

شناسایی آسیب در سازه ی بنج مارک

مهدی حسین تبار ، عبدالرحیم جلالی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله و دانشگاه تبریز

۲- استادیار و دانشگاه تبریز

mh_284@yahoo.com

خلاصه

این مقاله سعی می کند مسائل بنج مارکی را که توسط بخش SHM¹ گروههای IASC و ASCE طراحی شده معرفی کند . علت مطالعه ی بنج مارکها این است که مقایسه ی روشهای مختلف بکار رفته در شناسایی آسیب را تسهیل کنند در نتیجه یک سازه ی ۴ طبقه ی فولادی به عنوان سازه ی بنج مارک انتخاب شد . در این مقاله از روش NEX²T و ERA³ برای شناسایی پارامترهای مودال سازه و از روش حل کمترین مربعات ، برای شناسایی آسیب در سازه استفاده شده است . در نهایت نشان داده می شود که روش ارائه شده ، محل آسیب ایجاد شده در سازه ی بنج مارک را بدرستی شناسایی می کند .

کلمات کلیدی: شناسایی آسیب، تابع چگالی طیفی، تابع همبستگی، بنج مارک

مقدمه

روشهای شناسایی آسیب در سازه به دو دسته ی روشهای موضعی و روشهای کلی تقسیم می گردند . روشهای موضعی همان حضور در محل آسیب و بازدید چشمی از المانهای سازه ای می باشد . در حال حاضر ، روشهای موضعی رایج ترین روش برای شناسایی آسیب در پل ها و سایر سازه های مهندسی عمران می باشند و به عنوان روشی استاندارد انتخاب شده تا اینکه نتایج سایر روشهای غیرتخریبی شناسایی آسیب با آن مقایسه گردد . چون بازرسی های چشمی از محل سازه ها ، هزینه بر ، وقت گیر و همراه با خطاهای بشری است نمی توان از آن به عنوان روش دائمی یاد کرد. پس پرواضح است که به روشی منطقی تر ، سریع تر و کم هزینه تر برای بررسی سازه ها نیاز داریم در نتیجه روشهای بررسی سلامت سازه (SHM) ، که همان روشهای کلی می باشند آسیب در سازه را با مشخص کردن تغییرات ایجاد شده در مشخصات ارتعاشی سازه تعیین می کنند. اگرچه روشهای SHM به تنهایی نمی توانند راه حل کاملی برای شناسایی سلامت سازه فراهم کنند ولی می توانند در مدت زمان کم تخمین خوبی از سلامت سازه ارائه دهند .

روشهای متعددی در مقالات مختلف برای بررسی سلامت سازه ها بکار گرفته شده ، اما چون هر محقق ، تکنیک خود را بر روی سازه ی متفاوتی به اجرا در آورده ، مقایسه مزایا و معایب روشهای مختلف SHM دشوار شده است . برای اینکه مقایسه ی تکنیک هایی که به صورت معمول استفاده شده اند را تسهیل کنیم مسائل بنج مارکی که در زمینه ی SHM توسط گروه IASC-ASCE ایجاد شده را مورد مطالعه قرار می دهیم. سازه ی مورد مطالعه یک سازه ی ۴ طبقه ی فولادی است که در دانشگاه بریتیش کلمبیا نگهداری می شود مدلهای تحلیلی از این سازه نیز در نرم افزار مت لب ایجاد شده است. الگوهای مختلف آسیب نظیر حذف بادبندی ها ، کاهش سختی بادبندی ها و شل شدن اتصالات تیر به ستون در این مدلهای شبیه سازی شده معرفی شده اند. برای مطالعه ی بیشتر در مورد بنج مارکها و کارهای انجام شده تا الان به وب سایت گروه مراجعه کنید. [1]

هدف اصلی این مقاله این است که محل آسیب در سازه را با اندازه گیری شتاب ایجاد شده در سازه تعیین کرد این شتاب در اثر نیروهای وارد بر سازه ایجاد شده و توسط سنسور نصب شده بر روی آن ثبت و اندازه گیری می شوند . پیشرفت در سنسورها و سیستم های جمع آوری کننده و تحلیل کننده ی اطلاعات ، اجرای تکنیک های SHM را حتی در سازه های عمرانی بسیار بزرگ و پیچیده ، تسهیل و آسان می کند .

در این مقاله case 1 و case 2 مسائل مربوط به بنج مارک مورد مطالعه قرار گرفته است. در case 1 ، توزیع جرم متقارن بوده ، نیرو در تمامی طبقات وارد شده که نوعی شبیه سازی نیروی باد خواهد بود و اینکه از مدل تحلیلی با ۱۲ درجه ی آزادی استفاده می شود تا پاسخ های سازه ای را محاسبه کنیم. تنها تفاوت case 2 با case 1 این است که از مدل تحلیلی با ۱۲۰ درجه ی آزادی به جای مدل با ۱۲ درجه آزادی برای محاسبه ی پاسخ های سازه ای استفاده می شود. حالت سازه ی سالم و الگوی آسیب اول و دوم به عنوان الگوهای آسیب مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از سازه ی سالم سازه ی باد بندی است که تمام بادبندی های آن موجود باشد اما در الگوی آسیب اول و دوم به ترتیب تمامی بادبندی های طبقه اول و بادبندی های طبقه اول و سوم حذف شده اند.

¹ Structural Health Monitoring

² Natural Excitation Technique

³ Eigensystem Realization Algorithm

روش ارائه شده

روش SHM بکار رفته در این مقاله شامل دو گام می باشد در گام اول پارامترهای مودال سازه نظیر بسامدهای طبیعی، نسبت میرایی و شکل مود سازه با استفاده از روش تحریکات طبیعی (NEXT) و الگوریتم شناسایی سیستم ویژه (ERA) بدست می آیند در گام دوم از روش کمترین مربعات و پارامترهای مودال بدست آمده از گام اول استفاده می شود تا سختی سازه را بدست آوریم. با مقایسه ی سختی سازه قبل و بعد از آسیب، می توان محل و شدت آسیب را تعیین کرد.

تعیین پارامترهای مودال

بسته به نوع نیروی وارد به سازه (نیروی محیطی یا نیروی ضربه) از روشهای مختلفی برای بدست آوردن پارامترهای مودال سازه در گام اول استفاده می شود. اگر نیروی وارد بر سازه نیروی محیطی (بار باد یا زلزله) باشد ابتدا از تکنیک NEXT استفاده می کنیم تا توابع همبستگی را برای اطلاعات پاسخ سازه بدست آوریم که البته این توابع همبستگی به صورت اطلاعات ارتعاش آزاد سازه رفتار می کنند. سپس از الگوریتم ERA بر روی این توابع همبستگی استفاده می کنیم تا ماتریس سیستم را تشکیل دهیم و در نهایت از روی این ماتریس، پارامترهای مودال سازه را تعیین می کنیم. اما اگر نیروی وارد بر سازه نیروی چکش باشد در واقع اطلاعات ارتعاش آزاد سیستم در دست بوده و لازم نیست از روش NEXT استفاده کنیم. پس مستقیماً الگوریتم ERA را بر روی اطلاعات پاسخ سازه بکار می بریم تا پارامترهای مودال سازه بدست آید.

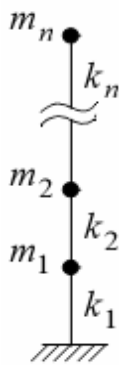
تکنیک تحریکات طبیعی (NEXT)

James و همکاران [2] نشان داده اند که اگر اطلاعات ارتعاش اجباری از سازه ای که تحت نیروی محیطی قرار گرفته در دست باشد تابع همبستگی بین پاسخ اندازه گیری شده ی سازه و یک سیگنال مرجع (مثلاً پاسخ طبقه ی بام) به صورت اطلاعات ارتعاش آزاد رفتار می کنند از این روش به صورت گسترده در مطالعات تجربی و تحلیلی استفاده شده است. این مساله بر این واقعیت استوار است که تابع همبستگی بین رکوردهای شتاب سازه و یک سیگنال مرجع می تواند معادلات دیفرانسیل همگن یک سازه را ارضا کند. در این روش فرض شده که تحریکات به صورت مانا بوده و از پاسخ های قبلی سیستم غیر وابسته است.

معادلات سیستم خطی، نامتغیر با زمان و با n درجه ی آزادی شکل (۱) را در نظر بگیرید:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

که M و C و K به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی می باشند $f(t)$ بردار نیروهای تحریک، $x(t)$ جابجایی سازه و اپراتور (\bullet) بیانگر مشتق نسبت به زمان می باشد.



شکل ۱- سازه ی برشی n طبقه

فرض کنید پاسخ سازه و نیروهای تحریک، بردار پدیده های تصادفی $X(t)$ و $F(t)$ باشند معادله (۱) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (2)$$

با ضرب هر دو طرف معادله ی (۲) در یک پدیده ی تصادفی مرجع از نوع جابجایی $X_i(s)$ و استفاده از امید ریاضی بر روی دو طرف معادله، خواهیم داشت:

$$MR_{\ddot{X}X_i}(t,s) + CR_{\dot{X}X_i}(t,s) + KR_{XX_i}(t,s) = R_{FX_i}(t) \quad (3)$$

که R بیانگر بردار توابع همبستگی می باشد. با فرض اینکه جابجایی، سرعت و شتاب به صورت ضعیف مانا باشند و اینکه بردار جابجایی و نیرو غیر همبسته هستند خواهیم داشت:

$$MR_{\ddot{X}X_i}(t,s) + CR_{\dot{X}X_i}(t,s) + KR_{XX_i}(t,s) = 0 \quad (4)$$

معادله ی (۴) نشان می دهد که توابع همبستگی بین پاسخ های سازه و یک سیگنال مرجع، معادلات همگن حرکت را ارضا می کنند پس توابع همبستگی

می توانند به صورت اطلاعات ارتعاش آزاد رفتار کنند. در نتیجه با استفاده از عکس تبدیل فوریه ی توابع چگالی طیفی می توان توابع همبستگی را محاسبه کرد .

الگوریتم شناسایی سیستم (ERA)

پس از بدست آوردن اطلاعات ارتعاش آزاد ، روشهای مختلفی وجود دارد که بتوان پارامترهای مودال را از روی آن بدست آورد که ما در اینجا الگوریتم ERA را انتخاب کرده ایم چرا که در شنا سایی سازه های نسبتاً میرا موثر است. [3,4] برای به کارگیری الگوریتم ERA ، لازم است که ماتریس هنکل بر اساس اطلاعات پاسخ آزاد به صورت زیر تشکیل

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} y(k) & y(k+1) & \dots & y(k+c) \\ y(k+1) & y(k+2) & \dots & y(k+c+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+r) & y(k+r+1) & \dots & y(k+c+r) \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در ماتریس بالا، $y(k)$ در واقع همان بردار پاسخ در گام زمانی k ام می باشد و c و r به ترتیب بیانگر تعداد ستونها و سطرهای ماتریس هنکل می باشند برای اینکه به نتایج خوبی برسیم لازم است که c را تقریباً ۱۰ برابر تعداد مد هایی که قرار است بدست آوریم انتخاب کنیم و r نیز می بایست ۵ برابر تعداد c باشد. پس از تعریف ماتریس هنکل ، اولین قدم تشکیل ماتریس $H(0)$ می باشد سپس با اجرای روش تجزیه ی مقدار منفرد بر روی ماتریس $H(0)$ خواهیم داشت :

$$H(0) = R\Psi S^T \quad (6)$$

که Ψ یک ماتریس قطری است و مقادیر موجود بر روی قطر اصلی همان مقادیر منفرد و تکین ماتریس $H(0)$ می باشد در مرحله ی بعد ، سطر و ستونهای متناظر با مقادیر منفرد کوچک را که مربوط به مدهای محاسباتی می باشند حذف می کنیم تا R_N و Ψ_N و S_N بدست آیند . در ادامه ماتریس های فضای حالت برای سیستم گسسته ی زمانی بدست آمده به صورت زیر می باشند:

$$\hat{A} = \Psi_N^{-1/2} R_N^T H(1) S_N \Psi_N^{-1/2} \quad \text{و} \quad \hat{B} = \Psi_N^{-1/2} S_N E_c \quad \text{و} \quad \hat{C} = E_r^T R_N \Psi_N^{-1/2} \quad (7)$$

که $E_r^T = [I_r \quad 0]$ و $E_c^T = [I_c \quad 0]$ به ترتیب بیانگر ماتریس واحد از مرتبه ی r و c می باشند.

بخش موهومی و حقیقی مقدار ویژه ی ماتریس فضای حالت \hat{A} به ترتیب بیانگر فرکانس و میرایی سیستم می باشند. از ماتریس فضای حالت \hat{C} نیز استفاده می شود تا بردارهای ویژه ی ماتریس فضای حالت \hat{A} را به حالات فیزیکی در مدل شناسایی نظیر شکل جابجایی طبقات سازه (شکل مود) تبدیل کند:

$$Y = \hat{C} \hat{\Phi} \quad (8)$$

که Y همان ماتریس شکل مود برای مدهای مختلف می باشد و $\hat{\Phi}$ بیانگر ماتریس بردارهای ویژه ی ماتریس فضای حالت \hat{A} می باشد.

انتخاب یک مدل شناسایی

کفایت و توانایی این روش برای شناسایی آسیب به شدت به انتخاب یک مدل شناسایی مناسب مربوط می باشد شکل مدل شناسایی محدوده ی رفتارهای بالقوه ی سازه ای را تعیین می کند که این مدل می تواند از خود نشان دهد. در مقاله ی حاضر ، مدل شناسایی ما یک مدل سازه ی برشی ۴ طبقه ای است که در شکل ۱ نشان داده شده و می تواند معادله ی حرکت سازه را ارضا کند. بر اساس این مدل شنا سایی مقادیر M و K به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad K = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & -k_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

پس از تعیین پارامترهای مودال سازه ، ماتریس سختی مدل شناسایی را می توان بر اساس روش حل کمترین مربعات پارامترهای نامشخص (سختی سازه) در معادلات مشخصه بدست آورد. البته در این روش لازم است که ماتریس جرم سازه یا تقریب خوبی از مقادیر آن در دست باشد معادله ی مشخصه ی سیستم نامیرا را به صورت زیر در نظر می گیریم :

$$(K - M\lambda_1) \Phi_1 = 0 \quad (10)$$

که λ_1 همان مقدار ویژه ی i ام (مجذور فرکانس طبیعی i ام سازه) و Φ_1 بردار ویژه ی i ام (متناظر با شکل مود i ام) می باشند. می توان معادله ی (۱۰) را به صورت زیر باز نویسی کرد :

$$K\Phi_1 = M\lambda_1 \Phi_1 \quad (11)$$

$$\delta_1 k = M \lambda_1 \Phi_1 \quad (12)$$

که برداری است شامل p مقدار سختی نامشخص متناظر با المانهای مشخص در مدل شناسایی (سختی طبقات) و شکل مودهای مختلف نیز به صورت ماتریسی δ_1 نوشته شده است.

بر اساس معادله ی (12) به p معادله نیاز داریم تا مقادیر سختی مشخص گردد. با استفاده از تمامی شکل مودهای تعیین شده و فرکانس های طبیعی مشخص شده از روی NExT و ERA خواهیم داشت:

$$\Delta k = \Gamma \quad (13)$$

که

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_m \end{bmatrix} \quad , \quad \Gamma = \begin{bmatrix} M \lambda_1 \Phi_1 \\ M \lambda_2 \Phi_2 \\ \vdots \\ M \lambda_m \Phi_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

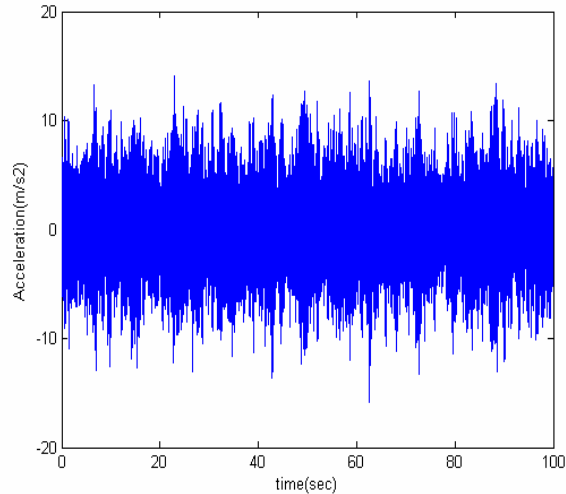
مقادیر سختی نامشخص را می توان بر اساس رابطه ی زیر تخمین زد:

$$k = \text{pinv}(\Delta) \Gamma \quad (15)$$

که (pinv) بیانگر شبه معکوس ماتریس می باشد چون ماتریس Δ مربعی نیست از شبه معکوس برای بدست آوردن معکوس ماتریس Δ استفاده می شود. یکی از مزایای استفاده از این روش آن است که تنها مقادیر غیر صفر ماتریس سختی مدل شناسایی با استفاده از هندسه ی المانهای سازه ای بدست می آیند.

نتایج

بر اساس روش ارائه شده، لازم است که پاسخ سازه به نیروهای وارد به آن در دست باشد به همین منظور شتاب نگارهایی بر روی سازه نصب شده تا اطلاعات پاسخ شتاب سازه را مطابق شکل ۲ ثبت کنند.

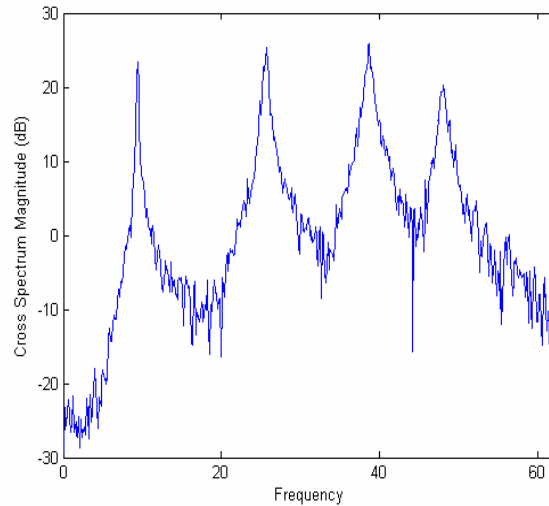


شکل ۲- شتاب ثبت شده در طبقه اول

پس از بدست آوردن اطلاعات پاسخ سازه، لازم است تابع چگالی طیفی این اطلاعات مطابق شکل ۳ بدست آید که در این مرحله از روش cspd^1 یا cpsd^2 در برنامه ی مت لب استفاده می کنیم.

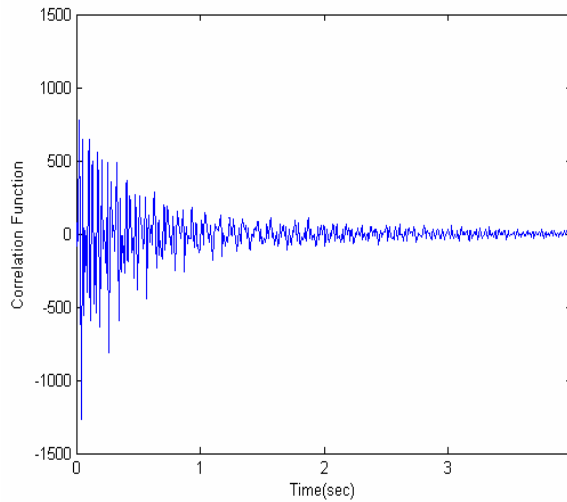
¹ Cross Spectral Density

² Cross Power Spectral Density



شکل ۳- تابع چگالی طیفی مربوط به طبقه اول

در ادامه از روش عکس تبدیل فوریه یا iff ^۱ استفاده می کنیم تا تابع همبستگی را مطابق شکل ۴ ، بین اطلاعات شتاب یکی از طبقات سازه با یک شتاب مرجع (شتاب بام) بدست آوریم.



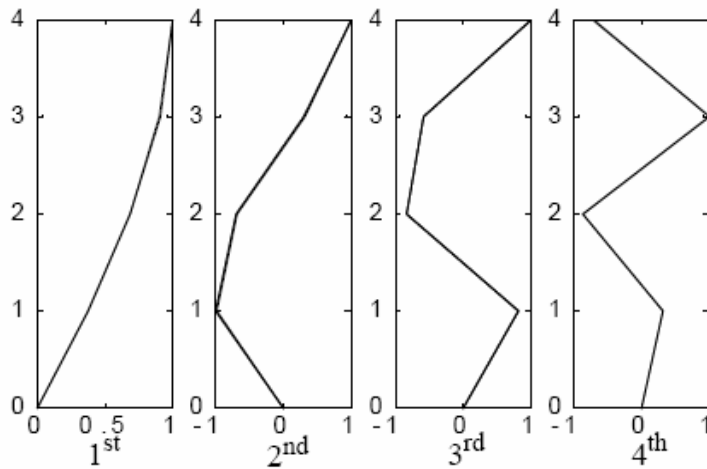
شکل ۴- تابع همبستگی بین شتاب طبقه اول و بام

پس از بدست آوردن تابع همبستگی ، لازم است که تکنیک NEXt را به همراه الگوریتم ERA بکار ببریم تا اطلاعات مودال سازه را مطابق جدول ۱ و شکل ۵ بدست آوریم.

جدول ۱- مقادیر فرکانس های بدست آمده برای الگوهای آسیب مختلف

| Case | الگوی آسیب | فرکانس (HZ) | | | |
|------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| | | ω_1 | ω_2 | ω_3 | ω_4 |
| 1 | بدون آسیب | 9.40 | 25.57 | 38.65 | 47.99 |
| | اول | 6.25 | 21.53 | 37.33 | 47.79 |
| | دوم | 5.84 | 14.89 | 36.14 | 41.40 |
| 2 | بدون آسیب | 8.21 | 22.58 | 35.55 | 46.10 |
| | اول | 4.91 | 18.35 | 34.04 | 45.76 |
| | دوم | 4.36 | 10.26 | 33.84 | 37.40 |

¹ Inverse Fast Fourier Transform



شکل ۵- شکل مود های بدست آمده برای مدل شنا سایی با استفاده از روش ERA

با توجه به جدول ۱ دیده می شود که فرکانس های مودهای مختلف در حال تغییر است این بدان معنی است که آسیبی در سازه اتفاق افتاده ولی محل آن مشخص نیست. همان طور که می دانیم دو آسیب با شدت برابر که در دو محل متفاوت رخ می دهد فرکانس ها را به یک اندازه تغییر می دهد. [5,6] پس با تغییر فرکانس می توان وجود آسیب را شنا سایی کرد ولی برای تعیین محل و شدت آسیب به روشی دیگر نیاز داریم. در نهایت از روش حل حداقل مربعات بر روی مسائل مقادیر ویژه استفاده می کنیم تا سختی سازه را مطابق جدول ۲ بدست آوریم با مقایسه سختی سازه قبل و بعد از آسیب براحتی می توان محل و شدت آسیب را تعیین کرد .

جدول ۲- مقادیر سختی بدست آمده با استفاده از روش ERA

| Case | الگوی آسیب | سختی (MN/m) | | | |
|------|------------|-------------|-------|-------|-------|
| | | k1 | k2 | k3 | k4 |
| 1 | بدون آسیب | 68.12 | 68.00 | 67.70 | 67.82 |
| | اول | 19.50 | 67.96 | 67.66 | 67.79 |
| | دوم | 19.59 | 68.06 | 19.23 | 68.41 |
| 2 | بدون آسیب | 63.63 | 64.69 | 63.19 | 55.14 |
| | اول | 16.08 | 64.62 | 63.32 | 55.27 |
| | دوم | 15.77 | 63.96 | 13.90 | 53.36 |

همانطور که دیده می شود در هر دو case 1 و case 2 ، در الگوی آسیب اول ، مقدار سختی طبقه اول به شدت تغییر کرده است که بیانگر آسیب در این طبقه می باشد و به صورت مشابه در الگوی آسیب دوم ، مقدار سختی طبقات اول و سوم به شدت تغییر کرده است که بیانگر آسیب در این طبقات می باشد اما بررسی شدت آسیب یک امر نسبی است بدان معنی که با مقایسه ی مقادیر سختی بدست آمده برای الگو های آسیب با هم نسبت به حالت بدون آسیب می توان شدت آسیب را نیز تعیین کرد مثلا در الگوهای آسیب بالا به نظر می رسد که شدت آسیب در هر دو الگو با هم برابرند چرا که مقدار سختی تغییر یافته تقریباً برابرند. [7]

مراجع

1. <http://wusceel.cive.wustl.edu/asce.shm/benchmarks.Htm>
2. James, G.H., Carne, T.G. and Lauffer, J.P. (1993) The natural excitation technique for modal parameter extraction from operating wind turbines. SAND92-1666, UC-261, Sandia National Laboratories.
3. Juang, J.N. and Pappa, R.S. (1985) An EigenSystem Realization Algorithm for Modal parameter identification and Model Reduction. Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 8, 620-627.
4. Giraldo, D., Caicedo, J.M. and Dyke, S.J. (2003) Experimental phase of the SHM benchmark studies: damage detection using NExT and ERA. Proceeding of the 16th engineering conference(ASCE), Seattle, Washington, July 16-18.
5. Salawu, O.S. (1997) Detection of structural damage through changes in frequency: a review. Engineering structures, Vol. 19, No. 9, 718-723.
6. Cawley, P. and Adams, R.D. (1979a) The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies. Journal of strain analysis, 14(2), 49-57.

7. Caicedo, J.M. (2001) Two structural health monitoring strategies based on global acceleration responses: Development , Implementation and verification. MSc . thesis. Washington university in St.Louis .