

# شناسایی مفصل خمیری در تیر ساده تحت اثر زلزله با محاسبه‌ی دیاگرام انحناء

رضا کرمی محمدی\* (دانشیار)

معین خلیج (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)  
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۹۹-۱۰۳، (پادداشت نمی)

در این نوشتار، روش جدیدی برای شناسایی خرابی تیر دو سر مفصل ارائه شده است، که در آن با استفاده از ابزار تغییرات انحناء در طول تیر حین زلزله به شناسایی مفاصل خمیری ایجاد شده در تیر پرداخته شده است. در این نوشتار ابتدا سعی شده است که خرابی از نوع ترک مصنوعی (ترک ایجاد شده در تیر قبل از اعمال بارگذاری) با استفاده از ابزارهای موجود در روش‌های پردازش سیگنال و همچنین روش تغییرات بردار انحناء خرابی از نوع مفصل خمیری شناسایی شود. در ادامه، روش مذکور بسط و گسترش داده شده و از آن برای شناسایی خرابی از نوع مفصل خمیری در یک تیر در طول بارگذاری زلزله استفاده شده و در نهایت، دقت روش ذکر شده و مزیت‌های آن نسبت به روش‌های موجود پردازش سیگنال نظیر تبدیل موجک بیان شده است.

rkarami@kntu.ac.ir  
mkhalaj@mail.kntu.ac.ir

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، مفصل خمیری، انحنای خمیری، تبدیل موجک.

## ۱. مقدمه

تقسیم شوند. روش‌های موضعی فقط توانایی شناسایی آسیب در نزدیکی سطح سازه را دارند، لذا روش‌های دیگری که مبتنی بر پاسخ سازه هستند، به منظور تسهیل در بررسی سازه‌های پیچیده ارائه شده‌اند، که به آنها روش‌های جامع می‌گویند،<sup>[۱]</sup> که یکی از جدیدترین آن‌ها، روش پردازش سیگنال پاسخ سازه با استفاده از تبدیل موجک است.<sup>[۲]</sup> به منظور شناسایی تغییرات در پاسخ سازه، که از وجود خرابی در سازه خبر می‌دهد، از تبدیل موجک استفاده می‌شود. تبدیل موجک ابزارهای ریاضی قدرتمندی را در اختیارمان می‌گذارد، هر چند که این ابزار بسیار قدرتمند است و توانایی فشرده‌سازی،<sup>[۳]</sup> و یا بسط یک سیگنال، حذف نویزهای آن و حتی شناسایی محل‌های نقاط تکیه در سیگنال را دارد،<sup>[۴]</sup> اما ابزار ریاضی مذکور نقص‌هایی را با خود به همراه دارد که گاهی محل خرابی را به اشتباه تشخیص می‌دهد. همچنین برای شناسایی خرابی با استفاده از ابزار تبدیل موجک غالباً از سیگنال پاسخ شکل مودی،<sup>[۵]</sup> و یا تغییر شکل استاتیکی یا پاسخ‌های بسامدی سازه،<sup>[۶]</sup> استفاده می‌شود. شناسایی خرابی با استفاده از هر یک از سیگنال‌های ذکر شده، مشکلاتی را با خود به همراه دارد، مثلاً پاسخ بسامدی محل دقیق خرابی را نشان نمی‌دهد و یا تغییر شکل استاتیکی، توانایی آشکارسازی خرابی حین زلزله را ندارد و حتی شکل مودی که نسبتاً به دو روش دیگر ارجحیت دارد، نیز توانایی شناسایی خرابی از نوع ناحیه‌ی خمیری را ندارد. یکی از روش‌های تشخیص خرابی، استفاده از میزان شباهت شکل مودی سازه قبل و بعد از خرابی است. برای این منظور، پارامتر MAC تعریف شده است، که نشان‌دهنده‌ی میزان شباهت دو شکل مودی است. برای دو شکل مودی برداری  $\phi_a$  و  $\phi_b$  مربوط به حالت  $a$ ،  $b$  از سازه، این پارامتر به صورت رابطه‌ی ۱

پس از جنگ جهانی دوم، صنعت ساخت و ساز در سراسر جهان توسعه یافته است. با وجود این، مدت زمان بهره‌برداری از سازه‌های ساخته شده به دست بشر محدود است و تحت هیچ شرایطی ابدی نیست. گذر زمان و وجود عوامل داخلی و خارجی باعث می‌شود که اجزاء سازه دچار آسیب شود. همچنین سازه تحت باربرداری دچار مشکلات جدی و حتی انهدام شود. کشف زود هنگام آسیب می‌تواند از خرابی فاجعه‌بار سازه جلوگیری کند. همچنین تشخیص به موقع آسیب و اقدام در جهت رفع عیوب آن، باعث افزایش عمر مفید سازه می‌شود. از این رو، در دهه‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه‌ی شناسایی آسیب در سازه‌ها صورت گرفته و توسعه‌ی سازه‌های هوشمند و پایش سلامت سازه‌ی در رشته‌ی مهندسی عمران در دهه‌ی اخیر، جذابیت خاصی داشته و توجه جامعه‌ی دانشگاهی، پژوهشگران، و صنعت را به خود جلب کرده است.<sup>[۱]</sup> ایده‌ی اصلی کاربرد روش مذکور از صنعت هوافضا و اتومبیل گرفته شده، اما کاربرد آن در صنعت ساخت عمرانی در دهه‌های اخیر به شکل چشم‌گیری افزایش یافته است. به طور کلی، هدف از پایش سلامت سازه، ارزیابی دقیق شرایط فعلی سازه و تصمیم‌گیری مناسب در زمینه‌ی نگهداری یا بازسازی احتمالی آن است. با توجه به نوع داده‌های مورد مطالعه و روش‌های مختلف جمع‌آوری داده‌ها، روش‌های متعددی جهت پایش سلامت سازه وجود دارد.<sup>[۲]</sup>

روش‌های شناسایی آسیب می‌توانند به دو گروه کلی یا جامع و محلی یا موضعی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۱۰، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۲۶.

تعریف می شود:

$$MAC(\phi_a, \phi_b) = \frac{|\phi_a^T \phi_b|^2}{(\phi_a^T \phi_a)(\phi_b^T \phi_b)} \quad (1)$$

مقدار پارامتر MAC، عددی بین صفر و ۱ است و مقادیر بزرگ تر آن، بیانگر شباهت بیشتر بین دو مود است، که حاکی از خرابی کمتر در سازه است.

استفاده از انحنای شکل مودی، یکی از پرکاربردترین روش ها در تعیین آسیب سازه‌ی است و بر این فرض استوار است که تغییرات در انحنای شکل مودی در محل متناظر با خرابی، تمرکز بیشتری دارد. انحنای به صورت مشتق دوم شکل مودی تغییر مکانی تعریف می شود. انحنای شکل مودی در مقایسه با شکل مودی، حساسیت بیشتری نسبت به آسیب دیدگی دارد. مفهوم انحنای شکل مودی در سال ۱۹۹۱ ارائه شده و با استفاده از مدل المان محدود یک تیر طره‌ی و یک تیر ساده، انحنای شکل مودی متناظر با حالت سالم و آسیب دیده‌ی آن‌ها استخراج شده است. نتایج مربوط به تیر ساده با آسیب منفردی که به صورت کاهش مدول کشسانی مدل شده است، نشان می‌دهد که انحنای شکل مودی در مقایسه با MAC نسبت به آسیب دیدگی، به میزان قابل توجهی حساس تر است.<sup>[۱۰]</sup> برخی از پژوهشگران با استفاده از انحنای شکل مودی به شناسایی خرابی‌های چندگانه در یک تیر طره پرداخته و برای پرهیز از نقص‌های تبدیل موجک و همچنین شناسایی خرابی از نوع مفصل خمیری از خود تابع انحنای استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۱]</sup>

جهت صحت‌سنجی تابع انحنای، ابتدا به کمک تابع‌های تغییر مکان یک تیر دو سر ساده، خرابی از نوع ترک (ترک موجود در تیر قبل از اعمال بار) شناسایی و سپس در یک تحلیل پوش‌آور سعی می‌شود تا ناحیه‌ی خمیری در تیر توسط تابع انحنای شناسایی شود. در نهایت، به کمک تابع انحنای، ناحیه‌ی خمیری ایجاد شده در یک تیر دو سر ساده تحت اثر رکورد زلزله شناسایی می‌شود. در این نوشتار، روش‌هایی برای تعیین محل و زمان ایجاد ناحیه‌ی خمیری در تیر و قاب در حین وقوع زلزله ارائه شده است. در واقع، به جای آنکه قبل از بارگذاری ترک به شکل مصنوعی در سازه مدل شود، به وسیله‌ی بارگذاری در تیر و یا قاب ناحیه‌ی خمیری ایجاد شده، محل و زمان تشکیل آن شناسایی می‌شود. هدف در این نوشتار، ارائه‌ی روشی برای تشخیص خرابی سازه‌ها با استفاده از شیب یا انحنای سازه است و در ادامه نشان داده شده است که نتایج حاصل از روش مذکور، دقت کافی در نشان دادن محل و حتی میزان خرابی را دارند. نحوه‌ی محاسبه‌ی منحنی‌های مذکور در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

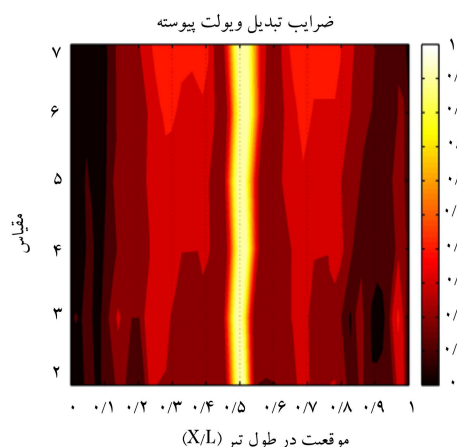
## ۲. شناسایی محل ترک مصنوعی

### ۱.۲. شناسایی با استفاده از اختلاف مودی

سولیس و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۸]</sup> از تبدیل موجک برای تشخیص ترک در حالت‌های متفاوت در یک تیر دو سر ساده استفاده کرده و تیر ساده‌ی فولادی به طول تیر ۱٫۲۸ متر، ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر، پهنای بال ۵۰ میلی‌متر، ضخامت بال ۶٫۸ میلی‌متر، ضخامت جان ۴٫۵ میلی‌متر، و وزن تیر در هر متر طول ۱٫۸ کیلوگرم را تحت آزمایش قرار داده‌اند. ترک در نظر گرفته شده در پژوهش مذکور در شکل ۱ ارائه شده است. تیر مذکور در آزمایشگاه تحت تحریک قرار گرفته و بعد از استخراج شکل‌های مودی، مقدار اختلاف آن‌ها قبل و بعد از خرابی به دست آمده و سپس با استفاده از تبدیل موجک ضرایب تبدیل موجک اختلاف بین شکل‌های مودی برای مطالعه استخراج شده و در نهایت، ضرایب تبدیل موجک برای مودهای مختلف



شکل ۱. نمونه‌ی ترک ایجاد شده در پژوهش سولیس و همکاران.<sup>[۸]</sup>



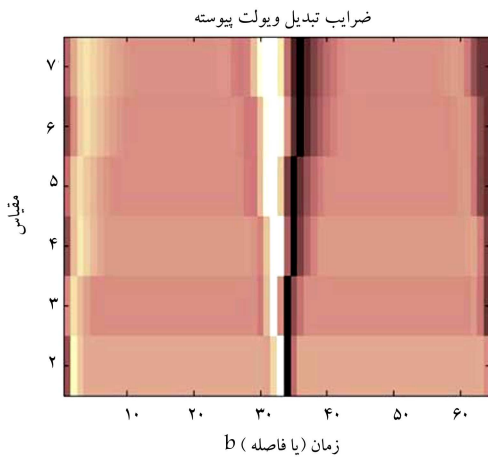
شکل ۲. ضرایب موجک پیوسته‌ی تیر دو سر مفصل با استفاده از اختلاف شکل مودی با استفاده از پاسخ ۶۵ نقطه.<sup>[۸]</sup>

با یکدیگر جمع شده است تا بتوان رفتار کلی سازه را ارزیابی کرد. برای جمع کردن شکل‌های مودی، با استفاده از روش تابع وزنی، تأثیر هر مود که مشارکت بیشتری دارد، بیشتر دخالت داده شده و مودهایی که بسامدهای ارتعاشی آن به واسطه‌ی خرابی دچار تغییر نشده‌اند، حذف شده‌اند. در مدل بررسی شده با استفاده از توسعه‌ی شکل‌های مودی، تأثیر افزایش ضرایب تبدیل موجک در نقاط ابتدا و انتهای شکل‌های مودی حذف شده است. در پژوهش سولیس و همکاران از تابع موجک دوآبچیس برای محاسبه‌ی ضرایب موجک اختلاف بین شکل‌های مودی و از روش‌های جمع وزنی برای در نظر گرفتن تأثیرات متفاوت مودهای مختلف استفاده شده است. از رابطه‌ی ۲ نیز برای جمع کردن شکل‌های مودی استفاده شده است:

$$CWT_{sum}(u, s) = \sum_{i=1}^N |CWT_{diff}^i(u, s)| / \left(1 - \frac{\omega_u^i}{\omega_d^i}\right)^2 \quad (2)$$

که در آن،  $CWT_{sum}$  ضریب موجک اصلاح شده‌ی تابع اختلاف مودی،  $CWT_{diff}^i$  برابر ضریب موجک تابع اختلاف مودی،  $\omega_u^i$  و  $\omega_d^i$  به ترتیب بسامد مود  $i$ ام برای حالت آسیب ندیده و آسیب دیده هستند.

شکل ۲، نمودار ضریب موجک پیوسته‌ی تابع اختلاف مودی وزن داده شده برای تیر ساده‌ی است که در وسط دهانه‌ی آن، ترکی به عمق ۳ میلی‌متر ایجاد شده است، که مطابق آن در محل ایجاد ترک، ضریب موجک دچار جهش شده است. نتایج به دست آمده حاصل از قرارت پاسخ ۶۵ نقطه در طول تیر ساده هستند.



شکل ۴. نمودار ضرایب موجک پیوسته‌ی تیر دو سر مفصل تحت خمش خالص ۳۰ kn با استفاده از پاسخ ۶۵ نقطه.

آشفستگی مرزی را از بین برد (جزئیات این بحث را می‌توان در پژوهش مذکور بررسی کرد).

### ۳. شناسایی مفصل خمیری

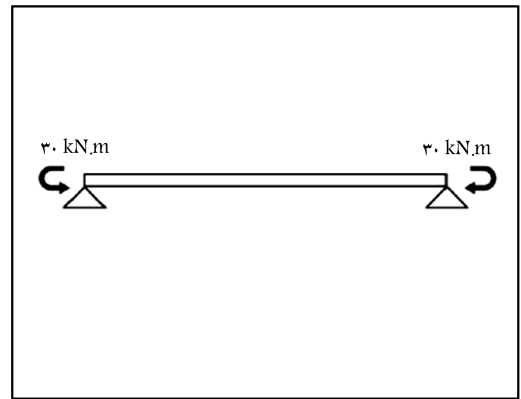
همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، غالباً خرابی در سازه‌ها در حین زلزله، انفجار، یا هر تحریک دیگر به شکل ایجاد ناحیه‌ی خمیری در تیرها، ستون‌ها، و اعضای سازه‌ی است. در این بخش به شناسایی ناحیه‌ی خمیری ایجاد شده در تیر مدل شده در بخش‌های پیشین پرداخته شده است. برای ایجاد ناحیه‌ی خمیری در تیر، تیر تحت آنالیز پوش‌آور قرار گرفته و مکان ایجاد ناحیه‌ی خمیری و همچنین گستردگی ناحیه‌ی خمیری شدن تحت تأثیر دو عامل الگوی پوش و نوع بارگذاری ثقلی استاتیکی بررسی شده است. مدل‌سازی تیر دقیقاً شبیه همان مدل ساخته شده در مراحل قبل است. تفاوت این مدل با مدل‌های بخش‌های قبل فقط در این است که در تیر، ترک مصنوعی وجود ندارد. در این بخش الگوی بار استاتیکی به صورت بارگسترده بوده و الگوی پوش بار نیز به صورت متمرکز و نقطه‌ی در وسط تیر انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمودار نیروی برشی - تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر با الگوی بار ثقلی یکنواخت و الگوی پوش یکنواخت و گسترده نشان می‌دهد که وسط تیر بعد از ۴/۳ میلی‌متر پوش، وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده است.

در این بخش برای شناسایی خرابی در تیر از اختلاف انحنای تیر آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده استفاده شده است. مطابق با رابطه‌ی ۴، ابتدا اختلاف انحنا (مشتق دوم تغییرمکان) تیر آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده محاسبه شده و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۵، تبدیل موجک پیوسته برای محاسبه‌ی ضرایب موجک تابع اختلاف انحنا با استفاده از موجک db۲ محاسبه شده است، که در آن بردار  $S$  بردار اختلاف دو بردار انحنا تیر در دو حالت مجزا است.

$$\{s\} = \{y''\} - \{y''\} \quad (4)$$

$$\{C\} = CWT(\{S\}) \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۴،  $\{y''\}$  و  $\{y''\}$  بردارهای انحنای تیر در گام‌های زمانی مختلف، و  $\{s\}$  بردار اختلاف بین بردارهای انحنا در دو گام زمانی مختلف هستند. مطابق



شکل ۳. تیر مدل شده در بخش ۲.۲.

### ۲.۲. شناسایی با استفاده از منحنی تغییر شیب تیر

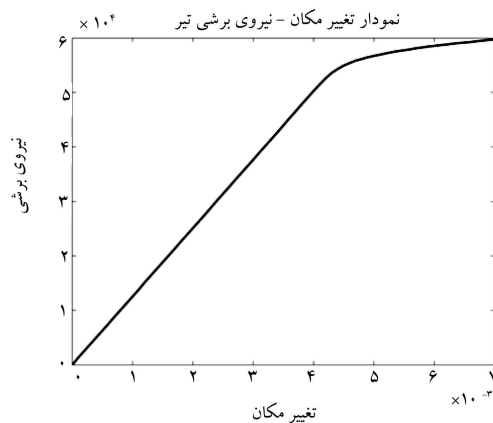
در این بخش تیر مورد مطالعه‌ی سولیس و همکاران (۲۰۱۳) با همان ترک مصنوعی در وسط تیر مورد مطالعه قرار گرفته است. ترک در این بخش، ترکی به عمق ۳۰ میلی‌متر است، که در نرم‌افزار آپن‌سیس<sup>۱</sup> به صورت حذف بال کششی و بخشی از جان مقطع وسط تیر مدل شده است (شکل ۱). تیر دو سر مفصل سولیس و همکاران مدل شده است، با این تفاوت که جرم تیر به صورت نیمه‌گسترده در ۶۵ نقطه در طول تیر است، که در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متری از هم قرار دارند. مطابق شکل ۳، تیر تحت خمش ۳۰ کیلو نیوتن متر خالص قرار گرفته و به صورت استاتیکی آنالیز شده است. در ادامه نشان داده شده است که چگونه خرابی با استفاده از منحنی شیب اعضای سازه‌ی آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده شناسایی شده است. اساس کار برای شناسایی خرابی در این بخش، مقایسه‌ی ضرایب موجک قبل و بعد از خرابی است. تیر ذکر شده در این بخش تحت بارگذاری متمرکز (لنگر متمرکز) قرار گرفته و تغییرمکان ( $y$ ) و شیب تغییرمکان (زوایای نقاط تیر  $y'$ ) آن در سراسر تیر از مدل عددی استخراج شده و سپس تغییرات شیب تیر (اختلاف بردار زوایای سازه‌ی آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده) محاسبه شده است (رابطه‌ی ۳):

$$\{S\} = \{y'\} (undamaged) - \{y'\} (damaged) \quad (3)$$

حال اگر از منحنی تغییرات شیب، موجک پیوسته گرفته شود، تغییرات ضریب موجک در وسط تیر نشان دهنده‌ی ترک در این محل خواهد بود. مقایسه‌ی شکل ۳، که حاصل نتایج مطالعات سولیس و همکاران (۲۰۱۳) است، با شکل ۴ بیان‌گر آن است که در روش ارائه شده بدون محاسبه‌ی شکل مودی تیر و فقط با محاسبه‌ی شیب تیر می‌توان ترک را در وسط تیر شناسایی کرد.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مرزهای شکل مقادیر ضریب موجک جهش دارند، که این به دلیل پدیده‌ی به نام آشفستگی مرزی یا تأثیر مرزی است. اصولاً تبدیل موجک برای یک فاصله‌ی نامحدود تعریف می‌شود، ولیکن سیگنالی که از آن تبدیل موجک گرفته می‌شود، محدود است و ابتدا و انتهای دارد؛ لذا وقتی از سیگنال تبدیل موجک گرفته می‌شود، شاهد رفتار تکین در ابتدا و انتهای سیگنال هستیم که این باعث جهش در ضریب تبدیل موجک سیگنال مربوط می‌شود و این امر تشخیص خرابی را سخت می‌کند.<sup>[۱۳] [۱۴]</sup> برای رفع مشکل ذکر شده باید سیگنال به شکل نرم و بدون شکستگی از ابتدا و انتها گسترش یابد و با استفاده از روش پیشنهادی در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،<sup>[۱۴]</sup> می‌توان اثر

شده است، محاسبه شود و ضریب موجک پیوسته‌ی آن نیز به دست آید، مشاهده می‌شود ضرایب موجک در وسط دهانه‌ی تیر دچار جهش شده‌اند، که این بیانگر ایجاد ناحیه‌ی خمیری در آن نقطه است. خطوط پدیدآمده در وسط دهانه در شکل ۷ نیز بیانگر افزایش ضریب تبدیل موجک پیوسته و ایجاد شدن ناحیه‌ی خمیری در آن مقطع از تیر است. لازم به ذکر است این افزایش در جایی که در همسایگی آنها نیز جهش‌های پراکنده وجود داشته باشد، بیانگر ایجاد ناحیه‌ی خمیری در آن قسمت از تیر است.



شکل ۵. نمودار نیروی برشی و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر ساده تحت آنالیز پوش‌آور با الگوی بار پوش یکنواخت.

#### ۴. شناسایی خرابی سازه در زلزله با استفاده از تابع انحنا

هدف نهایی در این نوشتار، شناسایی نواحی خمیری تیر دو سر ساده تحت بارگذاری‌های واقعی نظیر بارگذاری زلزله با استفاده از اطلاعات شتاب‌سنج‌هاست. در واقع، در این بخش خرابی در تیر ساده با اطلاعاتی که در واقعیت قابل برداشت هستند، شناسایی شده است. در مرحله‌ی قبل، اطلاعات مورد نیاز نظیر تغییر مکان از خروجی‌های مدل عددی به دست آمده است، در حالی که در واقعیت اطلاعات در دسترس، فقط اطلاعات خروجی شتاب‌سنج‌ها هستند. در این نوشتار، برای شناسایی ناحیه‌ی خمیری در یک تیر از پارامتر انحنا استفاده شده است، زیرا هر چقدر مشتق‌های درجه‌ی بالاتر تغییر مکان استفاده شود، این پارامترها نسبت به وجود خرابی حساسیت بیشتری دارند.

برای هر شتاب‌سنج به تعداد گام‌های زمانی زلزله، داده وجود دارد. برای محاسبه‌ی انحنای تیر در هر گام زمانی نیاز به دانستن و محاسبه‌ی انحنای تیر در محل گره‌هایی است که شتاب‌سنج‌ها بر روی آن نصب شده‌اند. به منظور محاسبه‌ی انحنای تیر در تمام گام‌های زمانی با ۲ بار انتگرال‌گیری عددی نسبت به زمان از سیگنال پاسخ شتاب تیر در هر گام زمانی، تغییر مکان آن نقطه از تیر مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه شده است. به این ترتیب با بسط این روش برای تمام حسگرها، تغییر مکان کل تیر در هر گام زمانی در حین زلزله قابل محاسبه است. در هر گام زمانی با ۲ بار مشتق‌گیری عددی تغییر مکان تیر نسبت به  $x$  (فاصله‌ی محل نصب شتاب‌سنج‌ها از یک تکیه‌گاه) مطابق رابطه‌ی ۵ می‌توان سیگنال انحنای تیر را به دست آورد (روابط ۶ الی ۸):

$$\{\dot{y}_{i+1}\} = \{\dot{y}_i\} + \{\ddot{y}_i\} \Delta t \quad (6)$$

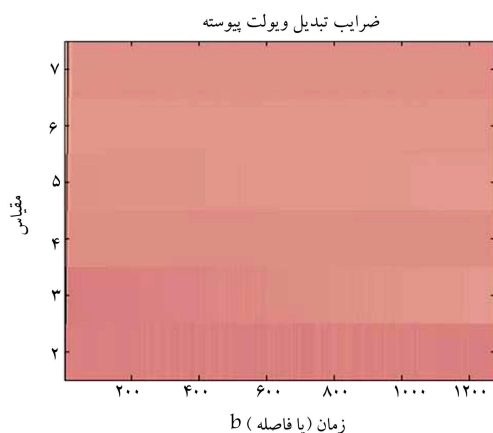
$$\{y_{i+1}\} = \{y_i\} + \{\dot{y}_i\} \Delta t \quad (7)$$

$$\{y_i''\} = \frac{d^2}{dx^2} \{y_i\} \quad (8)$$

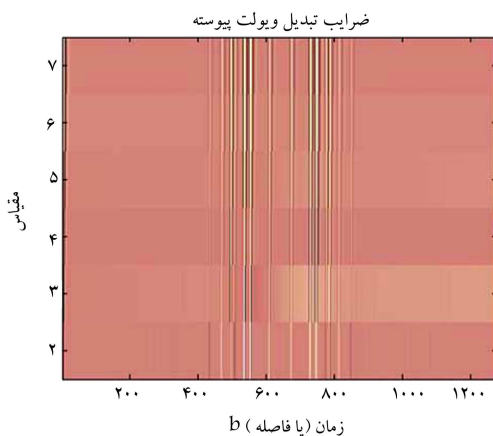
که در آن‌ها  $\{y_i\}$ ،  $\{\dot{y}_i\}$  و  $\{y_i''\}$  به ترتیب بردار تغییر مکان، سرعت، شتاب، و انحنای تیر در گام زمانی  $i$ ام است.

در دقت محاسبات عددی برای محاسبه‌ی انحنای دو عامل نقش بسیار تعیین‌کننده‌ی دارند: ۱. تعداد گام‌های زمانی؛ ۲. تعداد شتاب‌سنج‌هایی که سیگنال پاسخ شتاب تیر را ثبت می‌کنند. هر چقدر گام‌های زمانی انتگرال‌گیری بزرگ‌تر باشد، دقت محاسبات کمتر خواهد شد و هر اندازه تعداد شتاب‌سنج‌ها در طول تیر بیشتر باشد، دقت نتایج بالاتر خواهد رفت.

تیر مورد نظر تحت تأثیر شتاب زلزله‌ی چی‌چی<sup>۲</sup> قرار گرفته و سیگنال پاسخ شتاب تیر در هر گام زمانی در نقاط محل نصب شتاب‌سنج در طول تیر قرائت و از روی آن پاسخ شتاب انحنای تیر محاسبه شده است. رکورد شتاب زلزله‌ی چی‌چی بر حسب شتاب گرانش در شکل ۸ نمایش داده شده است، که علت استفاده از آن، بالا بودن بیشینه‌ی شتاب رکورد مذکور برای ایجاد ناحیه‌ی غیرخطی در تیر است.



شکل ۶. ضرایب موجک اختلاف انحنا در حالت کشسان برای الگوی پوش گسترده.



شکل ۷. ضرایب موجک اختلاف انحنا بین حالت کشسان و خمیری برای الگوی پوش گسترده.

شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد در زمانی که اختلاف انحنای تیر، در شرایطی که وسط تیر به مقدار ۲ و ۳ میلی‌متر پوش داده شده است، محاسبه شود و ضریب موجک پیوسته‌ی آن‌ها به دست آید، هیچ‌گونه جهشی در ضرایب موجک آنها پدید نمی‌آید. زیرا در هر دو مرحله، هیچ مقطعی از تیر وارد ناحیه‌ی غیرخطی نشده است. همچنین در شکل ۷ وقتی اختلاف انحنا، در شرایطی که وسط تیر ۲ و ۴/۵ میلی‌متر پوش داده

این نوشتار، دو معیار برای گزینش گام‌های زمانی که تیر مشکوک به خرابی است، ارائه شده است:

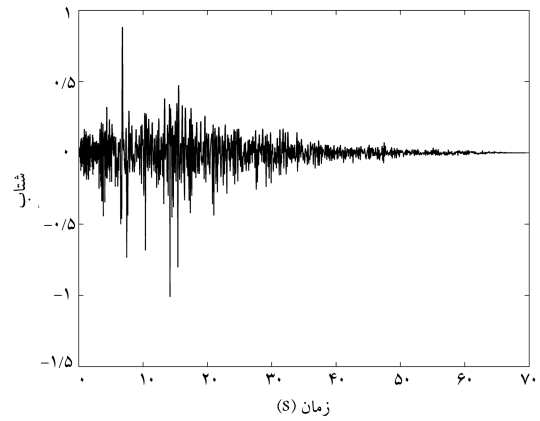
۱. معیار بیشینه‌ی مقدار مجموع: در این معیار، گام زمانی بحرانی است که در آن مجموع مقادیر مطلق انحنا در طول تیر بیشینه باشد.

۲. معیار بزرگ‌ترین مقدار انحنا: در این معیار، گام زمانی بحرانی است که بزرگ‌ترین درایه‌ی ماتریس انحنا در آن گام وجود داشته باشد. ماتریس انحنا، تیر، ماتریسی است که سطرهای آن برابر تعداد گام‌های زمانی زلزله و تعداد ستون‌های آن برابر تعداد شتاب‌سنج‌های نصب‌شده در طول تیر است. گام‌های زمانی مشکوک توسط دو معیار انتخاب شده، غالباً در اطراف گام زمانی متناظر با شتاب اوج زلزله قرار دارند. در این پژوهش از معیار دوم استفاده شده است. پس از انتخاب گام‌های زمانی مشکوک، از سیگنال انحنا، کل تیر در آن گام‌ها، تبدیل وولت گرفته می‌شود و در صورت وجود ناحیه‌ی خمیری در تیر در آن گام زمانی، نمودار انحنا، تیر دچار جهش و مشتق‌ناپذیری خواهد شد.

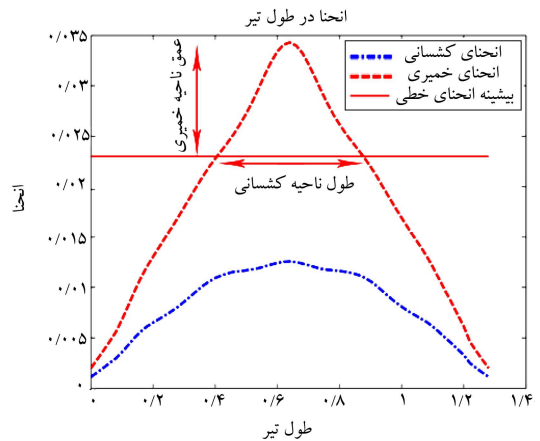
شکل ۹، نشان‌دهنده‌ی نمودار انحنا، تیر مورد آزمایش در دو گام زمانی متفاوت است: اول، گام زمانی که هنوز هیچ ناحیه‌ی غیرخطی در تیر پدید نیامده است، دوم، گامی که به علت ایجاد ناحیه‌ی خمیری در وسط تیر تحت بارگذاری دینامیکی، انحنا، تیر دچار بالازدگی شده و ناحیه‌ی مشتق‌ناپذیری در نمودار انحنا، تیر به وجود آمده است. این ناحیه‌ی مشتق‌ناپذیری می‌تواند ابزار خوبی برای شناسایی ناحیه‌ی خمیری تیر باشد. بنابراین با داشتن منحنی انحنا، تیر و انحنا، خط تسلیم (خط مستقیم در شکل ۹) حتی بدون نیاز به استفاده از تبدیل وولت، مستقیماً از روی شکل می‌توان محل و عمق خمیری شدن را تشخیص داد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، روش استفاده از تغییرات انحنا در طول تیر برای شناسایی خرابی به‌کار برده شده است، که توانایی شناسایی ترک و یا محل نواحی خمیری در طول تیر را دارد. در روش مذکور، جهش آبی در بردار انحنا، تیر و تجاوز مقدار انحنا از حد انحنا، خمیری، بیان‌گر ایجاد ناحیه‌ی خمیری در آن است. از مزایای روش ذکرشده می‌توان به حجم محاسبات نسبتاً کم و دقت قابل قبول آن اشاره کرد. با استفاده از این روش می‌توان اطلاعات تیر نظیر: تغییرمکان، انحنا، و نمودار لنگر را فقط با استفاده از اطلاعات ورودی ثبت‌شده توسط شتاب‌سنج‌ها به‌دست آورد. همچنین در روش پیشنهادی می‌توان محل و عمق ناحیه‌ی خمیری را بدون استفاده از تبدیل موجک پیوسته شناسایی کرد.



شکل ۸. رکورد زلزله‌ی چی‌چی.



شکل ۹. نمودار انحنا، تیر در طول آن در حالتی که مقطع وسط تیر کشسان و مقطع وسط تیر خمیری شده است.

قابل ذکر است در هر مرحله‌ی مشتق‌گیری، برای حذف نویزهای به‌وجودآمده ناشی از خطای محاسبات عددی از دستور `mslowess` در نرم‌افزار متلب استفاده شده است، تا خطای محاسبات به میزان کمینه کاهش یابد.

تحت یک رکورد زلزله، احتمال به‌وجودآمدن ناحیه‌ی خمیری در تیر در هر گام زمانی وجود خواهد داشت. برای بررسی وجود ناحیه‌ی خمیری در تیر باید انحنا، تیر در آن گام زمانی مورد بررسی قرار گیرد. که البته بررسی تمام گام‌های زمانی امری تقریباً محال است، لذا به معیاری برای انتخاب گام‌های زمانی بحرانی نیاز است. در

## پانویس‌ها

1. Opensees
2. ChiChi

## منابع (References)

1. Glisic, B. and Inaudi, D., *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 978-0-470-06142-8, 276 p. (2007).
2. Zhou, Z. "Vibration-based damage detection of simple bridge superstructures", PhD Thesis, in Depart-

- ment of Civil and Geological engineering, University of Saskatchewan (2006).
3. Doebling, S.W., Farrar, C., Prime, M.B. and Shevitz, D.W. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: A literature review", Los Alamos National Laboratory, United States (1996).
  4. Rucka, M. and Wilde, K. "Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates", *J. Sound Vib.*, **297**(3-5), pp. 536-550 (2006).
  5. Taha, M.M.R., Noureldin, A., Lucero, J.L. and Baca, T.J. "Wavelet transform for structural health monitoring: A compendium of uses and features", *Struct. Health Monit.*, **5**(3), pp. 267-295 (2006).
  6. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Eng. Struct.*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
  7. Surace, C. and Ruotolo, R. "Crack detection of a beam using the wavelet transform", in: *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, pp. 1141-1147 (1994).
  8. Algaba, M., Solis, M. and Galvin, P. "Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **40**(2), pp. 645-666 (2013).
  9. Fan, W. and Qiao, P. "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study", *Struct. Health Monit.*, **10**(1), pp. 83-111 (2011).
  10. Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. "Damage detection from changes in curvature modes hapes", *J. Sound Vib.*, **145**(2), pp. 321-332 (1991).
  11. Maosen, C., Maciej, R., Wei, X. and Wieslaw, O. "Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shape", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **46**(2), pp. 468-480 (2014).
  12. Rucka, M. and Wilde, K. "Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles", *Eng. Struct.*, **28**(2), pp. 279-288 (2006).
  13. Poudel, U.P., Fu, G. and Ye, J. "Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation", *J. Sound Vib.*, **286**(4-5), pp. 869-895 (2005).
  14. Messina, A. "Refinements of damage detection methods based on wavelet analysis of dynamical shapes", *Int. J. Solids Struct.*, **45**(14-15), pp. 4068-4097 (2008).