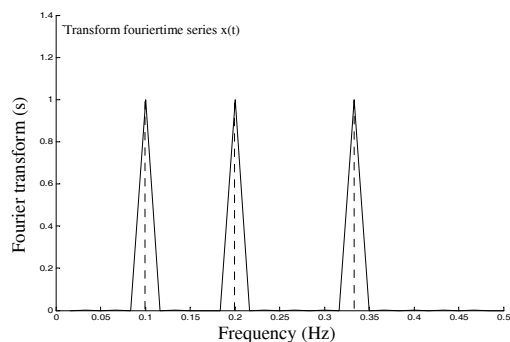
$$x(t) = \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{T_1}\right) + \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{T_2}\right) + \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{T_3}\right) \quad (2)$$

$$= \sin(\gamma\pi \cdot 3t) + \sin(\gamma\pi \cdot 2t) + \sin(\gamma\pi \cdot 1t)$$

در رابطه فوق دوره‌های تناوب سیگنال به ترتیب $T_1=3$ ، $T_2=5$ و $T_3=10$ ثانیه است. تبدیل فوریه سیگنال مذکور در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همانطور که از معادله مشخص است، فرکانسهای تشکیل دهنده موج در کل بازه زمانی اتفاق افتاده و بنابراین به اطلاعی از زمان وقوع هر فرکانس نیاز نیست. به بیان دیگر تبدیل فوریه سیگنال مذکور اطلاعات کاملی از آن را ارائه می‌کند.



شکل ۱ الف) سریهای زمانی سیگنال سینوسی



شکل ۱ ب) تبدیل فوریه سیگنال سینوسی

نامیده می‌شوند. رابطه بین موجک مادر و پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت زیر است:

$$g_{b,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{b}} g\left(\frac{t-\tau}{b}\right) \quad (1)$$

اگر پارامتر b افزایش یابد، موجک مادر کشیده شده و بخش بزرگی از سیگنال را پوشش داده و محتوای فرکانسی پایین را آشکار می‌سازد. با کاهش پارامتر b ، موجک منقبض شده و بخش کوچکی از سیگنال را پوشش می‌دهد. در این حالت نیز مقیاس کوچک متناظر با محتوای فرکانسی بالای سیگنال است. پارامتر τ موجک را روی سیگنال اصلی انتقال داده و متناظر با انتقال در حوزه زمان است.

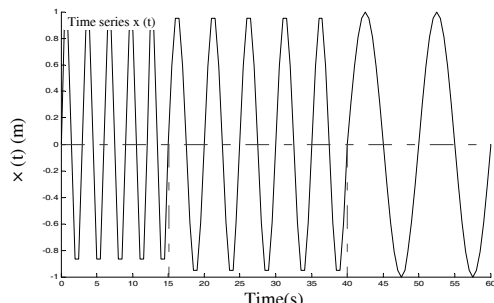
برای محاسبه تبدیل پیوسته سیگنال، ابتدا موجک مادر انتخاب می‌شود. موجک مادر با عامل ' b ' منبسط یا منقبض شده و با عامل ' τ ' انتقال می‌یابد. سپس سیگنال مورد نظر روی $g_{b,\tau}(t)$ تصویر شده و تبدیل موجک سیگنال محاسبه می‌شود. این عمل به‌زای تمامی مقادیر ' τ ' (انتقال موجک روی کل سیگنال) و تمامی مقادیر ' b ' (جستجو به‌زای تمامی فرکانسها) برای به‌دست آوردن تبدیل موجک انجام می‌شود.

با استفاده از تبدیل فوریه، ساختار فرکانسی موجود در سیگنال با این فرض که تمام مؤلفه‌های فرکانسی آن از ابتدا تا انتهای سیگنال حضور دارند، تعیین می‌شود، در مقابل در تبدیل موجک، موقعیت زمانی هر فرکانس مشخص شده و امکان تحلیل فرکانسهای غیر پایدار و محل ناپیوستگی در سیگنال فراهم می‌آید.

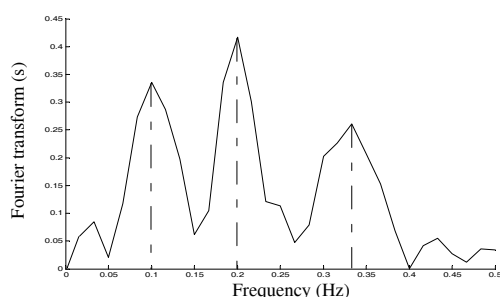
۲- مثالی از تبدیل فوریه

روشهای متفاوتی برای تحلیل طیفی سیگنالها وجود دارد. یکی از این روشها تبدیل سریع فوریه (FFT) است [۷]. در شکل ۱-الف منحنی سیگنال با معادله ۲ که شامل سه مؤلفه سینوسی در بازه زمانی صفر تا ۶۰ ثانیه است، نشان داده شده.

کل بازه زمانی (از منفی بینهایت تا مثبت بی نهایت) استفاده شده و انتگرالگیری می شود [۷].



شکل ۲ الف) سریهای زمانی سیگنال سینوسی



شکل ۲ ب) تبدیل فوری سیگنال سینوسی

۳- تبدیل موجک

موجکها توابع حقیقی و مختلط تمرکز یافته در زمان و فرکانس بوده و شکل یکسانی دارند. در تحلیل موجک، سیگنال در تابع موجک ضرب شده و حاصل انتگرال، به صورت جداگانه برای قسمت‌های مختلف سیگنال در حوزه زمان محاسبه می شود. برای محاسبه تبدیل موجک سیگنال $x(t)$ ، ابتدا سیگنال مورد نظر در تابع موجک ضرب شده و انتگرال این حاصل ضرب در کل بازه زمانی سیگنال محاسبه می شود. این کار با استفاده از رابطه زیر انجام می شود [۸].

$$WT(\tau, b) = \frac{1}{\sqrt{b}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g_{\tau, b}^*(t; \tau, b) dt \quad (4)$$

در این رابطه $g_{b, \tau}(t)$ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود. تابع فوق، تابعی از دو متغیر b و τ است.

اکنون فرض کنید که محتوای فرکانسی سیگنال با زمان تغییر کند. به عنوان مثال، موج ارائه شده در شکل ۲-الف را در نظر بگیرید. این موج سه مؤلفه فرکانسی متفاوت در سه بازه زمانی متفاوت دارد. در فاصله صفر تا ۱۵ ثانیه، فرکانس سینوسی ۰/۳۳ هرتز در فاصله زمانی ۱۵ تا ۴۰ ثانیه فرکانس سینوسی ۰/۲ هرتز، و در فاصله زمانی ۴۰ تا ۶۰ ثانیه فرکانس سینوسی ۰/۱ هرتز در آن وجود داشته که با استفاده از معادله زیر بیان می شود. معادله زیر به دلیل اینکه فرکانسهای تشکیل دهنده آن در بازه‌های زمانی مختلفی حضور دارند، ناپایا نامیده می شود:

$$x(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{3}\right) & \text{for } 0 < t < 15 \text{ sec.} \\ \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{5}\right) & \text{for } 15 < t < 40 \text{ sec.} \\ \sin\left(\frac{\gamma\pi t}{10}\right) & \text{for } 40 < t < 60 \text{ sec.} \end{cases} \quad (3)$$

تفاوت این سیگنال با سیگنال قبلی در آن است که فرکانسهای تشکیل دهنده آن در زمانهای متفاوتی ایجاد شده است. تبدیل فوری سیگنال مذکور در شکل ۲-ب نشان داده شده است. مشابه شکل ۱-ب تبدیل فوری این سیگنال نیز سه نقطه اوج در فرکانسهای ۰/۳۳، ۰/۲ و ۰/۱ هرتز دارد. دندانهای ایجاد شده در این شکل ناشی از تغییرات سریع از یک فرکانس به فرکانس دیگر است. صرف نظر از دندانها، شکلهای ۱-ب و ۲-ب بسیار شبیه به یکدیگر است. به بیان دیگر تبدیل فوری دو سیگنال قبلی که در بازه زمانی منحنیهای متفاوتی دارند، شبیه به یکدیگر است. همانطور که مشاهده می شود برای سیگنال معادله (۳) با استفاده از منحنی تبدیل فوری نمی توان زمان وقوع فرکانسها را تشخیص داد. به بیان دیگر تبدیل فوری فقط، برای تعیین اجزای طیفی مناسب است و اگر در مورد زمان وقوع فرکانسها یا در مورد مکان زمانی اجزای طیفی آن اطلاعاتی مورد نیاز باشد، روش تبدیل فوری گزینه خوبی نیست؛ از پنجره $\exp(i\omega t)$ در تبدیل فوری در

در این مقاله پارامتر c برابر $c = 2\pi$ در نظر گرفته شده است. با جایگذاری $c = 2\pi$ ، معادله فوق به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$g_{\tau b}(t) = \frac{1}{\sqrt{b}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\tau}{b}\right)^2\right] \exp\left[i\frac{2\pi}{b}(t-\tau)\right] \quad (7)$$

عبارت $\left[i\frac{2\pi}{b}(t-\tau)\right]$ بیانگر موج مسطح سینوسی با فرکانس $2\pi/b$ بوده و مقیاس b ، یک دوره تناوب در نظر گرفته می‌شود. معادله قبل دارای قسمت‌های حقیقی و موهومی بوده و در شکل‌های ۳-الف تا ۳-ج برای مقادیر متفاوت b ترسیم شده است. از نظر عددی، برای توابع حقیقی از قسمت حقیقی و برای توابع موهومی از قسمت موهومی استفاده می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر b ، تابع مادر در بازه زمانی گسترش یافته و با ثابت ماندن b و افزایش c ، تعداد تغییرات در بازه زمانی زیادتر می‌شود. در این مقاله برای تغییر مقیاس b از رابطه زیر استفاده شده است [۹]:

$$b_i = b \cdot 2^{i\delta} \quad i = 0, 1, \dots, M \quad (8)$$

که در آن:

$$M = \frac{1}{\delta} \log_2\left(\frac{N\Delta t}{b}\right) \quad (9)$$

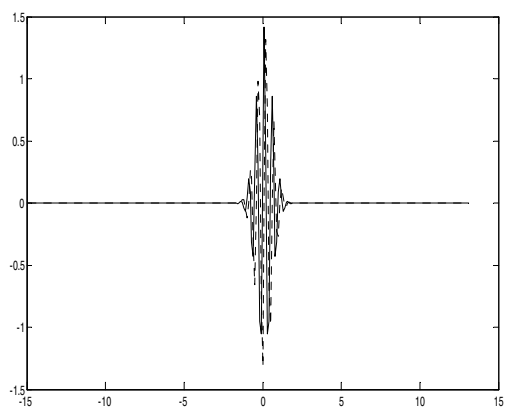
در این رابطه N تعداد نقاط در سری زمانی Δt و فاصله زمانی نقاط است. b کوچکترین مقیاس و b_M بزرگترین مقیاس است. معمولاً مقدار b برابر کوچکترین پریود موجود در تبدیل فوریه سری زمانی انتخاب شده و تقریباً مساوی $2\Delta t$ انتخاب می‌شود. ضریب δ چنان انتخاب می‌شود که به تعداد کافی نمونه‌برداری در مقیاس b حاصل شود. برای موجک مورلت، مقدار 0.5 برای δ انتخاب مناسبی است.

τ نشان‌دهنده انتقال و b بیانگر مقیاس (معکوس فرکانس) و * نشان‌دهنده مزدوج مختلط است. $g(t)$ تابع تبدیل بوده و موج مادر نامیده می‌شود. عبارت مادر به این دلیل به کار رفته که توابع متفاوتی که برای انتقال استفاده می‌شوند، همگی از تابع اصلی (مادر) ناشی می‌شوند، به بیان دیگر موج مادر، موج اصلی برای تولید سایر توابع است. تمامی توابع $g_{\tau, b}^*$ که از روی تابع مادر ساخته می‌شود، تابع موجک یا تابع دختر نامیده شده و از معادله (۱) به دست می‌آیند. انتقال در تبدیل موجک، به همان مفهوم روش تبدیل قطعه‌ای فوریه بوده و نشان‌دهنده موقعیت پنجره است. در این روش، تابع پنجره در نظر گرفته شده در موج مورد نظر ضرب می‌شود. به خلاف تبدیل قطعه‌ای فوریه، در تبدیل موجکی، پهنای تابع پنجره متغیر بوده و برای هر مؤلفه سیگنال، می‌توان عرض مناسبی را انتخاب کرد. این موضوع مهمترین ویژگی تبدیل موجک است. در تبدیل موجک b ضریب بزرگنمایی و مشخص‌کننده پهنای موجک است. اگر $b > 1$ ، آنگاه موج باز شده و اگر $b < 1$ ، موج فشرده می‌شود. اگر سیگنال مورد نظر دارای فرکانس متناظر با مقیاس داده شده باشد، موجک در این مقیاس، به سیگنال در این مکان نزدیک بوده و ضریب تبدیل موجک محاسبه شده در این نقطه، مقدار نسبتاً بزرگی خواهد شد. انتخاب تابع مادر مناسب تأثیر قابل توجهی بر نتیجه نهایی دارد. بر اساس تحقیقات انجام شده، تابع مورلت تابع مناسبی برای تحلیل‌های دینامیکی است [۱]. در این مقاله از تابع مادر مورلت که با رابطه زیر بیان شده استفاده می‌شود:

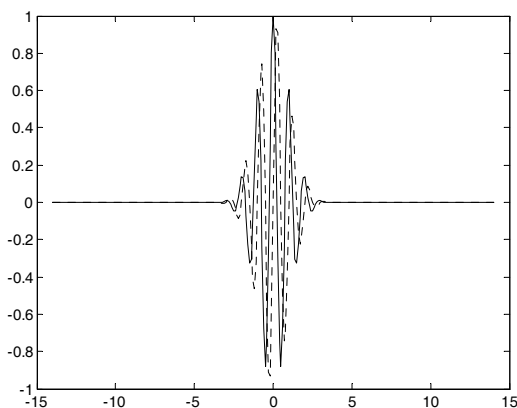
$$g(t) = \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) \exp(ict) \quad (5)$$

با استفاده از معادله (۱) موجک مورلت به شکل زیر می‌شود:

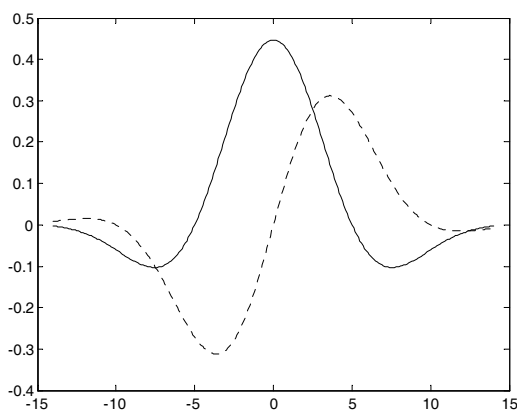
$$g_{\tau b}(t) = \frac{1}{\sqrt{b}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\tau}{b}\right)^2\right] \exp\left[ic\frac{t-\tau}{b}\right] \quad (6)$$



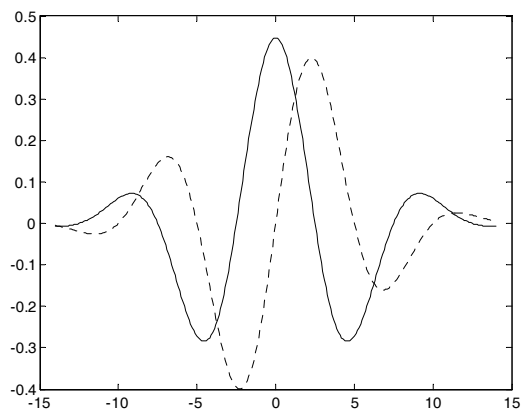
ب) $b=1$ و $c=2\pi$



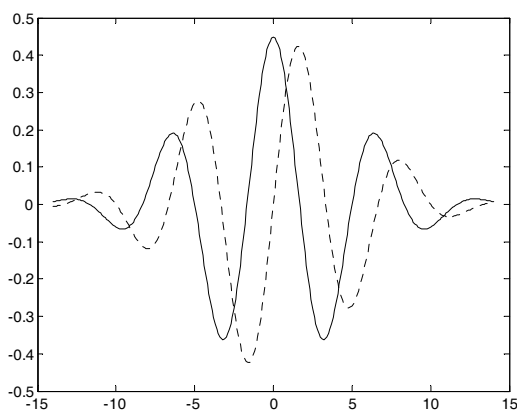
الف) $b=1$ و $c=2\pi$



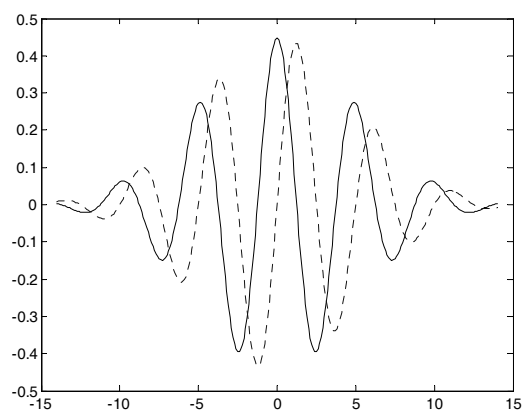
د) $b=5$ و $c=\pi/2$



ج) $b=5$ و $c=\pi$



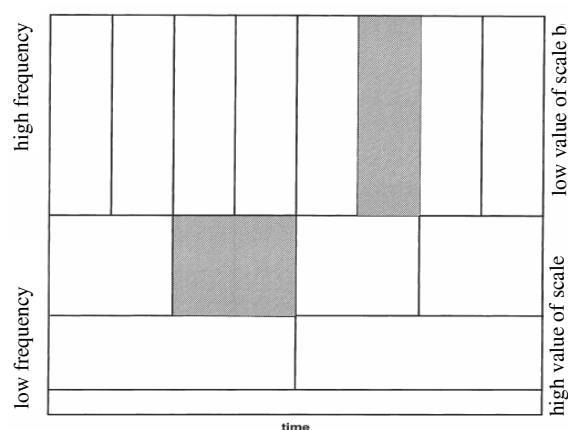
ه) $b=5$ و $c=3\pi/2$



و) $b=5$ و $c=2\pi$

شکل ۳ موجک مورلت به‌ازای مقادیر مختلف b و c

موردنظر به تعدادی سیگنال سینوسی با فرکانسهای متفاوت تجزیه می‌شود، در تبدیل موجک، به موجکها، که نسخه‌هایی متفاوت از نظر مقیاس و انتقال با موجک مادر هستند، تجزیه می‌شود. تبدیل موجک امکان بررسیهای جزئی و مقطعی را هم در حوزه زمان از طریق تغییر موجک و هم در حوزه فرکانس (مقیاس) از طریق بزرگنمایی فراهم می‌سازد.



شکل ۴ تجزیه زمان - فرکانس

پارامتر مقیاس در تبدیل موجک مشابه مقیاس در نقشه‌ها است [۸]. همانطور که در نقشه‌ها، مقیاس بزرگ متناظر با نشان ندادن جزئیات است، در اینجا نیز مقیاس بزرگ متناظر با نشان ندادن جزئیات سیگنال و مقیاس کوچک متناظر با نشان دادن جزئیات است.

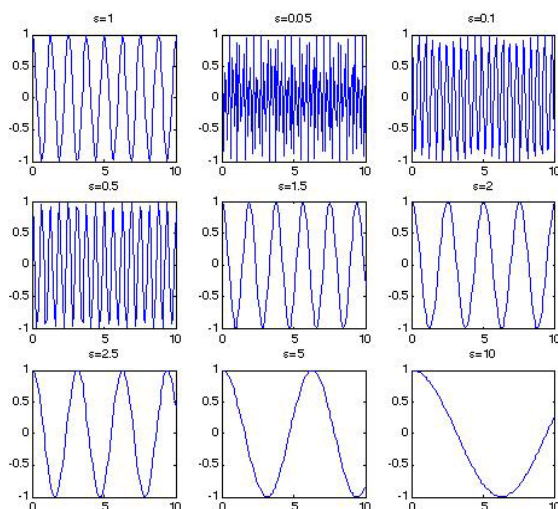
به‌طور مشابه، در جملات فرکانسی، فرکانس پایین (مقیاس بزرگ) متناظر با اطلاعات کلی از سیگنال بوده و فرکانسهای بزرگ، متناظر با جزئیات اطلاعات موجود در سیگنال است. به بیان دیگر فرکانسهای بالا برای مدت زیادی در سیگنال حضور ندارند در حالی که فرکانسهای پایین معمولاً برای تمام مدت زمان سیگنال حضور دارند. مقیاس به‌عنوان تابعی ریاضی، سیگنال را فشرده یا منبسط می‌کند. مقیاسهای بزرگ متناظر با باز کردن موج و مقیاسهای کوچک متناظر با فشرده شدن سیگنال است. برای مشخص شدن تأثیر مقیاس بر منحنی، در شکل ۵

تحلیل موجک به روشی مشابه تبدیل پنجره‌ای فوریه انجام می‌شود. برای این کار ابتدا موج موردنظر در یک تابع پنجره (موجک) ضرب می‌شود. عرض این پنجره برای محاسبه هر جزء طیفی سیگنال قابل تنظیم است. امکان تغییر عرض پنجره، مهمترین خصوصیت تبدیل موجک است. تغییر عرض پنجره، کیفیت تبدیل را همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر جعبه متناظر با ارزش تبدیل موجک در صفحه تبدیل - مقیاس است. اگرچه عرض و ارتفاع جعبه‌ها تغییر می‌کند، اما مساحت آنها ثابت است (دو جعبه هاشور خورده را در شکل ۴ ببینید). هر جعبه بیانگر قسمت مشابهی از صفحه زمان - فرکانس بوده و مقادیر متفاوتی از زمان و فرکانس را ارائه می‌کند. در فرکانسهای پایین (مقادیر بالای مقیاس) ارتفاع جعبه‌ها کوچک بوده و عرض آنها بزرگ است. این بدان معنا است که کیفیت فرکانس بهتر، اما کیفیت زمان ضعیفتر است. به بیان دیگر ابهام بیشتری درباره زمان دقیق وقوع وجود دارد. در فرکانسهای بالاتر (مقیاس کوچک) ارتفاع جعبه‌ها افزایش یافته و عرض آنها کاهش می‌یابد. این مسأله متناظر با پنجره‌های باریک بوده و نشان‌دهنده کیفیت ضعیف در تعیین فرکانس و کیفیت بهتر در بازه زمانی است [۸]. در تبدیل پنجره‌ای فوریه، کیفیت زمان و فرکانس به‌وسیله مقداری ثابت یعنی عرض پنجره مشخص می‌شود. بدین معنا که کیفیت زمان و فرکانس ثابت بوده و در نتیجه در این حالت صفحه زمان - فرکانس به شکل تعدادی مستطیل هم‌اندازه است. در تبدیل موجک ابعاد جعبه‌ها تغییر می‌کند اما مساحت آنها برابر است. این موضوع مهمترین مزیت تبدیل موجک نسبت به تبدیل پنجره‌ای فوریه است [۸].

۴- تأثیر پارامتر مقیاس و انتقال در تبدیل موجک

در تبدیل موجک، مانند تبدیل فوریه، سیگنال به اجزای تشکیل‌دهنده تجزیه می‌شود. در تبدیل فوریه، سیگنال

- فرکانس شتاب‌نگاشت زلزله، تبدیل موجک - سیگنالهای ساده‌تری بررسی می‌شود. برای این منظور، ابتدا مثالی از تبدیل موجک سری زمانی معادله ۲ محاسبه می‌شود. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، مقدار $|WT|$ در محل‌هایی که متناظر با مقیاسهای (پریودهای) ۳، ۵ و ۱۰ است، کانتورهای هم‌مرکز نشان داده شده است. این نشان‌دهنده اهمیت این فرکانسها در سیگنال اصلی است. همچنین از ابتدا تا انتهای بازه زمانی، شدت رنگ در این سه مقیاس (پریود) تقریباً برابر بوده و بنابراین سه پریود مذکور در کل بازه زمانی، حضور داشته‌اند.



شکل ۵ سیگنال کسینوسی به‌ازای مقیاسهای مختلف

اکنون سیگنالی با معادله ۳ را در نظر بگیرید. مؤلفه‌های فرکانسی این سیگنال مانند مثال قبل بوده، اما در سه زمان متفاوت ظاهر شده‌اند. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که به‌ازای پریود ۳ ثانیه، در بازه صفر تا ۱۵ ثانیه، به‌ازای پریود ۵ ثانیه، در بازه زمانی ۱۵ تا ۴۰ ثانیه و به‌ازای پریود ۱۰ ثانیه در بازه زمانی ۴۰ تا ۶۰ ثانیه، منحنی پررنگ‌تر بوده و در سایر مکانها روشتر است.

معادله $\cos(\delta t)$ به‌ازای مقیاسهای متفاوت نشان داده شده که با پارامتر مقیاس باز یا بسته می‌شود. در این شکل کوچکترین و بزرگترین مقیاس به‌ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۱۰ است.

۵- خصوصیات تبدیل موجک

در تبدیل موجک، موجکها توابع منظمی بوده و فقط در فرکانسهای مثبت تعریف می‌شوند. در تبدیل موجک از هر تابعی که دارای دو خصوصیتهای ذکر شده در ذیل باشد، می‌توان به‌عنوان تابع مادر استفاده کرد:

۱- اندازه تابع مادر $|g(t)|$ باید به‌سرعت به صفر میل کند. این ویژگی خصوصیت موضعی بودن تحلیل موجک را تضمین می‌کند.

۲- موجک $g(t)$ باید مقدار متوسط صفر داشته باشد. این شرط برگشت‌پذیر بودن تبدیل موجکی را تضمین کرده و در نتیجه موج مرجع را می‌توان از ضرایب موجک به‌کمک تبدیل معکوس موجک به‌دست آورد [۹، ۱۰].

۶- تبدیل معکوس موجک

در صورتی که تابع مادر، خصوصیات ذکر شده در قسمت قبل را داشته باشد، تبدیل موجک برگشت‌پذیر بوده و با استفاده از رابطه زیر می‌توان موج اصلی را بازسازی کرد [۱۰]:

$$x(t) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WT(\tau, b) b^{-\tau} g_{\tau b} d\tau db \quad (10)$$

که در آن:

$$c^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} (\omega^{-1} |G(\omega)|^2) d\omega \quad (11)$$

و $G(\omega)$ تبدیل فوری تابع $g(t)$ است.

۷- تجزیه زمان - فرکانس دو سیگنال سینوسی

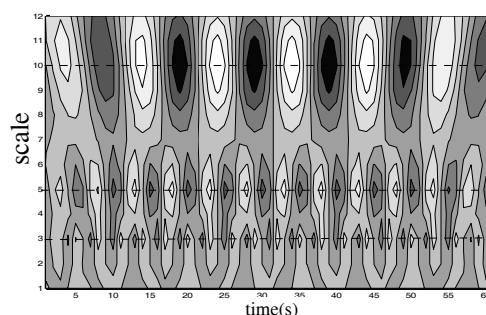
قبل از استفاده از روش تبدیل موجک برای تجزیه زمان

این مشاهدات با سیگنال اصلی کاملاً همخوانی دارد. به بیان دیگر هر یک از مؤلفه‌های فرکانسی در بازه‌های زمانی متفاوتی حضور داشته‌اند. با مشاهده شکل می‌توان به این نتیجه رسید که با استفاده از تبدیل موجک می‌توان زمان وقوع پیوندها (عکس فرکانس) را مشخص کرد. قدر مطلق تبدیل موجک برای سیگنال مذکور در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشینه مقدار $|WT|$ متناظر با پارامتر مقیاس، معادل دوره تناوب مؤلفه‌های سیگنال است.

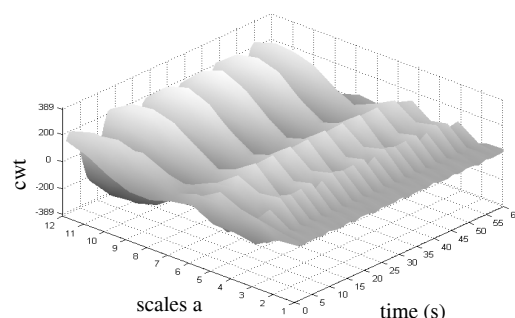
۸- تبدیل زمان - فرکانس برای شتاب‌نگاشت زلزله ناغان

در این قسمت، تبدیل فوریه و تبدیل موجک برای شتاب‌نگاشت زلزله ناغان محاسبه می‌شود.

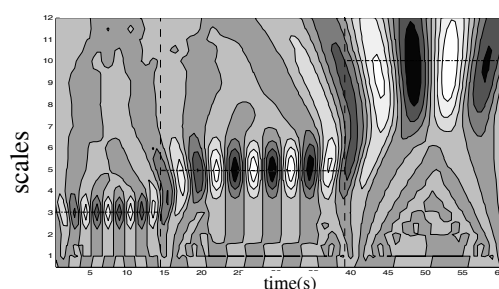
در شکل‌های ۸ و ۹ منحنی شتاب‌نگاشت و تبدیل فوریه زلزله ناغان نشان داده شده و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تبدیل موجک زلزله مذکور آورده شده است. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود که بزرگترین فرکانسی که در طیف فوریه این زلزله حضور دارد برابر $3/2$ بوده که تقریباً متناظر با مقیاس $0/3$ است. بازه فرکانسی $2/7$ تا $3/4$ نیز بیشترین مقدار تبدیل فوریه را دارد که در واقع همان محدوده فرکانسی حداکثر بوده و متناظر با بازه مقیاس $0/29$ تا $0/38$ است. با رجوع به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و خروجی برنامه تهیه شده برای این منظور [۱۱]، می‌توان در مورد لحظه وقوع هر یک از فرکانسها در حوزه زمان بحث کرد. به عنوان مثال زمان وقوع فرکانس $3/2$ متناظر با مقیاس $0/3$ ، لحظه $1/6$ ثانیه است. همچنین زمان وقوع بازه فرکانسی $2/7$ تا $3/4$ ، بازه زمانی $1/45$ تا $2/4$ ثانیه است. به بیان دیگر این بازه زمانی در واقع خطرناکترین بازه برای تمام سازه‌هایی است که فرکانس آنها با فرکانس غالب زلزله یکسان یا به آن نزدیک است. با مقایسه فرکانس ساختمانها با فرکانس غالب زلزله ناغان،



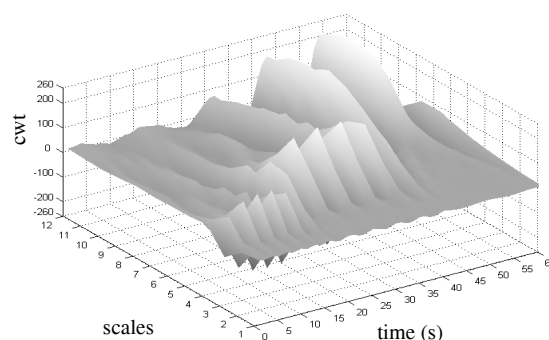
شکل ۶ الف) منحنی دو بُعدی CWT برای سیگنال معادله ۲



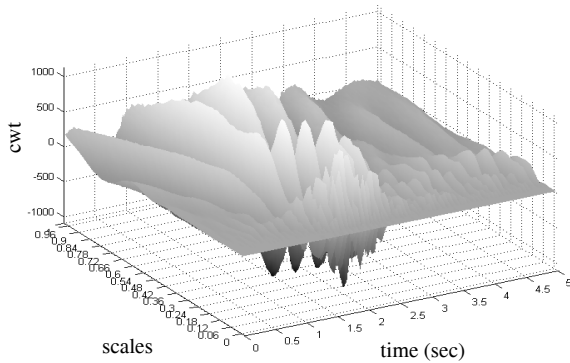
شکل ۶ ب) منحنی سه بُعدی CWT برای سیگنال معادله ۲



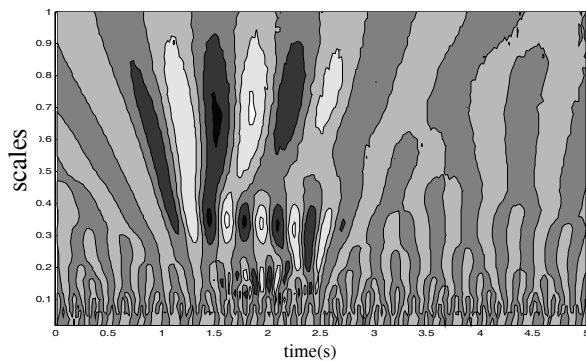
شکل ۷ الف) منحنی سه بُعدی CWT برای سیگنال معادله ۳



شکل ۷ ب) منحنی دو بُعدی CWT برای سیگنال معادله ۳



شکل ۱۰ تبدیل موجک پیوسته سه‌بعدی زلزله ناغان



شکل ۱۱ تبدیل موجک پیوسته دو‌بعدی زلزله ناغان

جدول ۱ زمان - فرکانس زلزله ناغان

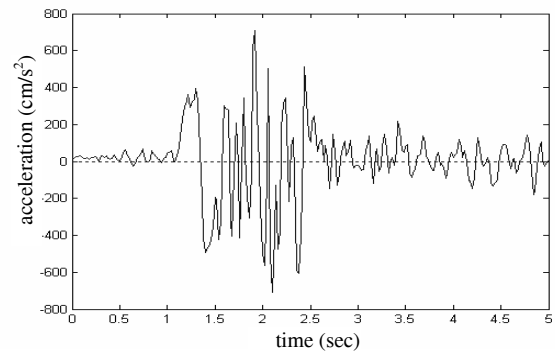
فرکانس	تبدیل فوری	پریود	مقیاس	تبدیل پیوسته موجک	زمان وقوع
۳/۲	۷۴	۰/۳۱	۰/۳	۱۱۲۰	۱/۶
بین ۲/۷ تا ۳/۴	-	بین ۰/۲۹ تا ۰/۳۸	بین ۰/۲۹ تا ۰/۳۸	بین ۱۱۰۰ تا ۱۱۲۰	بین ۱/۴۵ تا ۲/۴

۹- نتیجه گیری

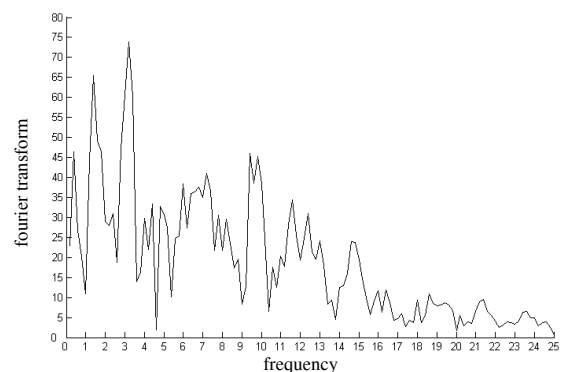
همانطور که مشاهده می‌شود تبدیل موجک روشی توانا برای تجزیه شتاب‌نگاشت زلزله است. با استفاده از این روش علاوه بر محاسبه فرکانسهای زلزله می‌توان زمان وقوع آنها را نیز به دست آورد. روش ارائه شده کلی بوده

میزان خرابی هر ساختمان نسبت به زلزله مشخص می‌شود. برای زلزله ناغان فرکانس غالب تقریباً برابر ۳/۲ است. این فرکانس تقریباً با فرکانس ساختمانی با قاب فولادی به ارتفاع ۶/۱۵ متر برابر است. برای این سازه خاص - به دلیل نزدیکی فرکانس سازه با فرکانس غالب زلزله در لحظه ۱/۶ ثانیه پس از شروع زلزله، پدیده تشدید یا رزونانس در سازه اتفاق افتاده و سازه از نظر تئوری خراب می‌شود.

به طور مشابه می‌توان لحظه وقوع سایر فرکانسهای را که در زلزله اتفاق می‌افتند به دست آورد و در مورد هر یک از آنها با توجه به اندازه و زمان حادث شدن و اینکه بر چه نوع ساختمانی تأثیر بیشتری دارند، بحث کرد. خلاصه مباحث فوق در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۸ منحنی شتاب - زمان زلزله ناغان



شکل ۹ تبدیل فوری زلزله ناغان

- Earthquake by Discrete Wavelet Transform,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 62, 2005, pp. 2178-2192.
- [6] Salajegheh, E.; Heidari A.; “Optimum Design of Structures Against Earthquake by Wavelet Transforms and Filter Banks”, International Journal of Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol. 34, 2004, pp. 67-82.
- [7] Bendat, J. S.; Piersol, A. G.; “Random Data. Analysis and Measurement Procedures”. John Wiley and Sons, NewYork; 1986.
- [8] Polikar, R.; “The Wavelet Tutorial”, [http://users.rowan.edu/~polikar/WAVEL_ETS /Wttutorial.html](http://users.rowan.edu/~polikar/WAVEL_ETS/Wttutorial.html); 2001.
- [9] Emery, W. J.; Thomson, R. E.; “Data Analysis Methods in Physical Oceanography”, Pergamon Press, Oxford; 1997.
- [10] Farge, M.; “Wavelet Transform and their Applications to Turbulence”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 24, 1992; pp. 395–457.
- [۱۱] جلیلی، د. «تجزیه شتاب‌نگاشت زلزله با استفاده از تبدیل موجکی»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف آباد، تابستان ۱۳۸۵.
- و برای هر نوع شتاب‌نگاشت زلزله قابل کاربرد است. نتایج حاصل از این مثال و مثالهایی متعددی که در [۱۱] ارائه شده، نشان‌دهنده توانایی این روش در محاسبه زمان وقوع فرکانسهای تشکیل‌دهنده شتاب‌نگاشت زلزله است.

۱۰- منابع

- [1] Salajegheh, E.; Heidari, A.; “Dynamic Analysis of Structures Against Earthquake by Combined Wavelet Transform and Fast Fourier Transform”, Asian Journal of Structural Engineering, Vol. 3, 2002; pp. 75-87.
- [2] Salajegheh, E.; Heidari, A.; “Time History Dynamic Analysis of Structures Using Filter Banks and Wavelet Transforms”, Computers and Structures, Vol. 83, 2005; pp. 53-68.
- [3] Heidari, A.; Salajegheh, E.; “Time History Analysis of Structures for Earthquake Loading by Wavelet Networks”, Asian Journal of Structural Engineering, Vol. 7, 2006; pp. 155-168.
- [4] Salajegheh, E.; Heidari, A.; “Optimum Design of Structures Against Earthquake by Adaptive Genetic Algorithm Using Wavelet Networks”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 28, 2004; pp. 277-285.
- [5] Salajegheh, E.; Heidari, A.; Saryazdi, S.; “Optimum Design of Structures Against

