ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس



مدل مكانيك غيرخطي اندركنش سازه نامتقارن با جداساز لرزهاي تحت بارهاي هارمونيك و زلزله و مطالعه پدیدههای غیرخطی آن

مجيد امين افشار^{1*} ، سيهر آقايييور²

1- استادیار، مهندسی عمران -سازه، دانشگاه بین ⊣لمللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران -سازه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، صندوق پستی mafshar@eng.ikiu.ac.ir ،34149-16818

چکیدہ	اطلاعات مقاله
امروزه، تجهیز ساختمان با جداساز لرزمای از روشهای متداول مقاومسازی لرزمای ساختمانهاست. هدف اصلی این روش، کاهش جابهجایی نسبی طبقات سازه و در عوض ایجاد حرکت جسم صلب در آن از طریق نصب مصالحی نرم و انعطافپذیر بهنام الاستومر در پای ساختمان است. با توجه به کثرت اجرای ساختمانهای دارای پلان نامنظم و نیز شدت خسارتهای ناشی از زلزله به این نوع سازهها، در این مقاله، مکانیک ان کنش بی از میاز تقارب حداران و شده میالا به شدم بر برادلات می کند آن در در در تقارب ختم اس بک ختم بر شده میان	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 19 مرداد 1393 پذیرش: 15 شهریور 1393 ارائه در سایت: 10 آبان 1393
سستی سازه نامشاری جانشاری شده مطابعه می شود و معاد کا خرک آن در دو دستاه محصات، یکی نصب شده بر پیه شاختمان (مختصات کلی) و دیگری نصب شده بر کف طبقه جداساز در حال دوران (مختصات محلی)، ارائه می شود. در دیدگاه متداول، معادلات حرکت در سیستیم مختصات نخست به فرم خطی بهدست می آیند، حال آنکه در نگرش جدید پیشنهادی این تحقیق، بررسی مکانیک حرکت در سیستی مختصات دومی، به معادلاتی از نوع غیرخطی منجر می شود. سه نوع سازه با نسبتهای فرکانس طبیعی هم بسته پیچشی-جانبی به فرکانس طبیعی جهت متقارن معرفی می شود. پاسخهای دو مدل خطی و غیرخطی برای 3 نوع سازه، تحت اثر تحریکات هارمونیک و زلزله در تحلیل تا خصاب دان معرفی می شود. پاسخهای دو مدل خطی و غیرخطی برای 3 نوع سازه، تحت اثر تحریکات هارمونیک و زلزله در تحلیل	<i>کلید واژگان:</i> مکانیک غیرخطی جداساز لرزهای سازه نامتقارن پدیدههای غیرخطی
وجود دارد. سپس، بروز برخی از پدیدهای غیرخطی نظیر اشباع، انتقال انرژی بین مدها و جابهجایی صلب در این نوع سازهها بررسی می شود.	

Nonlinear Mechanic Model of Asymmetric Base-Isolated Structures Interaction against Harmonic Loads and Earthquake, and Study of Related Nonlinear Phenomena

Majid Amin Afshar1*, Sepehr Aghaei Pour2

1- Department of Technology and Engineering, Emam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Department of Technology and Engineering, Emam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 34149-16818 Qazvin, Iran, mafshar@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract	
Original Research Paper Received 10 August 2014 Accepted 06 September 2014 Available Online 01 November 2014	Today, base isolation of buildings is a conventional approach to earthquake re- objective is to reduce displacement of the structure by movement of ela installed on the base of structures on the ground. Considering widespre- asymmetric buildings as well as the intensity of their damages resulting from	sistance. The main stomeric bearings ad construction of om earthquake, the
<i>Keywords:</i> Nonlinear Mechanics Base Isolator Asymmetric Structure Nonlinear Phenomena	present research covers study of interaction mechanics of asymmetric base- where the equations of motion are presented in two coordinates, one fixed o (global coordinate) and the other on the torsional isolation level (local c conventional approach, the equations of motion are calculated on linear coordinate system, whereas in the new approach proposed in this research, the analysis in the secondary coordinate system will lead to non-linear equatic structures are proposed with ratio of torsional-lateral correlated natu asymmetric natural frequency. Responses of both linear and nonlinear met types of structures under harmonic effects and earthquake are compared with history and frequency solutions. Some differences are observed between the li methods. Then, some non-linear phenomena such as saturation, energy transf and rigid displacement in such structures are also analyzed.	solated structures, n the building base oordinate). In this form in the initial e motion mechanics ons. Three types of irral frequency on hods for the three hile analyzing time near and nonlinear er between modes,
نامتقارن بسيار بيشتر از ساختمانهای	مخرب زلزله در ساختمان با بلان	1- مقدمه

ارن بسیار بیہ منظم است. لذا، مطالعه بیشتر در بررسی رفتار سازههای نامنظم تحت زلزله الزامی بهنظر میرسد. از طرفی، در مدت 40 سال گذشته مبحث جداساز

بسیاری از خسارتهای ساختمانها تحت تاثیر زلزله، ناشی از تحریکات پیچشی به واسطه نامنظمی پلان است. بسیاری از تحقیقها نشان داده که اثر

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Amin Afshar, S. Aghaei Pour, Nonlinear Mechanic Model of Asymmetric Base-Isolated Structures Interaction against Harmonic Loads and Earthquake, and Study of Related Nonlinear Phenomena, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 152-162, 2015 (In Persian)

لرزهای به صورت یک واقعیت علمی و کاربردی در آمده است و این به واسطه تکیه گاههای چند لایه الاستومریک نصب شده در پای ساختمان هاست، به گونهای که خسارات ناشی از زلزله در ساختمان های نامنظم را به طور قابل توجهي كاهش ميدهد[1].

در بیشتر تحقیقات گذشته، مدل خطی سازه جداسازی شده در سیستم مختصات کلی مورد بررسی قرار گرفته است. تنا کولنگا و گومز سابرون[2]، به بررسی پاسخهای یک سازه جداسازی شده نامتقارن با خروج از مرکزیت جرم در روسازه تحت زلزله پرداختند. ایشان در تحقیق خود روی یک ساختمان 3 طبقه با پلان متقارن در سختی المان های مقاوم همراه با خروج از مرکزیت جرم، تأثیر جداگر لرزهای ¹LRB را در کاهش اثرات پیچشی بررسی نمودند. همچنین، تأثیر مقادیر مختلف نسبت فرکانس پیچشی به جانبی در روسازه را مورد تحلیل قرار دادند. تنا کولنگا در کار دیگر خود به همراه کروز[3]، بر روی مدل قبلی تحقیق خود [2]، کارهای گستردهای انجام داد. به این ترتیب که تأثیرات خروج از مرکزیت جرم روسازه و خروج از مرکزیت در سیستم جداگر را مورد تحلیل قرار داد و محدوده زمان تناوب را بین 1/5 تا 3 ثانیه درنظر گرفت و مقادیر مختلف پاسخ را بهدست آورد. همچنین، تنا کولنگا و کروز[4] ضمن بررسی کارهای صورت گرفته در مطالعات قبلی خود، تأثیر خروج از مرکزیت سختی در روسازه را نیز بررسی کردند. آقای دلالیرا و همکارانش[5]، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی از سازه نامتقارن خطی، با دمپرهای اصطکاکی و ویسکوالاستیک را بررسی نمودند. نتایج براساس جرم و سختی مدل 6 طبقه نامتقارن همراه با دمپرهای اصطکاکی ارائه شد که البته با دمپرهای ویسکوالاستیک نیز نتایج یکسانی بهدست آمد. آقای دلالیرا و همکاران در فعالیتی دیگر[6]، پاسخ زلزله را برای سازه جداسازی شده و با همبستگی پیچشی-جانبی بررسی کردند. هدف اساسی ارائه روند ساده برای تخمين جابهجايي لبه سازه و جداساز بود. همچنين، آنها [7] سازه را به صورت دو بخش مجزا جداساز و سازه رو بنا درنظر گرفتند. سازه رو بنا به صورت یک جسم صلب تحت پاسخ شتاب عمل می کرد که این ساده سازی نيز نتايج خوبي در تخمين پاسخ سيستم به همراه داشت. آقايان كيلار و کورن[8]، سعی در درک بهتر رفتار سازه جدا شده نامتقارن داشتند. آنها حالات مختلفی از سازه بتن آرمه 4 طبقه جداسازی شده با پراکندگیهای گوناگون جداساز LRB را مورد ملاحظه قرار دادند. آن ها مشاهده کردند، هنگامی که مرکز جرم منطبق بر مرکز پراکندگی جداساز باشد، اثرات پیچشی را در سیستم جداسازی کاهش میدهد و همچنین خسارت بیشتری در المانهای مقاوم جهت انعطافپذیرتر (دور از مرکز سختی) ایجاد می شود. آقای شربتدار و همکاران[9] به ارائه پاسخ لرزهای سازه جداسازی شده با جداگرهای LRB و ²FPS تحت حرکت زمین نزدیک گسل پرداختند. آنها مشاهده کردند که جابهجاییهای بزرگ و ضربههای سرعتی در ثبت حرکت زمین نزدیک به گسل نتایج پاسخ لرزهای سازه جداسازی شده را تغییر مىدهد. وجه مشترك تمام اين تحقيقات بررسى ديناميكي مدلها براى همبستگی پیچشی-جانبی در سیستم مختصات کلی است.

به هر حال، اغلب محققان در حوزه مهندسی سازه، تاکنون به غیرخطی بودن اینرسی به واسطه همبستگی پیچشی-جانبی توجهی نداشتند. یک باور غلط در مورد غیرخطی هندسی بودن (اینرسی)، چشمپوشی از پاسخها و تحریکات کوچک تحت تاثیر عبارات غیرخطی در معادلات حاکم بر حرکت سیستم غیرخطی، به کمک فرایند خطی سازی آنها است، حال آنکه در

واقعیت، حتی کوچکترین پاسخها و تحریکات به بروز پدیدههای غیرعادی و عجيب منجر خواهد شد. انتقال انرژی بين مدهای طبيعی، چرخه، اشباع، پرش و غیره از پدیدههای غیرخطی هستند که در مدل خطی مشاهده نمی شوند. کنکاش و بررسی این پدیده ها در حوزه اندر کنش های غیرخطی، بهعنوان شاخهای از علم مکانیک غیرخطی، صورت می گیرد [10].

تحقیقهای بسیاری نیز به بررسی رفتار دینامیکی در سیستمهای مکانیک غیرخطی پرداختند. به عنوان مثال، می توان به همبستگی غیرخطی مدهای چرخشی و غلتشی در حرکت کشتیها به واسطه امواج بزرگ[11]، آونگ صلب با یک جرم متمرکز تحت اثر نیروی بازگرداننده جاذبه یا یک فنر پیچشی[12]، حرکات اجباری همگام در دو نوسانگر همبسته مرتبه دوم[13]، سیستمهای آونگ-فنر تحت اثر بار هارمونیک [14-16]، اتصال انعطاف پذیر میله با مکانیسم لغزنده [17]، ارتعاشات آزاد یک نانو صفحه تکلایه بر مبنای الاستيسيته غيرمحلى[18] و يک تير مايل تحت اثر بار متحرک[19] اشاره ک د.

تا به حال در تمام تحقیقهای صورت گرفته در زمینه دینامیک سازههای نامتقارن جداسازی شده، درجات آزادی سیستم در امتداد محورهای ثابت دستگاه مختصات کلی تعریف شدهاند. نتیجه این نگرش متداول، ارائه معادلات حاکم بر حرکت سازه جداسازی شده به فرم خطی است. این در حالى است كه راستاى محورهاى معرف پارامترهاى سختى سازه، ثابت نبوده و امتداد آنها با زاویه پیچش کف جداساز دوران می کند. این نگرش جدید به مشخصات سازهای، منجر به تغییرات چشمگیر در معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار همبسته پیچشی-جانبی سازههای جداسازی شده نامنظم (فرم غیرخطی) خواهد شد. هدف در این تحقیق ارائه مدل غیرخطی معادلات حرکت برای سازه جداسازی شده نامتقارن یک طرفه و مقایسه آن با مدل خطی متداول است. در تحلیل عددی، 3 نوع سازه انتخاب می شود، که در یکی از آنها تفاضل اولین و دومین فرکانس همبسته پیچشی جانبی سازه و جداساز برابر فرکانس اول جهت متقارن است و در دیگری فرکانس اول پیچشی-جانبی جهت نامتقارن 2 برابر فرکانس اول جهت متقارن است و حال آنکه هیچ یک از دو شرط فوق در سازه آخر فراهم نیست. از اینرو، پاسخهای دو مدل در این 3 نوع سازه، تحت اثر تحریکات هارمونیک و زلزله کوبه، با یکدیگر مقایسه می شوند و برخی پدیده های غیرخطی به واسطه غیرخطی بودن اینرسی مورد بررسی قرار می گیرد.

2- معادلات حركت مدل

یک سازه یک طبقه جداسازی شده با پلان نامتقارن یکطرفه مورد بررسی قرار می گیرد. اساس مقاله بر پایه یک مدل سازهای با دو جرم قرار دارد. جرم ماینده روسازه (S) ساختمان و **m** جرم کف پایه (B) در بالای سیستم **m** جداگر است. پارامترهای سازهای نظیر سختی و میرایی جهت متقارن (X) در سازه با $\mathbf{x}_{ss} = \mathbf{x}_{ss}$ و در جداگر با \mathbf{x}_{ss} و \mathbf{x}_{ss} نشان داده می شود (شکل 1).

همان طور که در شکل 2 نشان داده شده، پیکربندی فرضی پلان نامتقارن یکجهته سازه و جداساز را تحت بردار تحریکات زمینلرزه rg در دو امتداد X و Y، درنظر بگیرید. این ساختمان دارای دیافراگم کف صلب با توزیع یکنواخت جرم و قابهای مسطح قرار گرفته در دو امتداد متعامد، است. در این تحقیق دو دستگاه مختصات تعریف می شود. دستگاه مختصات اول نصب شده در پایه ساختمان[20]، دستگاه مختصات کلی XYZ است و دومی نصب شده برکف جداساز، دستگاه مختصات محلی *xbybzb* است. مبدأ این دستگاه مختصات چرخان مرکز جرم جداساز است. دستگاه مختصات چرخان با زاویه

Lead-rubber bearing
 Friction pendulum system

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16



پیچش $heta_b$ دوران پیدا می کند و تمام جابه جایی ها، سختی ها و میرائی های سازه و جداساز در راستای این دستگاه تعریف می شود. دوران سازه $heta_s$ ، از مرتبه کوچکتری نسبت به دوران جداساز ۵۰، قرار دارد و تقریبا، بهعلت بزرگ بودن سختی های سازه نسبت به جداگر، سازه بهصورت یک جسم صلب بر روی یک لایه نرم قرار گرفته است، به همین دلیل، توصیف امتدادهای فنرهای سازه تقریباً در راستای موقعیت جدید زیرسازه (جداساز) درنظر گرفته شده که به تقریب نزدیکتر بوده و دستگاه دوران یافتهای با زاویه یپچش θ_{s} حول مرکز جرم سازه درنظر گرفته نشده است. حرکت جرم سازه و جداساز توسط 6 درجه آزادی توصیف میشود: Uos ،Uys ،Uxs درجات آزادی سازه و Uyb ،Uxb و Ueb درجات آزادی جداساز در امتداد محورهای دستگاه مختصات کلی و همین طور *Uyb ، Uxb ، Ues ، Uys ، Uxs و Ueb و Uyb د*ر امتداد محورهای دستگاه مختصات محلی. مرکز جرم و مرکز سختی عناصر مقاوم در سازه بهترتيب با C.M.s و C.R.s و در جداساز بهترتيب با C.M.b و C.R.b نشان داده شدهاند. مرکز جرم سازه و جداساز در یک امتداد حول محور قائم (Z) قرار می گیرد. به سبب توزیع نامتقارن سختی، صرفاً حول محور ۲، مرکز سختی در سازه و جداساز بهترتیب به فاصله e_{xb} و e_{xb} در امتداد محور X از مرکز جرم قرار دارد. خروج از مرکزیتهای exs و exs توسط روابط (1) و (2) تعیین مىشوند.

$$\boldsymbol{e}_{xb} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{x}_{ib} \boldsymbol{k}_{yib}}{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{k}_{yib}}$$
(1)

$$\boldsymbol{e}_{ss} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \boldsymbol{x}_{is} \boldsymbol{k}_{yis}}{\sum_{i=1}^{M} \boldsymbol{k}_{yis}}$$
(2)

که در آنها K_{yib} سختی i امین عنصر مقاوم جداساز موازی با محور Y و X_{ib} فاصله آن تا محور Y و N تعداد عناصر مقاوم جهت Y جداساز است. همچنین، K_{yis} سختی i امین عنصر مقاوم سازه موازی با محور Y و X_{is} فاصله آن تا محور Y و M تعداد عناصر مقاوم جهت Y سازه است.

در شکل 2-(الف)، درجات آزادی بیان شده در امتداد محورهای ثابت دستگاه مختصات کلی XYZ تعریف شدند. همچنین، مشخصات استاتیکی و دینامیکی سازه و جداساز، شامل سختی (k_{xh} ، k_{ys} ، k_{xh} ، k_{ys} k_{ys} و $(k_{\theta b})$ و میرائی (k_{xb} ، k_{xb} ، k_{xb} , k_{ys} (k_{xh}) عناصر مقاوم سازهای، بهصورت متغیرهای کلی و در امتداد محورهای این دستگاه مختصات کلی نصب شده بر پایه ساختمان تعریف می شوند. این بدین معنی است که این پارامترها مستقل از دوران d_b ، ناشی از پیچش کف جداساز فرض شدند. این در حالی است که محورهای معرف پارامترهای سختی سازه ثابت نبوده و امتداد آنها با

زاویه پیچش کف جداساز دوران می کند؛ به تعبیر دیگر بهتر آن است که پارامترهای سازهای نظیر سختی و میرائی بهصورت متغیرهای محلی و در امتداد محورهای دستگاه مختصات چرخان ۸۵۷٬۲۵ نصب شده در مرکز جرم جداساز تعریف شوند (شکل 2-ب). به عبارت دیگر، در نگرش متداول، عناصر مقاوم سازهای به صورت فنرها و میراگرهایی با راستای بدون تغییر در دستگاه مختصات زمین درنظر گرفته میشوند. لیکن در واقعیت امر، نیروهای فنر و میراگر در سازه نامتقارن جداسازی شده، به سبب پیچش ایجاد شده در آن هنگام وقوع زلزله و باد، ناگزیر از تغییر جهت و راستا در امتداد جدید طبقه پیچش یافتهاند، چراکه این نیروها ناشی از مقاومت عناصر مقاوم سازهای (همان تیرها و ستونها در قابهای مسطح یا اسکلت ساختمانی و یا صفحات موازی فولاد و لاستیک الاستومر در عناصر جداساز) آرایش یافته در امتدادهای متعامد و مقید به راستای کف طبقات سازهاند و در پی دوران طبقات سازه، این عناصر در امتداد جدید قرار خواهند گرفت. در واقعیت امر، این عناصر مقاوم نظیر تیرها و ستونها در قابهای مسطحی در دو امتداد متعامد که در راستای کف طبقات مقید شدهاند، قرار می گیرند. هنگام وقوع زلزله و باد، مقید شدن عناصر مقاوم سازهای سبب تغییر و پیچش آنها حین پیچش کف طبقات قابهای مقاوم صفحهای میشود.

لذا، در نگرش جدید، با درنظر گرفتن ماهیت غیرثابت راستای نیروهای فنرها و میراگرها، پارامترهای سازهای نظیر سختی و میرائی در امتداد محورهای دستگاه مختصات محلی متصل به مرکز جرم زیرسازه (جداساز) و به صورت تابعی از زاویه پیچش کف زیرسازه (bb) تعریف شدهاند.

جهت دستیابی به معادلات مدلهای خطی و غیرخطی، روش لاگرانژی ارائه میشود[22.2]. در روش لاگرانژی با درنظر گرفتن مولفههای دستگاه مختصات کلی و محلی بهعنوان مولفههای تعمیم یافته و نوشتن انرژیهای پتانسیل و جنبشی و در پی تشکیل تابع لاگرانژ میتوان به معادلات حاکم بر حرکت در دستگاه مختصات چرخان دست یافت. معادلات حرکت سازه جداسازی شده در دستگاه مختصات کلی و محلی از رابطه (3) به دست میآید.

$$\boldsymbol{F}_{qi} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}_i} \right) - \frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{q}_i}$$
(3)

که در آن q_i مولفههای مختصات تعمیم یافته هستند، که همان مولفههای جابهجاییهای کلی U_{X5} , U_{Y5} , U_{X6} , U_{Y5} و U_{P0} و U_{P0} و U_{P0} و U_{xb} , U_{yc} U_{yb} , U_{yb} , U_{yc} , U_{yb}

$$V = \frac{1}{2} k_{xb} u_{xb}^{2} + \frac{1}{2} k_{yb} \left(u_{yb} + e_{xb} u_{\partial b} \right)^{2} + \frac{1}{2} k_{\partial Rb} u_{\partial b}^{2} + \frac{1}{2} k_{xs} \left(u_{xs} - u_{yb} \right)^{2} + \frac{1}{2} k_{ys} \left[\left(u_{ys} - u_{yb} \right) + e_{xs} \left(u_{\partial s} - u_{\partial b} \right) \right]^{2} + \frac{1}{2} k_{\partial Rs} \left(u_{\partial s} - u_{\partial b} \right)^{2}$$
(4)

که در آن *korb* سختی پیچشی جداساز و *kors* سختی پیچشی سازه حول محور سختی هستند و بهصورت رابطه (5) و (6) تعریف میشوند.

$$\boldsymbol{k}_{\partial \boldsymbol{R} \boldsymbol{b}} = \sum_{l=1}^{M} \boldsymbol{k}_{\boldsymbol{x} \boldsymbol{i} \boldsymbol{b}} \boldsymbol{y}^{2}_{\boldsymbol{i} \boldsymbol{b}} + \sum_{l=1}^{N} \boldsymbol{k}_{\boldsymbol{y} \boldsymbol{i} \boldsymbol{b}} \left(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i} \boldsymbol{b}} - \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{x} \boldsymbol{b}} \right)^{2}$$
(5)

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.1.0



(ب) **شکل 2** دستگاه مختصات کلی XYZ و محلی XbybZb ، و امتداد مشخصات استاتیکی و دینامیکی سازه و جداساز شامل سختی و میرائی در مدل، الف) خطی، و ب) غیرخطی

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{xb} \boldsymbol{c}_{yb} + \boldsymbol{e}_{xs} \boldsymbol{c}_{ys} \end{pmatrix} \dot{\boldsymbol{u}}_{\partial b} - \boldsymbol{c}_{ys} \dot{\boldsymbol{u}}_{ys} - \boldsymbol{e}_{xs} \boldsymbol{c}_{ys} \dot{\boldsymbol{u}}_{\partial s} + \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}_{xb} \boldsymbol{k}_{yb} + \boldsymbol{e}_{xs} \boldsymbol{k}_{ys} \end{pmatrix} \boldsymbol{u}_{\partial b} - \boldsymbol{k}_{ys} \boldsymbol{u}_{ys} - \boldsymbol{e}_{xs} \boldsymbol{k}_{ys} \boldsymbol{u}_{\partial s} = -\boldsymbol{m}_{b} \dot{\boldsymbol{u}}_{gY}$$
(16)

$$\boldsymbol{m}_{b}\boldsymbol{r}_{b}^{2}\boldsymbol{\ddot{u}}_{\partial b} + \left(\boldsymbol{c}_{\partial b} + \boldsymbol{c}_{\partial s}\right)\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial b} + \left(\boldsymbol{k}_{\partial b} + \boldsymbol{k}_{\partial s}\right)\boldsymbol{u}_{\partial b} + \left(\boldsymbol{e}_{xb}\boldsymbol{c}_{yb} + \boldsymbol{e}_{xc}\boldsymbol{c}_{yc}\right)\boldsymbol{\dot{u}}_{yb} - \boldsymbol{e}_{xc}\boldsymbol{c}_{ys}\boldsymbol{\dot{u}}_{ys} - \boldsymbol{c}_{\partial s}\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial s} + \left(\boldsymbol{e}_{xb}\boldsymbol{k}_{yb} + \boldsymbol{e}_{xs}\boldsymbol{k}_{ys}\right)\boldsymbol{u}_{yb} - \boldsymbol{e}_{xs}\boldsymbol{k}_{ys}\boldsymbol{u}_{ys} - \boldsymbol{k}_{\partial s}\boldsymbol{u}_{\partial s} = \mathbf{0}$$
(17)

$$\boldsymbol{m}_{s} \boldsymbol{\dot{u}}_{rs} + \boldsymbol{c}_{ss} \boldsymbol{\dot{u}}_{rs} + \boldsymbol{k}_{ss} \boldsymbol{u}_{rs} - \\ \boldsymbol{c}_{ss} \boldsymbol{\dot{u}}_{rb} - \boldsymbol{e}_{ss} \boldsymbol{c}_{ss} \boldsymbol{\dot{u}}_{ob} + \boldsymbol{e}_{ss} \boldsymbol{c}_{ss} \boldsymbol{\dot{u}}_{os} - \\ \boldsymbol{k}_{ss} \boldsymbol{u}_{rb} - \boldsymbol{e}_{ss} \boldsymbol{k}_{ss} \boldsymbol{u}_{ob} + \boldsymbol{e}_{ss} \boldsymbol{k}_{ss} \boldsymbol{u}_{os} = -\boldsymbol{m}_{s} \boldsymbol{\dot{u}}_{gr}$$
(18)

 $m_{s}r_{s}^{2}\ddot{u}_{\theta s}+c_{\theta s}\dot{u}_{\theta s}+k_{\theta s}u_{\theta s}-$

$$\begin{aligned} e_{xs}c_{ys}\dot{u}_{\gamma b} - c_{\partial s}\dot{u}_{\partial b} + e_{xs}c_{ys}\dot{u}_{\gamma s} - \\ e_{xs}k_{ys}u_{\gamma b} - k_{\partial s}u_{\partial b} + e_{xs}k_{ys}u_{\gamma s} = \mathbf{0} \end{aligned} \tag{19}$$

روابط (8) تا (13) را در رابطه (7) جایگذاری نموده و رابطه (3) با جانشینی مولفههای مختصات محلی در مولفه تعمیم یافته *،*p، به کار برده می شود و بدین ترتیب معادلات دیفرانسیل غیرخطی حاکم بر حرکت دیافراگم صلب سازه یک طبقه جداسازی شده نامتقارن یک طرفه، با توجه به شکل 2- براساس روابط (20) تا (25) حاصل می شود.

- دو معادله غیرخطی همبسته سازه و جداساز در جهت متقارن:

$$m_{b}\ddot{u}_{xb}^{b} + \left(\boldsymbol{c}_{xb} + \boldsymbol{c}_{xs}\right)\dot{u}_{xb}^{b} + \left(\boldsymbol{k}_{xb} + \boldsymbol{k}_{xs}\right)\boldsymbol{u}_{xb}^{b} - \boldsymbol{c}_{xs}\dot{\boldsymbol{u}}_{xs}^{b} - \boldsymbol{k}_{xs}\boldsymbol{u}_{xs}^{b} = -m_{b}\left(-2\dot{\boldsymbol{u}}_{yb}^{b}\dot{\boldsymbol{u}}_{\partial b} - \boldsymbol{u}_{yb}^{b}\dot{\boldsymbol{u}}_{\partial b} - \boldsymbol{u}_{xb}^{b}\dot{\boldsymbol{u}}_{\partial b}^{2} + \ddot{\boldsymbol{u}}_{gx}\cos\theta_{b} + \ddot{\boldsymbol{u}}_{gy}\sin\theta_{b}\right)$$
(20)

$$m_{x}\ddot{u}_{xb}^{b} + c_{xb}\dot{u}_{xb}^{b} + k_{xs}u_{xb}^{b} - c_{xb}\dot{u}_{xb}^{b} - k_{xs}u_{xb}^{b} = -m_{s}\left(-2\dot{u}_{ys}^{b}\dot{u}_{\theta b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\theta b} - u_{xs}^{b}\dot{u}_{\theta b}^{2} + \dot{u}_{gx}\cos\theta_{b} + \dot{u}_{gy}\sin\theta_{b}\right)$$
(21)

:خپهار معادله غیرخطی همبسته سازه و جداساز در جهت نامتقارن $m_{b}\dot{u}_{,b}^{a} + (c_{,b} + c_{,c})\dot{u}_{,b}^{b} + (k_{,b} + k_{,c})\dot{u}_{,b}^{b} +$

$$\begin{pmatrix} e_{xb}c_{yb} + e_{xc}c_{ys} \end{pmatrix} \dot{u}_{\theta b} - c_{yc}\dot{u}_{ys}^{b} - e_{xc}c_{yc}\dot{u}_{\theta s} + \\ \begin{pmatrix} e_{xb}k_{yb} + e_{xc}k_{ys} \end{pmatrix} u_{\theta b} - k_{yc}u_{ys}^{b} - e_{xc}k_{ys}u_{\theta s} = \\ - m_{b}\left(2\dot{u}_{xb}^{b}\dot{u}_{\theta b} + u_{xb}^{b}\ddot{u}_{\theta b} - u_{yb}^{b}\dot{u}_{\theta b}^{2} - \dot{u}_{gx}\sin\theta_{b} + \dot{u}_{gy}\cos\theta_{b}\right)$$
(22)

$$\boldsymbol{m}_{b}\boldsymbol{r}_{b}^{2}\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial b}^{b} + \left(\boldsymbol{c}_{\partial b}^{b} + \boldsymbol{c}_{\partial s}^{b}\right)\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial b}^{b} + \left(\boldsymbol{k}_{\partial b}^{b} + \boldsymbol{k}_{\partial s}^{b}\right)\boldsymbol{u}_{\partial b}^{b} + \left(\boldsymbol{e}_{xb}^{b}\boldsymbol{c}_{yb}^{b} + \boldsymbol{e}_{xs}^{c}\boldsymbol{c}_{ys}^{b}\right)\boldsymbol{\dot{u}}_{yb}^{b} - \boldsymbol{e}_{xs}^{c}\boldsymbol{c}_{ys}^{b}\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial s}^{b} - \boldsymbol{c}_{\partial s}^{b}\boldsymbol{\dot{u}}_{\partial s}^{b} + \left(\boldsymbol{e}_{xb}^{b}\boldsymbol{k}_{yb}^{b} + \boldsymbol{e}_{xs}^{b}\boldsymbol{k}_{ys}^{b}\right)\boldsymbol{u}_{yb}^{b} - \boldsymbol{e}_{xs}^{c}\boldsymbol{k}_{ys}\boldsymbol{u}_{ys}^{b} - \boldsymbol{k}_{\partial s}^{b}\boldsymbol{u}_{\partial s}^{b} = \mathbf{0}$$
(23)

$$\boldsymbol{k}_{\partial \boldsymbol{R}\boldsymbol{s}} = \sum_{i=1}^{p} \boldsymbol{k}_{xis} \boldsymbol{y}^{2}_{is} + \sum_{i=1}^{q} \boldsymbol{k}_{yis} \left(\boldsymbol{x}_{is} - \boldsymbol{e}_{xs} \right)^{2}$$
(6)

k_xb و K_{yb} برابر مجموع سختی عناصر مقاوم جداساز در جهات k_xb vb v, x_b و K_{yb} برابر مجموع سختی عناصر مقاوم سازه در جهات k_b و k_b هستند. سپس، انرژی جنبشی کل به صورت رابطه (7) محاسبه میشود.

$$T = \frac{1}{2}m_{b}\left(\frac{du_{xb}}{dt}\right)^{2} + \frac{1}{2}m_{b}\left(\frac{du_{yb}}{dt}\right)^{2} + \frac{1}{2}m_{b}r_{b}^{2}\left(\frac{du_{ab}}{dt}\right)^{2} + \frac{1}{2}m_{s}\left(\frac{du_{xb}}{dt}\right)^{2} + \frac{1}{2}m_{s}\left(\frac{du_{yb}}{dt}\right)^{2} + \frac{1}{2}m_{s}r_{s}^{2}\left(\frac{du_{ab}}{dt}\right)^{2}$$
(7)

که در آن *r*b شعاع ژیراسیون جداساز حول مرکز جرم و *r*s شعاع ژیراسیون سازه حول مرکز جرم هستند. حال این متغیرهای کلی با متغیرهای محلی با دوران محورهای محلی به مقدار *db* در جهت ساعتگرد و با استفاده از ماتریس دوران نظیر آن به یکدیگر توسط روابط (8) تا (13) مرتبط می شوند.

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{x}s} = \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{x}s}^{\boldsymbol{b}} \cos \theta_{\boldsymbol{b}} - \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{y}s}^{\boldsymbol{b}} \sin \theta_{\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{x}}$$
(8)

$$\boldsymbol{u}_{y_{s}} = \boldsymbol{u}_{s}^{b} \sin \theta_{b} + \boldsymbol{u}_{y_{s}}^{b} \cos \theta_{b} + \boldsymbol{u}_{gy} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{s}} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{b}} = \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{x}\boldsymbol{b}}^{*} \cos \theta_{\boldsymbol{b}} - \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{s}}^{*} \sin \theta_{\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{x}} \tag{(11)}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{b}} = \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{b}}^{\boldsymbol{b}} \sin \theta_{\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{b}}^{\boldsymbol{b}} \cos \theta_{\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{y}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{b}} = \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{b}} \tag{13}$$

اکنون با توجه به شکل 2-الف و جایگذاری روابط (4) و (7) در رابطه (3) و بررسی روابط موجود تنها در مختصات کلی، معادلات دیفرانسیل خطی حاکم بر حرکت دیافراگم صلب سازه یک طبقه جداسازی شده نامتقارن یک طرفه با جانشینی مولفههای مختصات کلی در مولفه تعمیم یافته q روابط (14) تا (19) حاصل میشود.

- دو معادله خطی همبسته سازه و جداساز در جهت متقارن:

$$m_{b}\dot{u}_{xb} + (c_{xb} + c_{xs})\dot{u}_{xb} + (k_{xb} + k_{xs})u_{xb} - c_{xs}\dot{u}_{xs} - k_{xs}u_{xs} = -m_{b}\dot{u}_{gx}$$
(14)
$$m_{s}\dot{u}_{xb} + c_{xs}\dot{u}_{xb} + k_{xs}u_{xb} - c_{xs}\dot{u}_{xb} - k_{xs}u_{xb} = -m_{s}\dot{u}_{sx}$$
(15)

$$\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{b}} \boldsymbol{\dot{\boldsymbol{u}}}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{b}} + \left(\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{s}} \right) \boldsymbol{\dot{\boldsymbol{u}}}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{b}} + \left(\boldsymbol{k}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{k}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{s}} \right) \boldsymbol{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{b}} +$$

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16

$$m_{x}\ddot{u}_{ys}^{b} + c_{ys}\dot{u}_{ys}^{b} + k_{ys}u_{ys}^{b} - c_{xs}c_{ys}\dot{u}_{\partial b}^{b} + e_{xs}c_{ys}\dot{u}_{\partial s}^{b} - k_{ys}u_{yb}^{b} - e_{xs}k_{ys}u_{\partial b}^{b} + e_{xs}k_{ys}u_{\partial s}^{b} - k_{ys}u_{yb}^{b} - e_{xs}k_{ys}u_{\partial b}^{b} + e_{xs}k_{ys}u_{\partial s}^{b} = -m_{s}\left(2\dot{u}_{xs}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{xs}^{b}\ddot{u}_{\partial b}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} - \ddot{u}_{gx}\sin\theta_{b} + \ddot{u}_{gy}\cos\theta_{b}\right)$$
(24)
$$m_{s}r_{s}^{s}\dot{u}_{\partial s}^{b} + c_{\partial s}\dot{u}_{\partial s} + k_{\partial s}u_{\partial s}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} - u_{ys}^{b}\dot{u}_{\partial b}^{b} + u_{ys}^{$$

$$\boldsymbol{e}_{ss}\boldsymbol{c}_{ys}\dot{\boldsymbol{u}}_{yb}^{b} - \boldsymbol{c}_{os}\dot{\boldsymbol{u}}_{ob}^{b} + \boldsymbol{e}_{ss}\boldsymbol{c}_{ys}\dot{\boldsymbol{u}}_{yb}^{b} - \\ \boldsymbol{e}_{ss}\boldsymbol{k}_{ys}\boldsymbol{u}_{yb}^{b} - \boldsymbol{k}_{os}\boldsymbol{u}_{ob} + \boldsymbol{e}_{ss}\boldsymbol{k}_{ys}\boldsymbol{u}_{ys}^{b} = \mathbf{0}$$
(25)

که در آن U_{gv} U_{gv} U_{gv} U_{gv} U_{gv} V_{gv} و V_{rot} رمین در جهات X و Y_{rot} V_{gv} V_{g

مشاهده میشود که عبارتهای سمت چپ روابط (14) تا (19) با عبارتهای سمت چپ روابط (20) تا (25) کاملاً مشابه است. البته، بردارهای جابهجایی، سرعت و شتاب در روابط (14) تا (19) در امتداد محورهای دستگاه مختصات کلی تعریف شدهاند. تفاوت چشمگیر معادلات خطی و غیرخطی در عبارات سمت راست آنهاست. وجود جملات همبسته غیرخطی اینرسی بین درجات آزادی پیچشی و جانبی سازه و جداساز در روابط (20) تا (25)، عملکرد غیرخطی را در مدل پیشنهاد شده ایجاب می کند، درحالی که وجود جملات خطی شامل شتابهای انتقالی و تکانش زمین در روابط (14) تا (19) سبب بروز رفتار خطی شده است. بدیهی است که در تحلیل عددی، باید پاسخهای مدل غیرخطی به دست آمده از روابط (20) تا (25) توسط ماتریس دوران به دستگاه مختصات کلی انتقال یابد و یا به عبارتی محورهای محلی باید به مقدار $_{d}$ و در جهت ساعتگرد دوران پیدا کنند و سپس با پاسخهای خطی به دست آمده از روابل (14) تا (19)، مقایسه شوند.

3- تحليل عددى

ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل خطی و غیرخطی، با مطالعه پارامتری بر روی تحریکات هارمونیک و زوایای مختلف ورود زلزله کوبه به سازه صورت می گیرد. دورهی تناوب روسازه برابر با پریود طبیعی نوسان جانبی جهت متقارن سازه تقریبا برابر $T_{ss} = 0.15$ است، یعنی فرکانس طبیعی نوسان آن برابر (rad/s) 20 α (rad/s) است، یعنی فرکانس طبیعی نوسان آن یکسان است، یا به عبارتی شعاع ژیراسیون در پلان سازه و در پلان جداساز با یکدیگر برابر است. جرم سازه m_s به جرم طبقه جداسازی شده m_b دارای نسبت 5 به 1 درنظر گرفته شده است. تمام فرکانسهای سازه و جداساز نسبت به فرکانس جهت متقارن سازه (m_{ss}) سنجیده می شوند. نسبت فرکانس پیچشی و جانبی سازه و جداساز نسبت به فرکانس جهت متقارن

$$\Omega_{\mathbf{xb}} = \frac{\omega_{\mathbf{xb}}}{\omega_{\mathbf{xs}}} \,_{\mathbf{x}} \Omega_{\theta \mathbf{b}} = \frac{\omega_{\theta \mathbf{b}}}{\omega_{\mathbf{xs}}} \,_{\mathbf{x}} \Omega_{\mathbf{yb}} = \frac{\omega_{\mathbf{yb}}}{\omega_{\mathbf{xs}}}$$

$$\Omega_{\mathbf{xs}} = \frac{\omega_{\mathbf{xs}}}{\omega_{\mathbf{xs}}} \,_{\mathbf{x}} \Omega_{\theta \mathbf{s}} = \frac{\omega_{\theta \mathbf{s}}}{\omega_{\mathbf{xs}}} \,_{\mathbf{x}} \Omega_{\mathbf{ys}} = \frac{\omega_{\mathbf{ys}}}{\omega_{\mathbf{xs}}}$$
(26)

که در آن فرکانس های غیرهمبسته انتقالی w_{xx} ، w_{yx} , w_{yx} و w_{yx} و w_{yx} و w_{yx} پیچشی w_{xx} و w_{yx} یکسان هر پیچشی w_{xx} و w_{xx} است که به سبب سختی یکسان هر جداساز، یا الاستومر، در دو امتداد X و Y، فرکانس های طبیعی غیر همبسته جانبی در امتداد X و Y در پلان جداساز، یعنی فرکانس های w_{xx} و w_{yx} و از این رو نسبت های فرکانسی آنها برابر است $(w_{yx} = \Omega_{yx})$.

پاسخهای تاریخچه زمانی و محتوای فرکانسی دو مدل خطی و غیرخطی برای 3 نوع سازه مورد بررسی قرار می گیرد. در حالت اول نسبت فرکانس $(\Omega_{_{ hetab}} = 0.15)$ (0/15 پیچشی جداساز به فرکانس جانبی متقارن سازه برابر با 0/15و خروج از مرکزیت جداساز برابر با $0/6 \left(e_{xb} = 0.6 \right)$ درنظر گرفته می شود. در حالت دوم نسبت فرکانس پیچشی جداساز به فرکانس جانبی متقارن سازه برابر با 0/105 و خروج از مرکزیت جداساز برابر با 0/8 هستند و در حالت سوم این مقادیر بهترتیب برابر با 0/15 و 1/03 هستند. سایر نسبتها کاملاً یکسان و مشابه یکدیگرند که در جدول 1 ارائه شده است. انتخاب مشخصات هندسی و دینامیکی 3 نوع سازه بر طبق ضوابط طراحی جداساز (منظور بزرگی سختی های سازه نسبت به سختی جداگر) به گونهای بوده است که فرکانس طبیعی همبسته اول جهت متقارن (ω_{x1}) نزدیک به فرکانس جداساز است، حال آنکه دومین فرکانس طبیعی همبسته (ω_{x2}) نزدیک به (ω_{xb}) فرکانس سازه (w_{ss}) است. بدیهی است اگر نسبتهای فرکانسی سازه و جداگر (10 به 1) کمتر باشد، طبیعتاً سازه و جداساز فرکانسهای همبسته نزدیک به هم پیدا میکنند. این امر در چهار فرکانسهای طبیعی همبسته در جهات نامتقارن و پیچشی نیز قابل مشاهده است. فرکانسهای اول و دوم (*س*هره و (ωνθε) نزدیک به فرکانس پیچشی-جانبی جداساز (ωνθε و ωνθε) و دو فرکانس ($\omega_{y\theta\delta}$ و $\omega_{y\theta\delta}$ و $\omega_{y\theta\delta}$ نزدیک به فرکانس پیچشی-جانبی سازه ($\omega_{y\theta\delta}$ و $\omega_{y\theta\delta}$) دیگر است. این گونه میتوان برداشت کرد که در جهت پیچشی و جانبی نیز عملکرد جداساز مستقل از سازه است. به عبارت دیگر، در بررسی رفتار دینامیکی، سازه بهصورت یک جسم صلب بدون تغییر و جداساز بهصورت یک سازه نرم و متاثر از تحریکات زلزله است. هدف از انتخاب این 3 نوع سازه، تخصيص نسبتهاى فركانسى همبسته طبيعى مشخص به آنها بوده است. نسبتها در سازه دوم به گونهای انتخاب شدهاند که حداقل یکی از نسبتهای فرکانسی طبیعی همبسته پیچشی-جانبی سازه و جداساز برابر 0/5 شود و همچنین این نسبتها در سازه سوم به گونهای انتخاب شدهاند که تفاضل اولين و دومين نسبت فركانسي طبيعي همبسته پيچشي-جانبي سازه و جداساز برابر 1 شوند که هیچ کدام از این دو ویژگی در سازه اول فراهم نشد. فرکانسهای همبسته طبیعی و نسبتهای فرکانسی 3 نوع سازه بهترتیب در جدول های 2 و 3 ارائه شدهاند.

جدول 1 مشخصات سازه ای 3 نوع سازه

		,	0	,		0.				
e _{xs} /r	e _{xb} /r	Ω	ys	$\Omega_{_{ heta s}}$	Ω_{yt}	b	$\Omega_{_{\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!$	Ω	b	سازه
0/2	0/6	0	/5	0/7	0/1	(0/15	0/1		1
0/2	0/8	0	/5	0/7	0/1	0	/105	0/1	I	2
0/2	1/03	0	/5	0/7	0/1	(0/15	0/1	I	3
		ع سازه	مى 3 نوع	ی طبیہ	ئانسھا	ل 2 فر ک	جدوا			_
$\omega_{y\theta}$	4	$\omega_{_{y\! heta3}}$	$\omega_{_{y\!\theta\!2}}$	ω	y€1	ω_{x^2}	(w_{x1}	سازه	_
110/	98	76/42	9/70	5/-	40	154/4	76	/25	1	
110/	06	76/25	8/38	3/	12	154/4	76	/25	2	
111/	14	76/20	10/30	4/	04	154/4	76	/25	3	
	ع سازه	مى 3 نوع	سته طبيا	ى ھمبى	فركانس	تھای	3 نسب	جدول	_	_
Ω_2		2	2	Ω	D _{xs}	زه	سار			
	1/552		0/8	363		1		1	-	
1/340		0	/5		1	:	2			
1/646		0/6	646		1		3	_		
									-	

پاسخهای این 3 نوع سازه، تحت تحریکات نیروهای هارمونیک با توجه به تغییر دامنه تحریک A و فرکانس تحریک Ω و همچنین تحت زلزله کوبه با زوایای مختلف ورود تحریک β نسبت به محور X مورد بررسی قرار می گیرد. این پاسخها برای $\mathbf{0}$ درجه آزادی حرکت مراکز جرم کف طبقه سازه و جداساز یعنی U_{x5} , U_{x5} , U_{x6} , U_{y6} لو لو کانس بررسی میشوند. پاسخهای حوزه فرکانسی با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع آمدهاند. مقادیر فرکانس نظیر بیشینه یا پیک پاسخها در نمودارهای محتوای فرکانسی پاسخهای ارتعاش واداشته این سازهها، معرف فرکانسهای طبیعی مدهای غالب سازه و یا فرکانس نظیر تحریک است و مقادیر پیک معرف نظیر آنها و یا توسط فرکانس نظیر تحریک است.

3-1- پاسخ به تحریک هارمونیک

بردار نیروی تحریک یا شتاب تکانش زمین \overline{g} را به صورت نیروی هارمونیک $A\omega^2 \sin(\omega t)$ برابر با $A\omega^2 \sin(\omega t)$ تعریف می شود، که در آن ω فرکانس تحریک و $A\omega^2 \sin(\omega t)$ نسبت دامنه جابه جایی تکانش زمین بر شعاع ژیراسیون هستند. در ادامه مطالعات به جای فرکانس تحریک ω ، از پارامتر بی بعد Ω برابر نسبت فرکانس العات به جای فرکانس تحریک ω ، از پارامتر بی بعد Ω برابر نسبت مطالعات به جای فرکانس تحریک ω ، از پارامتر بی بعد Ω برابر نسبت نسبت دامنه جابه جایی تکانش زمین ω_{α_1} و ω_{α_2} و λ مطالعات به می می فرکانس تحریک ω ، از پارامتر بی فرکانس طبیعی مد اول فرکانسی است. همچنین، زاویه ورود شتاب هارمونیک به سازه، برابر β نسبت به امتداد X است که منجر به دو مولفه شتاب تکانش زمین $u_{gy} = A(\Omega\omega_{x1}t)^2 \sin(\Omega\omega_{x1}t) \sin\beta$ و $u_{gx} = A(\Omega\omega_{x1}t) \cos\beta$ می شود. دامنه تحریک برابر با 50/0، زاویه ورود تحریک β و نسبت میرائی سازه به ترتیب برابر با 50

در شکلهای ارائه شده، پاسخ مدل خطی به صورت خط ممتد (قرمز رنگ) و پاسخ مدل غیرخطی با خطچین (مشکی رنگ) نشان داده شده است. در ابتدا سازه 1 تحت تحریک هارمونیک با فرکانس تحریک برابر فرکانس مد اول جهت متقارن قرار داده شد ($1=\Omega$). در شکلهای 3 و 4، پاسخهای زمانی و فرکانسی ارتعاش واداشته سازه نوع 1 ارائه شدهاند که مشاهده میشود پاسخهای دو مدل خطی و غیرخطی دقیقاً برهم منطبق است. در شکل 4، مقادیر پیک پاسخها در سازه و جداساز در فرکانس مد اول جهت متقارن، در جهات x، y و θ رخ داده و علاوهبر آن در جهات y و θ پیک





 $\Omega = 1$ شکل 4 پاسخ فرکانسی سازہ نوع 1 تحت تحریک تناوبی با فرکانس تحریک 1

شده است همان گونه که بیان شد، این مقادیر پیک، معرف میزان جذب انرژی تحریک ورودی به سیستم سازهای توسط فرکانس نظیر تحریک است.

در این تحقیق مشاهده شد که انطباق پاسخهای دو مدل در سازه نوع 1 برای مقادیر بیشتر دامنه تحریک نیز محقق می شود و به عبارت دیگر این انطباق مستقل از اندازه دامنه تحریک است. همچنین، مشاهده شد این انطباق از فرکانس و زوایای ورود تحریک نیز مستقل است.

سازه 2 تحت تحریک هارمونیک با فرکانس تحریک برابر با نخستین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی و فرکانس مد اول جهت متقارن قرار داده شد. در شکلهای 5 و 6، پاسخهای زمانی و فرکانسی ارتعاش واداشته سازه نوع 2 تحت این دو فرکانس تحریک ارائه شدهاند که مشاهده میشود، در مقودارهای تاریخچه زمانی، در جهت x، مدل غیرخطی از یک لحظه مشخص مقدار متفاوتی نسبت به مدل خطی نشان میدهد که در جهات Y و θ نیز این مقدار متفاوتی نسبت به مدل خطی نشان میدهد که در جهات Y و θ نیز این مقدار متفاوتی نسبت به مدل خطی نشان میدهد که در جهات Y و θ نیز این بیزحلی دارای پیک پاسخ در فرکانس مد اول جهت متقارن است، ولی در جهات Y و θ هر دو مدل دارای پیک پاسخی در نخستین فرکانس همبسته نیز خطی دارای پیک پاسخ در فرکانس مد اول جهت متقارن است، ولی در نشان میدهد. در شکل 6، در پاسخ فرکانسی جهت x، مدل خطی و غیرخطی دارای پیک پاسخ در فرکانس مد اول جهت متقارن است به نیرخطی دارای پیک پاسخ در فرکانس مد اول جهت متقارن است که این مقدار در نشان میدهد. در شکل 6، در پاسخ فرکانسی جهت x، مدل خطی و غیرخطی دارای پیک پاسخ در فرکانس مد اول جهت متقارن است که این مقدار در درای پیک پاسخ در نخستین فرکانس هماین میدار در مدل غیرخطی دارای در محهت مقارن است که این میدر مدل غیر خطی مشاه داری همتر است، ولی در جهان Y و θ مدل غیر خطی دارای در مدل خیر حلی مشاهده نمیشود.



مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16





شکل 6 پاسخ زمانی و فرکانسی سازه نوع 2 تحت تحریک تناوبی با فرکانس تحریک $\Omega = 1$

بر مبنای تئوری خطی، دامنه پاسخ سازه با میرائی در جهت متقارن x، نخست با زمان بهطور یکنوا افزایش یافته و سپس به سبب میرائی در مقدار مشخصی ثابت میماند و این مقدار دامنه حالت مانا، طبق شکل 6 برابر 0/6 است و این پدیده تشدید اصلی¹نامیده می شود. ثابت بودن دامنه پاسخ هارمونیک با نسبت فرکانسی $\Omega = 1$ در جهات پیچشی و نامتقارن نیز برقرار

در زمان های نخست دو مدل خطی و غیرخطی عملکرد مشابهی دارند، بدین معنی که درجه آزادی جهت متقارن بهطور مستقل و غیرهمبسته با درجات آزادی دیگر سازه رفتار مینماید، تا اینکه در یک لحظه معین، پاسخ جهت متقارن مقدار مشخصی از انرژی تحریک را جذب میکند، از آن لحظه به بعد عملکرد دو مدل متفاوت از یکدیگر خواهد بود. در مدل غیرخطی، برخلاف مدل خطی، تمامی درجات آزادی بهطور همبسته عمل میکنند، به گونهای که در لحظه یاد شده، که آن را لحظه اشباع می امند، انرژی جذبی توسط پاسخ جهت متقارن در حد مشخصی ثابت و اصطلاحاً اشباع شده و از آن لحظه به بعد مابقی انرژی تحریک جذبی جهت متقارن به جهات نامتقارن و پیچشی منتقل میشود. این انتقال انرژی در شکل 6 از فرکانس طبیعی θ بيشتر ($\Omega = \Omega_1$) بيشتر ($\Omega = \Omega_1$)، جهات y و صورت گرفته است. این رفتار مدل غیرخطی را پدیده اشباع² مینامند که در شکل 6 مشهود است. لیکن در شکل 5، پدیده اشباع رخ نمیدهد، یعنی انتقال انرژی بین مدها، و به عبارت دیگر، لحظه بروز رفتار غیرخطی، با نقطه شروع یا آستانه، همراه نیست، بلکه از همان ابتدای نوسان، انتقال انرژی از فرکانس طبیعی کمتر $(\Omega = \Omega_1)$ به فرکانس طبیعی بیشتر $(1 = \Omega)$ آغاز مے شود.

شکلهای 7 و 8، پاسخهای زمانی و فرکانسی ارتعاش واداشته سازه نوع 3 را تحت اولین و دومین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی نشان میدهند. تمایز بین پاسخهای مدل خطی و غیرخطی از لحظات ابتدایی در تحلیل تاریخچه زمانی در درجات آزادی مختلف قابل مشاهده است؛ بدین معنی که برخلاف پديده اشباع، لحظه مشخصي نظير لحظه اشباع بهعنوان لحظه شروع تغییر وجود ندارد. در شکل 7، بررسی پاسخ فرکانسی جهت x نشان میدهد که مدل غیرخطی دارای پیک پاسخ در $0 = \Omega$ است که با افزایش دامنه تحریک به مقدار این پیک نیز افزوده می شود. این به معنی جابه جایی یا انتقال خالص مرکز جرم دیافراگم صلب سازه در جهت متقارن، به نقطه

جدیدی غیر از نقطه تعادل استاتیکی (موقعیت اولیه مرکز جرم طبقه) است، به گونهای که ارتعاش یا نوسان مرکز جرم سازه حول این نقطه جدید رخ مىدهد، درحالى كه طبق تئورى خطى، تمامى نوسانات سازه بايد حول نقطه تعادل استاتیکی رخ دهد. همچنین، پیکهای پاسخ دیگری در هر دو مدل در این جهت مشاهده می شود، ولی در جهات y و θ هر دو مدل دارای پیک پاسخی در نخستین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی هستند که مدل خطی مقدار بیشتری را نسبت به غیرخطی نشان میدهد.

در شکل 8، بررسی پاسخ فرکانسی سازه نتیجه میدهد که انرژی مدل غیرخطی در جهات y و θ ، از دومین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی به اولین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی و نیز فرکانس مد اول جهت متقارن منتقل می شود. همچنین، در این جهات مدل خطی بر خلاف شکل 7، تنها در دومین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی تحریک شده است.

از ابتدای تحریک سازه، تمامی درجات آزادی در مدل غیرخطی برخلاف مدل خطی به طور همبسته عمل می کنند، به گونه ای که تحت تحریک هارمونیک با فرکانس $\Omega = \Omega_1$ ، بخشی از انرژی تحریک جذبی توسط درجات آزادی y و θ بهصورت پاسخ هارمونیک با فرکانس طبیعی پایینتر $\Omega = \Omega_1$ ، در همین درجات آزادی بروز میکند و مابقی انرژی تحریک جذبی به درجه آزادی جهت x، تحت پاسخ هارمونیک با فرکانس طبیعی بالاتر منتقل می شود. این رفتار مدل غیرخطی را پدیده انتقال انرژی³ می نامند که در شکل 7 مشهود است. همچنین، پیک پاسخ مدل غیرخطی در نسبت فرکانسی بین 1 و 1/5، که نظیر هیچ یک از فرکانسهای طبیعی سازه نیست، قابل مشاهده است. در شکل 8، پدیده انتقال انرژی با انتقال انرژی از فرکانس طبیعی به فرکانس های طبیعی دیگر، $\Omega = \Omega_1$ و $\Omega = \Omega_2$ همراه است. $\Omega = \Omega_2$

شکل 9 پاسخ زمانی و فرکانسی سازه نوع 3 را تحت تحریک تناوبی با دامنه تحریک 1/1 و فرکانس تحریک برابر فرکانس مد اول جهت متقارن نشان میدهد که مجدداً تفاوت بین دو مدل خطی و غیرخطی مشهود است.

تمام پدیدههای ایجاد شده در مدل غیرخطی ناشی از حضور جملات همبسته اینرسی غیرخطی در معادلات (20) تا (25) هستند. بررسی یاسخهای زمانی و فرکانسی جداساز نیز در سازه نوع 2 و 3 نتایج مشابهی را با سازه به همراه داشت. همچنین تفاوت بین دو مدل خطی و غیرخطی در زوایای مختلف ورود تحریک مشهود است و نیز این تفاوت با افزایش دامنه تحریک افزایش یافته و باعث بروز بینظمی⁴هایی در ارتعاشات سازه میشود.



³⁻ Energy transfer phenomenon 4- Chaotic

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16

¹⁻ Primary resonance 2- Saturation phenomenon

¹⁵⁸



شکل 9 پاسخ زمانی و فرکانسی سازه نوع 3 تحت تحریک تناوبی با دامنه تحریک $\Omega=1$ و فرکانس تحریک 1= Ω

3-2- پاسخ به تحریک زلزله

پاسخهای لرزهای دو مدل خطی و غیرخطی تحت زلزله کوبه 1995 و با زاویههای مختلف ورود تحریک β نسبت به محور X مقایسه می شوند. مقدار بیشینه شتاب زلزله کوبه به 1/0g مقیاس شده است (شکل 10). زاویه ورود تحریک β به ترتیب برابر با 0، 60 و 90 درجه نسبت به محور X و نسبت میرائی سازه 2% درنظر گرفته شده است.

شکل 11 پاسخهای زمانی و فرکانسی سازه نوع 1 را تحت زاویه تحریک 60 درجه برای دو مدل خطی و غیرخطی نشان میدهد و مشاهده میشود، پاسخهای دو مدل برای درجات آزادی مختلف در سازه نوع 1 برهم منطبق است. انطباق پاسخهای دو مدل در سازه نوع 1 برای مقادیر دیگر زاویه تحریک نیز محقق میشود و به عبارت دیگر این انطباق مستقل از زاویه ورود تحریک است.





شکل 11 پاسخ زمانی و فرکانسی سازه نوع 1 تحت زلزله کوبه تحت زاویه ورود تحریک 60 درجه نسبت به محور *X*

شکلهای 12، 13 و 14 پاسخهای زمانی و فرکانسی سازه نوع 2 را تحت زوایای تحریک بهترتیب 0، 60 و 90 درجه برای دو مدل خطی و غیرخطی نشان میدهند.

در شكل 12 مشاهده مىشود، هنگامى كه تحريك كاملاً در جهت متقارن سازه است، جابهجايى u_{xs} نسبت به جابهجايىهاى e_{0s} و u_{ys} مقادير بيشترى را از خود نشان مىدهد. جابهجايى پيچشى و جانبى سازه در مدل خطى مقدار صفر را نشان مىدهد، حال آنكه در مدل غيرخطى اين جابهجايى تا لحظه 8/8 ثانيه صفر است و از آن لحظه به بعد افزايش مىيابد. همچنين، مشاهده مىشود پاسخ مدل خطى و غيرخطى براى درجات آزادى جهت متقارن كاملاً برهم منطبق است. بررسى محتواى فركانسى نشان مىدهد كه بدب انرژى در جهت متقارن مقدار بيشترى را نشان مىدهد و در اين جهت پيك پاسخها در مدل خطى و غيرخطى با يكديگر برابر است كه در فركانس مد اول جهت متقارن رُخ مىدهد. همچنين، مشاهده مىشود كه پيك مدل غيرخطى رخ مىدهد. اين در حالى است كه مدر فركانس مدل غيرخطى رخ مىدهد، اين در حالى است كه مدل خطى در اين جهات مدل غيرخطى رخ مىدهد، اين در حالى است كه مدل خلى در مدل غيرخطى مخ مىدهد، اين در حالى است كه مدل خلى در مدل مدل غيرخلى در خمى بيك بيك بيم

شکل 13 نشان میدهد جابهجایی درجات آزادی سازه تقریباً در یک محدوده هستند، که دلیل این امر زاویه ورود تحریک 60 درجه است، از طرفی پاسخهای مدل خطی و مدل غیرخطی در درجات آزادی مختلف برهم منطبق نیست.

در شکل 14 مشاهده می شود، هنگامی که تحریک کاملاً در جهت نامتقارن سازه است، جابه جایی های u_{ss} و u_{ys} نسبت به جابه جایی u_{xs} ، مقادیر بیشتری را نشان می دهند و جابه جایی جهت متقارن سازه در مدل خطی مقدار صفر را نشان می دهد، حال آنکه در مدل غیر خطی جابه جایی جهت متقارن سازه تا لحظه 8/8 ثانیه صفر است و از آن لحظه به بعد افزایش می یابد. همچنین، مشاهده می شود پاسخهای زمانی و فرکانسی مدل خطی سازه برای در جات آزادی y و θ مقادیر بیشتری نسبت به مدل غیر خطی نشان می دهند، در حالی که پیک پاسخ مدل غیر خطی در جهت متقارن در فرکانس نظیر این جهت قابل توجه است.

شکلهای 15، 16 و 17 پاسخهای زمانی و فرکانسی سازه نوع 3 را تحت زوایای تحریک بهترتیب 0، 60 و 90 درجه برای دو مدل خطی و غیرخطی نشان میدهند.

در شکل 15 مشاهده میشود جابهجایی پیچشی و جانبی سازه در مدل خطی مقدار بیشتری را نسبت به مدل غیرخطی نشان میدهد تا در زمانهای



میدهد که مدل خطی تحریک نشده، حال آنکه در مدل غیرخطی، دیافراگم صلب طبقه جابهجایی خالص و بدون ارتعاش داشته که البته مقدار آن، با توجه به اینکه تحریک در جهت نامتقارن است، ناچیز است.

پاسخهای زمانی و فرکانسی جداساز نیز برای 3 نوع سازه، تحت زلزله کوبه تحت زوایای ورود تحریک 0، 60 و 90 بررسی شد که نتایج مشابهی را با سازه بههمراه داشت.

طبق مدل خطی، جابهجایی در امتداد متقارن، مستقل و غیرهمبسته با درجات آزادی دیگر سیستم است. از این رو، هنگامی که سازه تحت تحریک اولیه در جهت نامتقارن قرار گیرد، در جهت متقارن هیچ تحریکی به آن وارد بزرگ این مقدار در مدل غیرخطی به صفر میرسد و همچنین پیک جابهجایی پیچشی و جانبی مدل خطی در نخستین فرکانس همبسته پیچشی-جانبی (Ω=Ω)، بیشتر از مدل غیرخطی است.

در شکل 16، جابهجایی جهت متقارن سازه در مدل خطی از یک لحظه مشخص به بعد دارای مقدار بیشتری نسبت به مدل غیرخطی است. پیک پاسخهای فرکانسی در مدل خطی دارای مقدار بیشتری نسبت به مدل غیرخطی بوده و این اختلاف در جهت متقارن به حداکثر مقدار میرسد. در شکل 17، پاسخهای زمانی و فرکانسی دو مدل خطی و غیرخطی در درجات آزادی γ و θ برابر است. بررسی محتوای فرکانسی جهت متقارن نتیجه





شکل 14 پاسخ زمانی و فرکانسی سازه نوع 2 تحت زلزله کوبه تحت زاویه ورود تحریک 90 درجه نسبت به محور X

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.1.0

نمی شود. همان طور که مشاهده شد پاسخ جابه جایی مدل خطی در جهت متقارن صفر شد. اما، بر مبنای معادلات حرکت مدل غیرخطی ارائه شده در این مقاله، درجات آزادی سیستم برای سازه و جداساز نامتقارن یک طرفه، به-طور خطی و غیرخطی با یکدیگر همبستهاند. به عبارت دیگر اگرچه جهت *X* بهطور خطی با درجات آزادی جهات *Y* و θ همبسته نیست، ولی به سبب عبارت غیرخطی اینرسی در معادلات غیرخطی با آنها همبسته می شوند. بنابراین، طبق مدل غیرخطی پیشنهادی، انتظار می رود که به سبب تحریک اولیه در امتداد نامتقارن سازه، یعنی محور *Y*، پاسخ جابه جایی در جهت متقارن، یعنی محور *X*، غیر صفر باشد، همان طور که مشاهده شد پاسخ جابه جایی در مدل غیرخطی در جهت متقارن برابر صفر نشد.

همان طور که در نمودارهای پاسخ فرکانسی مشاهده شد، پیکهای پاسخ اندر کنشی سازه و جداساز بر روی فرکانس های اول جهات متقارن، نامتقارن و پیچشی بروز میکنند. همان گونه که قبلاً بیان شد، این فرکانس ها تقریباً نزدیک به فرکانس جداساز هستند و در نتیجه سازه اصلی هیچ گونه اثری در رفتار اندرکنشی سازه و جداساز نداشته و به صورت یک جسم صلب عمل میکند، از این رو، به دلیل بزرگ بودن نسبت سختی های سازه به زیرسازه، میتوان این رفتار اندرکنشی را به صورت یک سازه یک طبقه مورد تحلیل قرار داد. نتایج این تحلیل ساده شده با داده های به دست آمده در مراجع [22.2] برای سازه نامتقارن یک طبقه و نیز با نتایج تحقیق حاضر منطبق خواهد بود.

4- جمعبندي و نتيجه گيري

حرکت سازه جداسازی شده نامتقارن توسط 6 درجه آزادی توصیف شد که 3 درجه آزادی مربوط به سازه و 3 درجه آزادی دیگر مربوط به جداساز است. معادلات حرکت دو مدل خطی و غیرخطی با توجه به دستگاههای مختصات نصب شده در پایه ساختمان (دستگاه مختصات کلی)، و برکف جداساز (دستگاه مختصات محلی) برای این درجات آزادی ارائه شد. اختلاف این دو مدل، تفاوت در عبارتهای غیرخطی اینرسی آنها بود که تنها در مدل غیرخطی ظاهر شد. سپس، 3 نوع سازه خاص تعریف شد پاسخهای این 3 نوع سازه، تحت تحریکات نیروهای هارمونیک با توجه به تغییر دامنه تحریک A و فرکانس تحریک Ω ، و همچنین تحت زلزله کوبه با زوایای مختلف ورود تحریک β نسبت به محور X مورد بررسی قرار گرفتند. به بررسی پاسخهای سازه وجداساز در دو حوزه زمان و فرکانس برای دو مدل خطی و غیرخطی پرداخته و مشاهدات نتایچ برای 3 نوع سازه به موارد زیر خلاصه میشود:

- پاسخهای زمانی و فرکانسی دو مدل خطی و غیرخطی در سازه نوع 1 دقیقاً برهم منطبق است و این انطباق مستقل از اندازه دامنه و فرکانس تحریک، تحت بار هارمونیک و زوایای ورود تحریک، تحت بار هارمونیک و زلزله است.

- در پدیده اشباع، در لحظهای مشخص، انرژی جذبی توسط پاسخ یک جهت، اشباع شده و از آن لحظه به بعد مابقی انرژی تحریک جذبی، که حاوی پاسخ هارمونیک با فرکانس طبیعی بیشتر است، به درجات آزادی جهت دیگر، تحت پاسخ هارمونیک با فرکانس طبیعی کمتر، منتقل میشود. این رفتار مدل غیرخطی در سازه 2 قابل مشاهده است.

- در پدیده انتقال انرژی مشابه پدیده اشباع، انتقال انرژی از یک جهت به جهت دیگر صورت میگیرد، با این تفاوت که این انتقال از لحظات نخستین تحریک آغاز میشود و دارای یک لحظه خاص نیست. این پدیده در سازه 3 مشهود است.

- با افزایش دامنه تحریک، اختلاف پاسخهای دو مدل خطی و غیرخطی در سازههای نوع 2 و 3 چشمگیرتر بوده و در دامنههای بزرگتر، بینظمیهایی در ارتعاشات مدل غیرخطی سازه رخ میدهد که دیگر از پاسخهای هارمونیک تبعیت نمی کند.

- در سازه 2 با اعمال تحریک زلزله در جهت متقارن، هر دو مدل خطی و غیرخطی در فرکانس اول مد ارتعاشی متقارن تحریک می شود، ولی در مدل غیرخطی علاوهبر آن فرکانس مد اول جهت نامتقارن نیز تحریک شده است. با اعمال تحریک در جهت نامتقارن، هر دو مدل در فرکانس اول نامتقارن تحریک شده، ولی پیک پاسخ مدل خطی بیشتر است. همچنین، مد فرکانسی جهت متقارن نیز در مدل غیرخطی برخلاف مدل خطی، به سبب انتقال انرژی از جهت پیچشی -جانبی به جهت متقارن، تحریک شده است.

- در سازه 3 با اعمال تحریک زلزله در جهت متقارن، هر دو مدل خطی و غیرخطی در فرکانس مد اول جهت نامتقارن تحریک شده که مدل خطی دارای مقدار بیشتری است. با اعمال تحریک در جهت نامتقارن، هر دو مدل در فرکانس اول نامتقارن تحریک شده و دارای پیک پاسخهای برابر هستند و دیافراگم صلب طبقه در جهت متقارن جابهجایی خالص و بدون ارتعاش داشته است.

- دلیل اختلاف پاسخهای مدل خطی با مدل غیرخطی وجود عبارتهای غیرخطی اینرسی در معادلات حرکت مدل غیرخطی است که باعث می شود درجات آزادی جهات متقارن و نامتقارن به طور همبسته با یکدیگر عمل کنند. - به سبب بزرگ بودن سختی سازه نسبت به جداساز، می توان رفتار

اندر کنشی سازه و جداساز را به صورت یک سازه یک طبقه شامل یک جسم صلب هم وزن سازه بر روی لایه نرم زیرسازه یا همان جداساز در نظر گرفت.

بنابراین، این تحقیق، با ارائه نگرش جدید و معادلات غیرخطی حاصل شده از آن و به کمک بررسی پدیدههای غیرخطی ممکن، علاوهبر نمایش قابلیتهای دیگر رفتار اندرکنشی سازه و جداساز، بر لزوم مطالعات بیشتر بر این نوع تکنیک و روش کنترل سازهها جهت اصلاح روشهای تحلیل و طراحی متدوال و حتی تغییر ضوابط و تجویزهای آییننامههایی نظیر UBC8، تأکید دارد.

5- مراجع

- J. M. Kelly, F. Naeim, Design of seismic isolated structures: From theory to practice, *Nueva York, John Wiley & Sons*, 1999.
- [2] A. Tena-Colunga, L. Gomez-Soberon, Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure, *Engineering* structures, Vol. 24, No. 12, pp. 1587-1599, 2002.
- [3] A. Tena-Colunga, C. Zambrana-Rojas, Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system, *Engineering structures*, Vol. 28, No. 1, pp. 72-83, 2006.
- [4] A. Tena-Colunga, J. L. Escamilla-Cruz, Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures, *Engineering structures*, Vol. 29, No. 2, pp. 237-247, 2007.
- [5] J. C. De La Llera, J. L. Almazan, I. Vial, V. Ceballos, M. Garcia, Analytical and experimental response of asymmetric structures with friction and visco-elastic dampers, in *Proceeding of 13th world conference on earthquake engineering*, pp. 516-531, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.
- [6] C. E. Seguín, J. C. de la Llera, J. L. Almazán, Base–structure interaction of linearly isolated structures with lateral–torsional coupling, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 1, pp. 110-125, 2008.
- [7] C. E. Seguin, J. L. Almazán, J. C. De la Llera, Torsional balance of seismically isolated asymmetric structures, *Engineering Structures*, Vol. 46, pp. 703-717, 2013.
- [8] V. Kilar, D. Koren, Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators, *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 4, pp. 910-921, 2009.
 [9] M. Sharbatdar, S. Vaez, G. G. Amiri, H. Naderpour, Seismic response of
- [9] M. Sharbatdar, S. Vaez, G. G. Amiri, H. Naderpour, Seismic response of base-isolated structures with LRB and FPS under near fault ground motions, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 3245-3251, 2011.

- [16] G. Gorelik, A. Witt, Swing of an elastic pendulum as an example of two parametrically bound linear vibration systems, J. Tech. Phys. (USSR), Vol. 3, No. 2-3, pp. 294-307, 1933.
- [17] S. R. Hsieh, S. W. Shaw, The dynamic stability and non-linear resonance of a flexible connecting rod: single-mode model, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 170, No. 1, pp. 25-49, 1994.
- Vioration, vol. 170, vol. 1, pp. 25-49, 1994.
 [18] A. Shooshtari, D. Dastani Mobarakeh, Nonlinear free vibration of a single layered nanoplate based on the nonlocal elasticity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 223-236, 2014. (In Persian)
 [19] A. Mamandi, M. H. Kargarnovin, D. Younesian, Nonlinear dynamics of an inclined beam subjected to a moving load, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 60, No. 3, pp. 277-293, 2010.
 [20] A. K. Obpere, Dynamics of structures. The second structure is a structure of the second structure of the se
- [20] A. K. Chopra, Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [21] F. Amini, M. A. Afshar, Saturation in asymmetric structures under internal resonance, Acta mechanica, Vol. 221, No. 3-4, pp. 353-368, 2011.
- [22] M. Amin Afshar, F. Amini, Non-linear dynamics of asymmetric structures under 2: 2: 1 resonance, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 47, No. 7, pp. 823-835, 2012.

- [10] A. Nayfeh, D. Mook, Nonlinear Oscillations, New York: John Willey and Sons, 1979.
- [11] A. H. Nayfeh, D. T. Mook, L. R. Marshall, Nonlinear coupling of pitch and roll modes in ship motions, Journal of Hydronautics, Vol. 7, No. 4, pp. 145-152, 1973.
- [12] H. Hatwal, A. Mallik, A. Ghosh, Non-linear vibrations of a harmonically [12] In Tratwar, A. Wank, A. Ghosh, Nor-Inteal violations of a narmonicary excited autoparametric system, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 81, No. 2, pp. 153-164, 1982.
 [13] J. Miles, Resonantly forced motion of two quadratically coupled oscillators, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 13, No. 1, pp. 247-260,
- 1984.
- [14] W. K. Lee, H. D. Park, Chaotic dynamics of a harmonically excited springpendulum system with internal resonance, Nonlinear Dynamics, Vol. 14, No. 3, pp. 211-229, 1997.
- [15] P. Bayly, L. Virgin, An empirical study of the stability of periodic motion in the forced spring-pendulum, Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 443, No. 1918, pp. 391-408, 1993.