



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

چکیده

پیش بینی خرابی در سازه ها، تعیین محل و شدت خرابی، براساس محاسبه انرژی کرنشی مودال در این مقاله آورده شده است. معمولا خرابی باعث کاهش سختی در بعضی از عضوهای سازه می شود بنابراین پارامترهای مودال، شکل مودهای ارتعاشی و فرکانسهای طبیعی ارتعاش، در سازه آسیب دیده متفاوت با سازه اولیه می باشد. در این مقاله برای تعیین محل خرابی نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال برای تمام اعضای سازه محاسبه شده و اعضای دارای نسبت تغییرات انرژی کرنشی بزرگتر، به عنوان اعضای در معرض خرابی در نظر گرفته شده اند. سپس با محاسبه انرژی کرنشی مودال ترکیبی برای اعضای در معرض خرابی، شدت خرابی در این اعضا بصورت ضریب کاهش سختی تخمین زده شده است. مثالهای عددی شامل قابهای فولادی دو بعدی یک دهنه و دو طبقه با مقیاس ۱:۶ از یک سکوی ثابت دریایی موجود می باشد که توضیح داده شده است. با توجه به نتایج دیده می شود که این روش را می توان برای پیش بینی خرابی در این سازه ها بکار برد.

واژه های کلیدی: پیش بینی خرابی، آنالیز مودال، انرژی کرنشی.

مقدمه

تمامی سازه های باربر مانند ساختمانها، پلها، هواپیماها، فضاپیماها و سکوهای دریایی در طول زمان بهره برداری تحت تاثیر خرابیهای تجمعی ناشی از عوامل مختلف قرار دارند (Asgarian and Amiri, 2008). در گذشته روشهایی مانند استفاده از اشعه X، اسکن الکترونی، روشهای التراسونیک، شبیه سازی تشدید مغناطیسی، ضربه زدن، نفوذ رنگ و روش بازرسی چشمی برای بررسی خرابی و کنترل سیستمها بسط داده شده بودند، این روشها پرهزینه و وقت گیر بوده و برای پیش بینی موقعیت خرابی نیاز به در معرض دید بودن اعضای سازه دارند (Lam, 1994, Kosmatka and Ricles, 1999). روشهای تعیین خرابی معمولا در چهار سطح طبقه بندی می شوند: سطح ۱: تعیین وجود خرابی در سازه، سطح ۲: تعیین موقعیت هندسی خرابی، سطح ۳: مشخص کردن شدت خرابی و سطح ۴: پیش بینی باقیمانده عمر سازه (Doebbling et al., 1998).

خرابی باعث تغییر در مشخصات فیزیکی سازه مانند شکل مودهای ارتعاشی و فرکانسهای طبیعی ارتعاش می شود. این پارامترهای مودال مشخص کننده وضعیت سازه هستند، بنابراین در سالهای اخیر بر اساس تغییر در فرکانسهای طبیعی ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی یا ترکیبی از آنها روشهای مختلفی برای پیش بینی خرابی در سازه ها پیشنهاد شده است. شی روشهایی را بر اساس استفاده از تفاوت خارج قسمت انرژی عضو و تغییرات انرژی کرنشی مودال برای پیش بینی محل خرابی و بر اساس آنالیز حساسیت برای تعیین شدت خرابی پیشنهاد نمود (Shi et al., 1998, 2000). همچنین الگوریتمی را برای بهبود بخشیدن به تعیین شدت خرابی بر اساس تغییرات انرژی کرنشی مودال ارائه نمود (Shi et al., 2002). مانگال از بررسی آزمایشگاهی مدل یک سکوی ثابت دریایی برای تعیین سازگاری پاسخهای ارتعاشی ناشی از ضربه استفاده کرده و آنرا برای کنترل سازه ها بکار برد (Mangal et al., 1999). هو برای تخمین شدت خرابی روش جدیدی به نام روش انرژی کرنشی مودال ترکیبی را ارائه کرد که یک روش دقیق و غیر تکراری برای تعیین شدت خرابی می باشد (Hu et al., 2006). ادوادی روشی را بر اساس استفاده از اطلاعات مربوط به تعدادی از پارامترهای مودال اندازه گیری شده برای تعیین ماتریس سختی سیستمهای سازه ای و مکانیکی پیشنهاد کرد (Udwadia, 2005).

بعضی از محققان روشهایی را برای تعیین محل و اندازه خرابی در سکوهای ثابت دریایی و همچنین پیش بینی آسیبهای غیرمخرب در سازه های بزرگ و پیچیده بر اساس اطلاعات ارتعاشی بیان کردند (Stubbs et al., 1995, 2002)، یا روشهایی را برای تعیین خرابیهای موضعی در ساختمانهای چند طبقه بر اساس تغییر در سختی طبقه پیشنهاد کردند (Koh et al., 1995)، و یا روشهایی را بر اساس استفاده از اندیس خرابی برای تعیین محل و شدت خرابی در سیستم های سازه ای و مکانیکی ارائه نمودند (Barroso et al., 2004) و شکلهای جدیدی از اندیس خرابی را بر اساس تغییر در شرایط قابل قبول سازه بیان کردند (Stubbs et al., 2005). در تحقیقات زیادی، محققان روشهایی را برای پیش بینی خرابی در تیرها و سازه های خرابی بیان کردند (Liu, 1995, Vestroni et al., 2000) یا از روشهایی مانند استفاده از نیروهای پسماند و آنالیز حساسیت وزنی (Kosmatka and Ricles, 1999)، روش تخمین پارامتر (Pothisiri and Hjelmstad, 2003)، ماتریس انتقال هندسی (Escobar et al., 2000) و توابع پاسخ فرکانس (Huynh et al., 2005) برای پیش بینی خرابی استفاده کردند.

تئوری

خرابی در یک سازه معمولاً باعث کاهش سختی در یک یا چند عضو سازه‌ای می‌شود اما باعث کاهش جرم نمی‌شود. در صورتیکه ماتریسهای جرم و سختی سازه آسیب‌دیده (اولیه) با M و K نشان داده شوند در آنالیز مقادیر ویژه برای سازه آسیب‌دیده می‌توان نوشت:

$$K\Phi_i = \lambda_i M\Phi_i \quad (1)$$

در این رابطه λ_i و Φ_i مقادیر ویژه و بردارهای ویژه سازه آسیب‌دیده هستند. بطور مشابه برای سازه آسیب‌دیده می‌توان نوشت:

$$K^d \Phi_i^d = \lambda_i^d M^d \Phi_i^d \quad (2)$$

که در آن M^d ماتریس جرم سازه آسیب‌دیده و λ_j^d و Φ_j^d زامین مقدار ویژه و بردار ویژه سازه آسیب‌دیده می‌باشند. در معادلات ۱ و ۲، λ_i ، Φ_i ، λ_j^d و Φ_j^d اطلاعات مودال مربوط به سازه آسیب‌دیده و سازه آسیب‌دیده هستند که از آنالیز عددی بدست می‌آیند. وقوع خرابی در یک سازه را می‌توان بصورت ایجاد یک تغییر کوچک در سیستم اصلی بیان کرد بنابراین ماتریس سختی K^d ، زامین مقدار ویژه λ_i^d و زامین شکل مود ارتعاشی Φ_i^d مربوط به سازه آسیب‌دیده را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$K^d = K + \sum_{n=1}^{N_d} \Delta K_n = K + \sum_{n=1}^{N_d} \alpha_n K_{I_n} \quad (-1 < \alpha_n \leq 0) \quad (3)$$

$$\lambda_i^d = \lambda_i + \Delta \lambda_i; \Phi_i^d = \Phi_i + \Delta \Phi_i \quad (4)$$

اندیس d نشان‌دهنده حالت آسیب‌دیده می‌باشد، N_d تعداد کل اعضای آسیب‌دیده، α_n شدت خرابی که نشان‌دهنده نسبت تغییرات ماتریس سختی عضو است و I_n شماره n امین عضو آسیب‌دیده است (Shi et al., 1998).

تغییرات انرژی کرنشی مودال

انرژی کرنشی مودال عضو بصورت حاصلضرب ماتریس سختی در توان دوم شکل مودهای ارتعاشی بیان می‌شود (Shi et al., 1998). برای عضو زام و مود i ام انرژی کرنشی مودال قبل و بعد از خرابی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$MSE_{ij} = \Phi_i^T K_j \Phi_i; MSE_{ij}^d = \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d \quad (5)$$

در این رابطه MSE_{ij} و MSE_{ij}^d به ترتیب انرژی کرنشی مودال عضو زام و مود i ام سازه‌های آسیب‌دیده و آسیب‌دیده هستند. با توجه به اینکه اعضای آسیب‌دیده مشخص نیستند بنابراین از ماتریس سختی اولیه عضو یعنی K_j به جای ماتریس سختی عضو در حالت آسیب‌دیده استفاده شده که یک تقریب در بیان MSE_{ij}^d است.

تغییرات انرژی کرنشی مودال برای عضو زام و مود i ام بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$MSEC_{ij} = \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d - \Phi_i^T K_j \Phi_i \quad (6)$$

بطور مشابه نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSECR_{ij} = \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}} \quad (7)$$

در این رابطه i و j به ترتیب بیان‌کننده شماره عضو و شماره مود هستند. نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال معیار خوبی برای تعیین محل خرابی است.

در یک سازه $MSECR_{ij}$ برای تمامی اعضا محاسبه می‌شود. در صورتیکه بیش از یک مود اندازه‌گیری شده باشد $MSECR_{ij}$ برای تمامی مودها محاسبه شده و $MSECR_j$ برای عضو زام بصورت میانگین مجموع تمامی مقادیر $MSECR_{ij}$ است که نسبت به بزرگترین مقدار $MSECR_{ij}$ نرمال شده‌اند:

$$MSECR_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m MSECR_{ij} / MSECR_{\max} \quad (8)$$

در رابطه بالا m تعداد کل مودهای اندازه‌گیری شده است. نقاطی که در آنها $MSECR_j$ بزرگتر از بقیه باشد به عنوان محل خرابی در نظر گرفته می‌شوند.

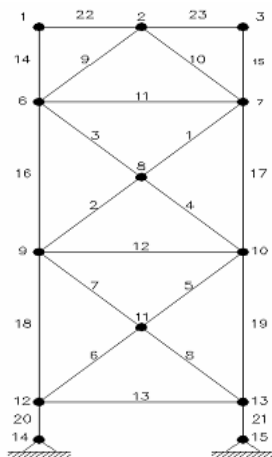
انرژی کرنشی مودال ترکیبی

انرژی کرنشی مودال ترکیبی برای مود i ام سازه آسیب‌دیده و مود j ام سازه آسیب‌دیده بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{ij} = (\Phi_i)^T K \Phi_j^d \quad (9)$$

و مقدار انرژی کرنشی مودال ترکیبی عضوی با ماتریس سختی K_{I_n} بصورت زیر است:

شده است. عرض دهنه ۱۲۰ اینچ بوده و فاصله مهاربندهای افقی از تکیه‌گاه انتهایی ۳۰، ۱۵۰، ۲۷۰ و ۳۳۰ اینچ است. مشخصات هندسی اعضای قاب ۱ به استثنای اعضای ۲۲ و ۲۳ در جدولهای ۱ و ۲ آورده شده است. اعضای ۲۲ و ۲۳ برای مدلسازی عرشه سکو با مقطع ۲۷۲۴*۵۵ مدلسازی شده اند (Zayas et al., 1980).



شکل ۱: شماره عضوها و گره‌های قابهای ۱ و ۲ (Zayas et al., 1980)

جدول ۲: ابعاد هندسی عضوهای قاب ۱ (Zayas et al., 1980)

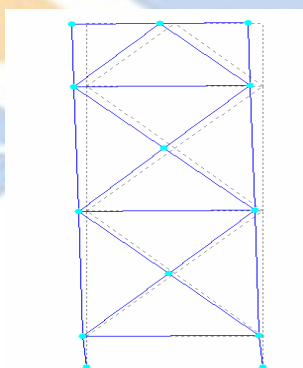
شماره عضو	قطر خارجی، اینچ	ضخامت، اینچ
۱، ۲، ۳، ۴، ۱۱، ۱۲، ۱۳	۴	۰/۱۲۰
۵، ۶، ۷، ۸	۵	۰/۱۸۸
۹، ۱۰	۶	۰/۱۸۱
۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱	۱۲، ۷، ۵	۰/۳۷۵

جدول ۱: ابعاد هندسی عضوهای قاب ۲ (Zayas et al., 1980)

شماره عضو	قطر خارجی، اینچ	ضخامت، اینچ
۱، ۲، ۳، ۴، ۱۱، ۱۲، ۱۳	۴	۰/۰۸۳
۵، ۶، ۷، ۸	۵	۰/۱۲۰
۹، ۱۰	۶	۰/۱۲۵
۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱	۱۲، ۷، ۵	۰/۲۸۱

آنالیز مودال

قابهای ۱ و ۲ در نرم افزار اجزا محدود Opensees مدلسازی شده و آنالیز مودال بر روی آنها انجام شده و اولین مود ارتعاشی این قابها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: شکل اولین مود ارتعاشی

این قابها در دانشگاه برکلی کالیفرنیا برای بررسی رفتار غیرخطی سکوه‌های دریایی در اثر اعمال بارگذاری استاتیکی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفتند. در طول آزمایش در قاب ۱ خرابی به ترتیب در اعضای ۲، ۳، ۸ و ۶ و در قاب ۲ به ترتیب در اعضای ۲، ۴، ۵ و ۸ به وقوع پیوست (Zayas et al., 1980). بنابراین حالت خرابی بصورت زیر در نظر گرفته شده اند:

حالت ۱: در نظر گرفتن یک عضو آسیب دیده، عضو ۲ از قاب ۱ حذف شده است.

حالت ۲: در نظر گرفتن یک عضو آسیب دیده، عضو ۲ از قاب ۲ حذف شده است.

حالت ۳: در نظر گرفتن دو عضو آسیب دیده، اعضای ۲ و ۳ از قاب ۱ حذف شده‌اند.
 حالت ۴: در نظر گرفتن دو عضو آسیب دیده، اعضای ۲ و ۴ از قاب ۲ حذف شده‌اند.
 حالت ۵: در نظر گرفتن سه عضو آسیب دیده، اعضای ۲ و ۳ و ۸ از قاب ۱ حذف شده‌اند.
 حالت ۶: در نظر گرفتن سه عضو آسیب دیده، اعضای ۲ و ۴ و ۵ از قاب ۲ حذف شده‌اند.
 اولین پریود ارتعاشی قابهای ۱ و ۲ در جدولهای ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۴: اولین پریود ارتعاشی قاب ۲

حالت	حالت	حالت	حالت
آسیب‌ندیده	خرابی ۱	خرابی ۳	خرابی ۵
۰,۰۶۵۰	۰,۰۷۰۸	۰,۰۹۶۰	۰,۱۱۲۱

جدول ۳: اولین پریود ارتعاشی قاب ۱

حالت	حالت	حالت	حالت
آسیب‌ندیده	خرابی ۱	خرابی ۳	خرابی ۵
۰,۰۷۱۰	۰,۰۷۷۰	۰,۱۰۳۴	۰,۱۲۰۹

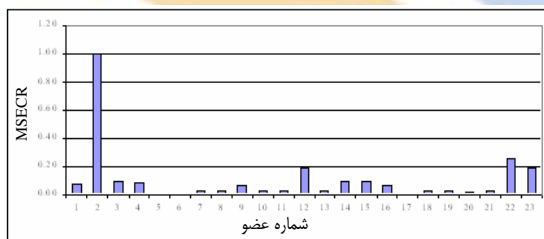
پیش‌بینی خرابی

پیش‌بینی محل و شدت خرابی بر اساس مراحل زیر انجام شده است:

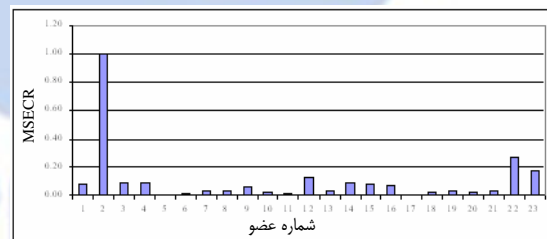
- مدلسازی قابهای ۱ و ۲ با استفاده از یک نرم افزار اجزا محدود، Opensees.
- انجام آنالیز مودال و تعیین اولین شکل مود ارتعاشی و اولین فرکانس طبیعی ارتعاش ($i=1$).
- تعیین شکل مود مربوط به هر عضو، قابل ذکر است که شکل مود عضو همان تغییر شکل‌های مودال دو انتهای آن است.
- محاسبه ماتریس سختی هر عضو و سپس $MSE_{ij} = \varphi_i^T K_j \varphi_i$ و $MSE_{ij}^d = \varphi_i^{dT} K_j \varphi_i^d$ برای هر عضو با توجه به اولین مود ارتعاشی.
- محاسبه $MSECR_{ij}$ برای اولین مود ارتعاشی، در این مرحله اعضای در معرض خرابی تعیین می‌شوند.
- در نظر گرفتن اولین مود ارتعاشی سازه آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده ($i=j=1$) و محاسبه ماتریس‌های C و b با توجه به معادله ۱۹.
- تعیین شدت خرابی برای هر عضو در معرض خرابی با استفاده از معادله ۲۰.

پیش‌بینی محل خرابی

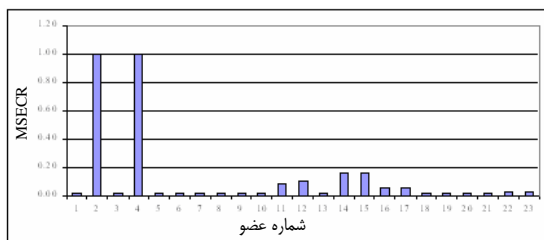
محل خرابی با محاسبه انرژی کرنشی مودال برای هر عضو سازه‌ای با استفاده از اولین مود ارتعاشی تعیین شده است. نتایج در شکل‌های ۳ الی ۸ نشان داده شده و اعضای در معرض خرابی در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.



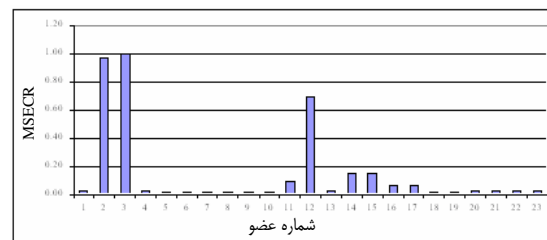
شکل ۴: پیش‌بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۲



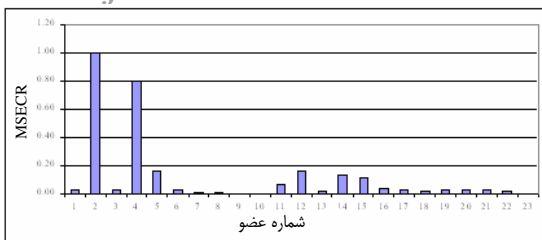
شکل ۳: پیش‌بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۱



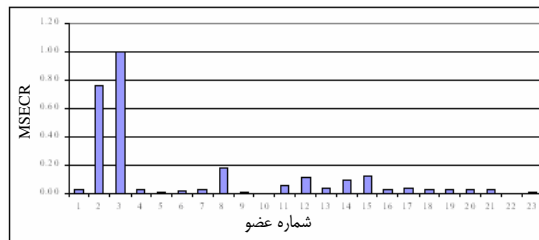
شکل ۶: پیش‌بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۴



شکل ۵: پیش‌بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۳



شکل ۸: پیش بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۶



شکل ۷: پیش بینی محل خرابی برای حالت خرابی ۵

جدول ۵: اعضای در معرض خرابی برای هر حالت در نظر گرفته شده

حالت خرابی	اعضای در معرض خرابی
۱	۱، ۲، ۳، ۴، ۹، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۲۲ و ۲۳
۲	۱، ۲، ۳، ۴، ۹، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۲۲ و ۲۳
۳	۲، ۳، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷
۴	۲، ۴، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷
۵	۲، ۳، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۴ و ۱۵
۶	۲، ۴، ۵، ۱۱، ۱۲، ۱۴ و ۱۵

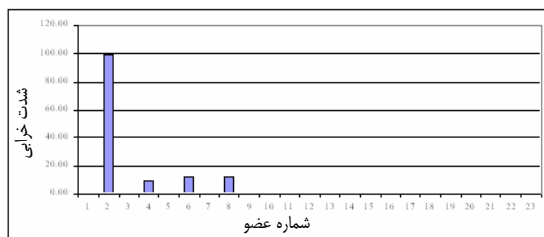
همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود در قاب‌های ۱ و ۲ احتمال خرابی در عضو ۲ بیشتر از بقیه اعضا است. بطور مشابه از شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان فهمید که در قاب ۱ احتمال خرابی در اعضای ۲ و ۳ و در قاب ۲ احتمال خرابی در اعضای ۲ و ۴ بیشتر از بقیه اعضا است. همچنین با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود که در مورد قاب ۱ احتمال خرابی در اعضای ۲، ۳ و ۸ و در قاب ۲ احتمال خرابی در اعضای ۲، ۴ و ۵ بیشتر از بقیه اعضا می‌باشد.

تخمین شدت خرابی

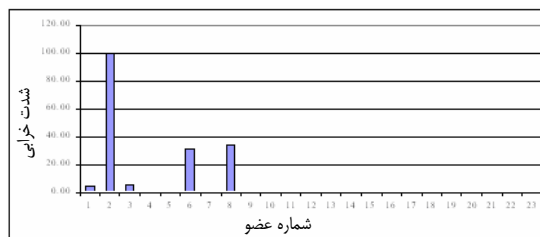
نتایج مربوط به تخمین شدت خرابی در شکل‌های ۹ الی ۱۴ نشان داده شده و در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول ۶: درصد خرابی برای هر حالت در نظر گرفته شده

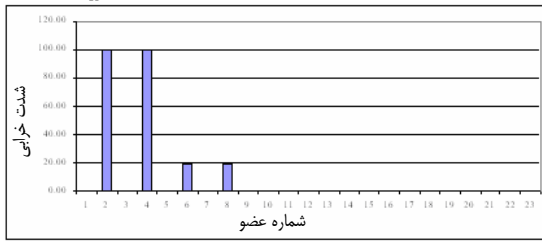
حالت خرابی	شماره عضو	درصد خرابی	شماره عضو	درصد خرابی	شماره عضو	درصد خرابی	شماره عضو	درصد خرابی
۱	۱ و ۳	۵	۲	۱۰۰	۶	۳۱	۸	۳۴
۲	۲	۱۰۰	۴	۱۰	۸ و ۶	۱۲		
۳	۱	۷	۳ و ۲	۱۰۰	۶	۳۷	۸	۳۹
	۱۰ و ۹	۳						
۴	۲ و ۴	۱۰۰	۸ و ۶	۱۹				
۵	۱ و ۱۳	۳	۸ و ۳، ۲	۱۰۰	۶	۲۷	۱۶، ۷ و ۱۹	۵
	۱۵	۹	۲۰	۲۲				
۶	۲، ۴ و ۵	۱۰۰	۸	۱۱	۱۴	۸	۱۵	۹



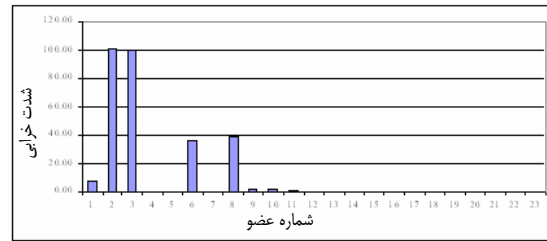
شکل ۱۰: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۲



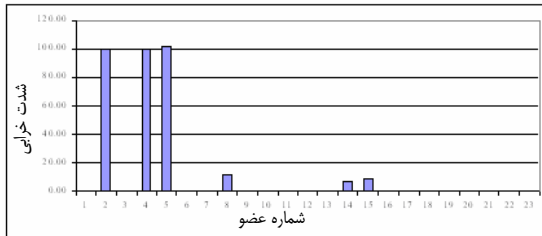
شکل ۹: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۱



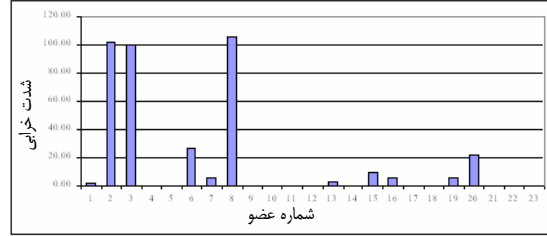
شکل ۱۲: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۴



شکل ۱۱: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۳



شکل ۱۴: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۶



شکل ۱۳: پیش بینی شدت خرابی برای حالت خرابی ۵

نتیجه گیری

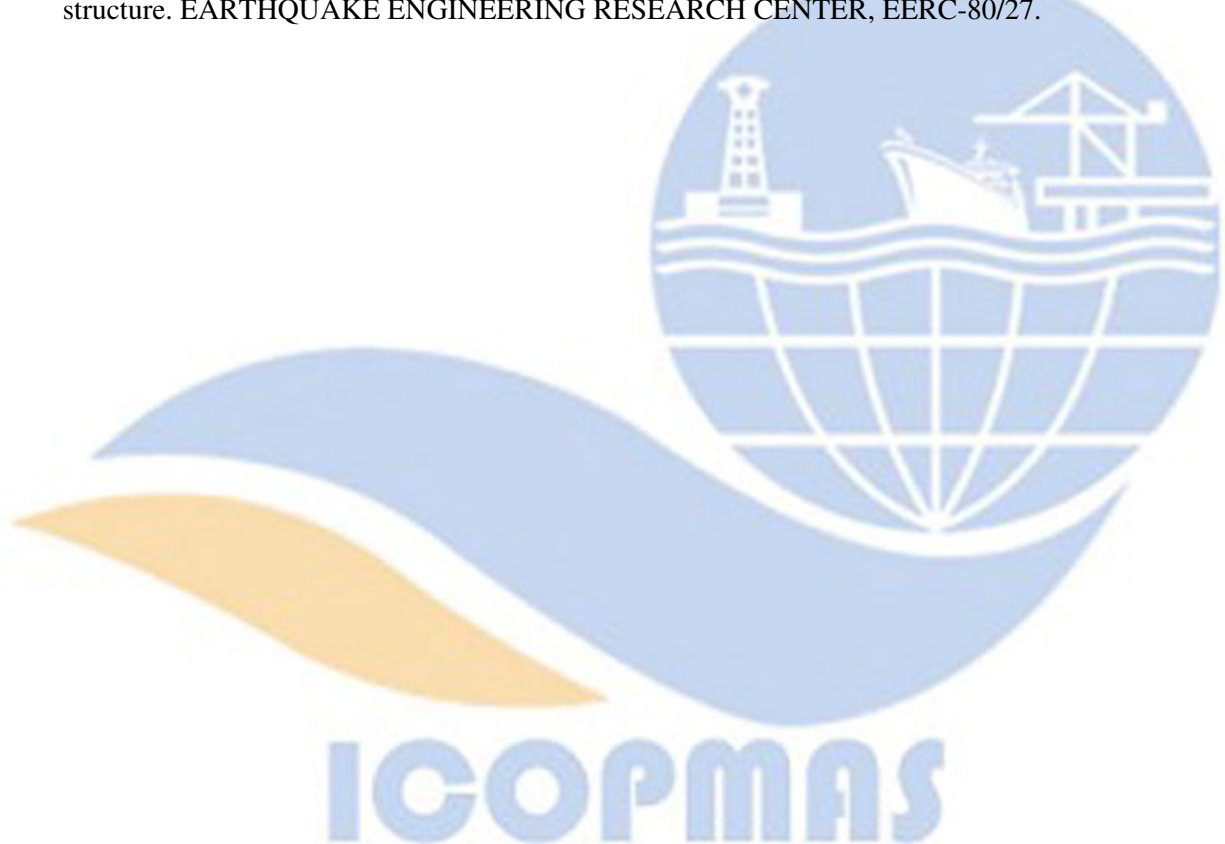
- (۱) در اثر ایجاد خرابی در سازه انرژی کرنشی مودال اعضا تغییر خواهد کرد.
- (۲) نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال در اعضای آسیب دیده بیشتر از سایر اعضا است.
- (۳) با استفاده از انرژی کرنشی مودال ترکیبی می توان با دقت بالایی شدت خرابی را تعیین کرد.
- (۴) در اثر وقوع خرابی در مهاربندهای قائم یک طبقه خاص، مهاربندهای افقی و قائم و اعضای پایه در آن طبقه جز اعضای در معرض خرابی خواهند بود، همچنین شدت خرابی در مهاربندهای قائم طبقه آسیب دیده قابل توجه می باشد در حالیکه در مهاربندهای افقی و اعضای پایه شدت خرابی ناچیز است.

مراجع

- Asgarian, B., Amiri, M. (2008), Structural Damage Localization by Modal Strain Energy Change, Proc. 4th National Cong. on Civil Eng., University of Tehran, Iran.
- Barroso, L. R. and Rodriguez, R. (2004), Damage Detection Utilizing the Damage Index Method to a Benchmark Structure, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 130, No. 2, pages 142-151.
- Choi, S., Park, S. and Stubbs, N. (2005), Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance, International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, pages 4494-4513.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. and Shevitz, D. W. (1998), A summary review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties, Journal of Shock Vibration, ASCE, Vol. 30, No. 2, pages 91-105.
- Escobar, J. A., Sosa, J. J. and Gomez, R. (2005), Structural damage detection using the transformation matrix, Journal of Computers and Structures, Vol. 83, pages 357-368.
- Hu, S. J., Wang, S. and Li, H. (2006), Cross-Modal Strain Energy Method for Estimating Damage Severity, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 132, No. 4, pages 429-437.
- Huynh, D., He, J. and Tran, D. (2005), Damage location vector: A non-destructive structural damage detection technique, Journal of Computers and Structures, Vol. 83, pages 2353-2367.
- Kim, J. T. and Stubbs, N. (1995), Damage Detection in Offshore Jacket Structures from Limited Modal Information, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 5, No. 1.
- Koh, C. G., See, L. M. and Balendra, T. (1995), Damage detection of buildings: numerical and experimental studies, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, pages 1155-1160.
- Kosmatka, J. B. and Ricles, J. M. (1999), Damage Detection in Structures by Modal Vibration Characterization, Journal of structural Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 12, pages 1384-1392.
- Lam, H. F. P., (1994), Detection of damage location based on sensitivity & experimental modal analysis, M.Phil.Thesis, Civ. and Struct. Eng. Dept., Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong.
- Law, S. S., Shi, Z. Y. and Zhang, L. M. (1998), Structural damage detection from incomplete and noisy modal test data, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 11, pages 1280-1288.

Archive of SID

- Liu, P. L. (1995), Identification and damage detection of trusses using modal data, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pages 599-608.
- Mangal, L., Idichandy, V. G. and Ganapathy, C. (1999), Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response, *Ocean engineering*, Vol. 28, pages 689-705.
- Park, S., Kim, Y. B. and Stubbs, N. (2002), Nondestructive damage detection in large structures via vibration monitoring, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 2.
- Pothisiri, T. and Hjelmstad, K. D. (2003), Structural Damage Detection and Assessment from Modal Response, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 129, No. 2, pages 135-145.
- Shi, Z. Y., Law, S. S. and Zhang, L. M. (2000), Structural damage detection from modal strain energy change, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 12, pages 1216-1223.
- Shi, Z. Y., Law, S. S. and Zhang, L. M. (2002), Improved Damage Quantification from Elemental Modal Strain Energy Change, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pages 521-529.
- Udwadia, F. E. (2005), Structural Identification and Damage Detection from Noisy Modal Data, *Journal of aerospace Engineering*, ASCE, Vol. 18, No. 3, pages 179-187.
- Vestroni, F. and Capecchi, D. (2000), Damage Detection in Beam Structures Based on Frequency Measurements, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 7, pages 761-768.
- Zayas, V. A., Mahin, S. A. and Popov, E. P. (1980), Cyclic Inelastic structural behavior of steel offshore structure. EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, EERC-80/27.



Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy

M.Amiri Bijan & N. Zangeneh

K.N. Toosi University of Technology

ABSTRACT

This paper is focused on the issues like structural damage detection, damage localization and severity estimation, based on computation of modal strain energy. Damage often causes a loss of stiffness in some elements of the structure; so, modal parameters, mode shapes and natural frequencies, in imaged structure, are different from the undamaged state. In this paper, location of damage is detected by computing modal strain energy change ratio (MSECR) for each structural element, which elements with higher MSECR are suspected to be damaged. By computing cross-modal strain energy for each suspected damage element, severity of damage as the stiffness reduction factor is estimated. Numerical studies are demonstrated for an existing jacket platform. It is observed that this method can be used for damage detection of these kinds of structure.

KEYWORDS: *DAMAGE DETECTION, MODAL ANALYSIS, STRAIN ENERGY.*