

## اثرات اندرکنش و حرکت گهواره‌ای به سبب تسلیم شدن کف ستون‌ها بر روی پاسخ سازه‌های فولادی

غلامرضا هوائی<sup>۱\*</sup>، احسان موبدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ

### چکیده

در روند معمول برای طراحی سازه‌ها معمولاً از تغییر مکان قائم تکیه‌گاه‌ها و اثر اندرکنش سازه و خاک صرف نظر شده و تکیه‌گاه‌ها صلب فرض می‌شوند، در حالی که حین وقوع زلزله، سازه معمولاً دچار حرکت گهواره‌ای می‌شود و فرض گیردار بودن کف ستون و عدم در نظر گرفتن اندرکنش، که از آن برای آنالیز و طراحی استفاده می‌شود، زیر سوال می‌رود. هدف این مطالعه بررسی اثر اندرکنش و ایجاد حرکت گهواره‌ای به سبب تسلیم شدن کف ستون‌ها بر روی پاسخ سازه‌های فولادی می‌باشد که در این راستا پاسخ سازه‌های سه، پنج و هفت طبقه فولادی مهاربندی شده همگرا و خمشی در دو حالت وجود و عدم حرکت گهواره‌ای تحت آنالیز دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنالیزها مویدها می‌دهند که تحلیل عملکرد سازه با لحاظ نمودن حرکت گهواره‌ای و اندرکنش منجر به کاهش پاسخ‌های سازه از جمله برش پایه، نیروی محوری، انرژی کرنشی می‌شود.

**کلمات کلیدی:** حرکت گهواره‌ای، اندرکنش، تسلیم شدن، کف ستون، آنالیز دینامیکی

## Effect of Interaction and Rocking Motion on The Earthquake Response of Buildings

Gholamreza Havaei<sup>\*1</sup>, Ehsan Mobedi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology

2- PhD Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Culture University

### Abstract

Usually structures are designed under codes based on the assumption that the soil stiffness is infinite, so the foundation rests firmly on the soil. In many cases, the overturning moment due to the lateral forces may exceed the resisting moment due to the gravity forces. Thus, this may cause a foundation uplift because in reality the soil stiffness is not infinite and the structure stands up under gravity forces. The phenomenon of foundation uplifting and its impact on the soil are known as the rocking motion. This study investigates the influence of the rocking motion and interaction by the yielding base plates on the nonlinear behavior of steel structures under dynamic

\* مؤلف مسئول: غلامرضا هوائی، havaei@aut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱/۲۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۱/۳۰

*analysis. More specifically, Three- five and seven -storied structures are designed with ordinary ductility, then the structures are analyzed in rigid and deformable base plate cases with using the ABAQUS software.*

*The results show that the rocking motion and Interaction decrease the response of buildings such as the base shear, the axial force of columns and the strain energy but also increase the natural period.*

**Keywords:** Rocking motion, Interaction, Yielding base plate, Dynamic analysis, Finite element

## ۱- مقدمه

اندرکنش خاک و سازه از مهمترین مسائلی است که در طراحی لرزه ای مطرح می باشد و در سالهای اخیر توجه خاصی به این امر شده است. در بسیاری از طراحی های معمول که بر اساس آئین نامه های موجود انجام می پذیرد فرض بر این است که پی صلب بوده و امکان جدا شدن آن از روی خاک وجود ندارد، یکی از نتایج این فرض حصول به ارزیابی دست پایی از پیوند نوسان سازه (در قیاس با پیوند واقعی آن) و در نتیجه تخمین دست بالایی از برش پایه می باشد اما این در حالی است که سختی خاک محدود بوده و امکان ایجاد حرکت گهواره ای در فونداسیون وجود دارد [۱].

هنگامی که لنگر واژگونی ناشی از نیروهای جانبی زلزله از لنگر مقاوم ناشی از بارهای ثقلی فراتر می رود موجب وقوع حرکت گهواره ای می شود و این وضعیت تا زمانی که لنگر واژگونی از بار ثقلی، کمتر شود ادامه خواهد داشت. در ابتدای امر مهندسیین برای ممانعت از وقوع چنین امری، سعی در یکپارچه نمودن فونداسیون با زمین داشتند که خود هزینه های گزافی به بار می آورد. ولی تحلیل های اخیر به خصوص بررسی های انجام شده بر روی میز لرزه (Shake table) و پاسخ غیرخطی سازه ها با فرض حرکت گهواره ای نشان داده است که نیازی به جلوگیری از این امر نیست، بلکه این پدیده خود باعث کاهش نیروهای اعمالی بر روی سازه و نیز کاهش تغییر شکل در سازه می شود. هم اکنون استفاده از ایده حرکت گهواره ای بعنوان روشی برای کاهش عملکرد غیر خطی محتمل در سازه پل ها، بعنوان یک روش بهینه مورد توجه قرار گرفته است.

با بررسی دلایل عملکرد خوب برخی سازه ها در زلزله شیلی در سال ۱۹۶۰ Housner [۲] دریافت که حرکت گهواره ای دلیل چنین عملکردی در سازه های به ظاهر ناپایدار، حین وقوع زلزله بوده است، لذا در راستای بررسی اثر حرکت گهواره ای در پاسخ سازه ها، وی اولین بررسی تحلیلی را روی پاسخ یک بلوک صلب در حالت نوسان آزاد با حرکت گهواره ای انجام داد و با انتشار مقالات وی مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفت. سپس Meek [۳] پاسخ یک سیستم انعطاف پذیر با حرکت گهواره ای و اندرکنش را به صورت تجربی بررسی نمود. Yim و Chopra [۴] روشی ساده برای محاسبه برش پایه سیستم های چند درجه آزادی با حرکت گهواره ای و لحاظ اثر اندرکنش را مبتنی بر استفاده از طیف طراحی معمول (که بر اساس جدانشدن سازه از خاک می باشد) با اصلاح پیوند نوسان و میرایی سازه برای در نظر گرفتن اثر حرکت گهواره ای ارائه نمودند. Gazetas [۵] نشان داد که با وجود اثرات کاهنده حرکت گهواره ای، در مواردی این حرکت منجر به تشدید پاسخ با نزدیک کردن پیوند نوسان سازه به پیوند غالب در محتوای فرکانسی زلزله شده و اثرات مخربی در پی داشته است. از طرفی وی به این مسئله اشاره کرد که با کنار گذاشتن فرض معمول طراحی پی مبتنی بر غیر خطی نشدن خاک میتوان از رفتار غیر خطی خاک برای کاهش بار زلزله روی سازه استفاده نمود. Azuhata [۶] به آزمایش توسط میز لرزه ای برای مقایسه پاسخ لرزه ای سیستم های سازه ای گهواره ای که صفحه زیر ستون تسلیم شونده دارند با سیستم های پای گیردار پرداخت. به علاوه وی روش ساده ای برای پیش بینی برش پایه که در آن سیستم های صفحه زیر ستون تسلیم شونده شروع به حرکت گهواره ای می کنند با استفاده از سیستم تک جرمی معادل ارائه کرد. این محقق نتیجه گرفت که سیستم های صفحه زیر ستون تسلیم شونده به طور اثر بخشی می توانند پاسخ لرزه ای سازه را کاهش دهند.

در مطالعه حاضر به بررسی اثراندرکنش و حرکت گهواره ای بر روی رفتار غیر خطی سازه های فولادی مهاربندی شده همگرا و خمشی در قاب های سه، پنج و هفت طبقه با استفاده از آنالیز دینامیکی در دو حالت کف ستون صلب و کف ستون با حرکت گهواره ای و ایجاد انعطاف پذیری و اثراندرکنش در آن پرداخته شده است.

## ۲- صحت سنجی

در این پژوهش به صحت سنجی نتایج یک مقاله در ارتباط با موضوع طرح شده پرداخته شده است و از درستی و دقت برنامه کامپیوتری مورد استفاده که نرم افزار [ABAQUS 7] می باشد، اطمینان حاصل گردیده است که در این راستا یک ساختمان فولادی سه طبقه با مقیاس  $\frac{2}{3}$  مدل واقعی که توسط [Midorikawa 6] مورد آزمایش قرار داده شده را توسط برنامه مدل سازی کرده و نتایج خروجی آن به صورت زیر می باشد:



شکل (۱) مدل فیزیکی کف ستون تسلیم شونده

جدول (۱) مقایسه مقادیر حداکثر تغییر مکان و بلندشدگی

تغییر مکان جانبی	بلندشدگی	حالت
۲۷/۴ سانتیمتر	۹/۷ سانتیمتر	میزلرزان
۳۱/۸ سانتیمتر	۱۱/۱ سانتیمتر	مدل سازی
۱۳/۸ درصد	۱۲ درصد	اخلاف

## ۳- سازه های مورد مطالعه

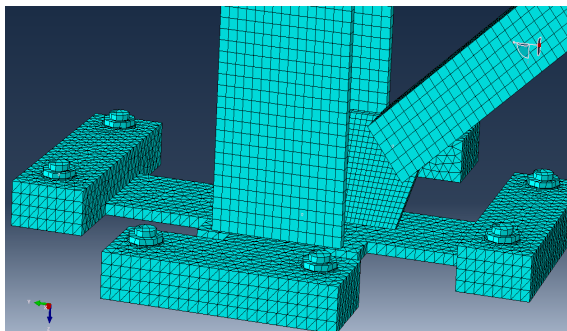
مدل های مورد مطالعه، قاب های ۳ بعدی سه، پنج و هفت طبقه ای هستند که دارای دو دهانه در جهت طولی (X) و یک دهانه در جهت عرضی (Y) می باشند که مقدار دهانه ها در جهت طولی ۴ متر و در جهت عرضی ۳ متر می باشد. ارتفاع طبقات در طبقه اول ۲/۸ متر و در دیگر طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. مقاطع مورد استفاده برای ستون ها، تیرها و بادبندها به ترتیب BOX، IPE و UNP می باشد که به عنوان نمونه برای قاب پنج طبقه فولادی همگرا داریم:

جدول (۲) مشخصات هندسی قاب پنج طبقه فولادی همگرا

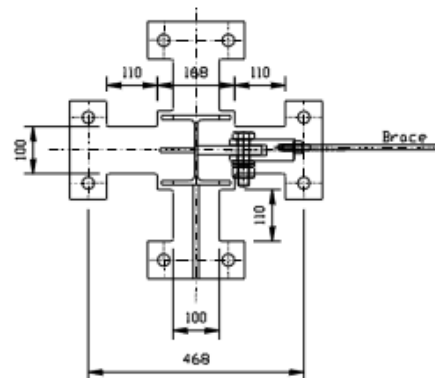
طبقه	نوع	ستون	بادبند
1	IPE 270	Box 150x15	2UNP80
2	IPE 240	Box 150x15	2UNP80
3	IPE 240	Box 150x10	2UNP80
4	IPE 240	Box 150x10	2UNP80
5	IPE 220	Box 150x10	2UNP80

در انتهای هر ستون، کف ستون هایی مطابق شکل های (۲) و (۳) قرار گرفته است که برای ایجاد حرکت گهواره ای و بلندشدگی سازه، دارای ۴ بال به ضخامت ۱۵ میلیمتر هستند که در انتهای این بال ها، ورق هایی با ضخامت ۴۰ میلیمتر قرار گرفته شده که نقش تکیه گاه را ایفاء می کند.

برای فولاد مورد استفاده در این مدل، از مدل دو خطی ایزوتروپیک<sup>۱</sup> با معیار تسلیم  $\sigma_y = 240 \frac{N}{mm^2}$  استفاده شده و فرض گردیده است که پس از رسیدن به نقطه تسلیم، منحنی تنش کرنش به صورت خطی ادامه یابد.



شکل (۳) مدل اجزاء محدود کف ستون تسلیم شونده

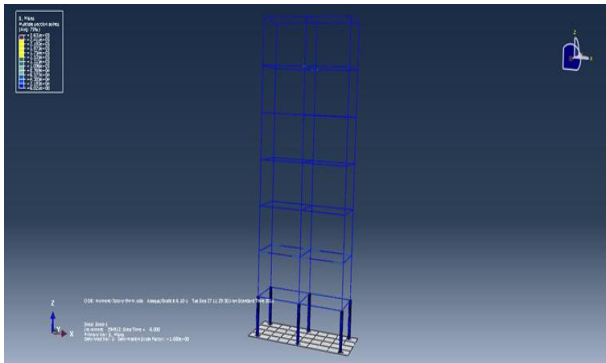


شکل (۲) مشخصات هندسی کف ستون تسلیم شونده

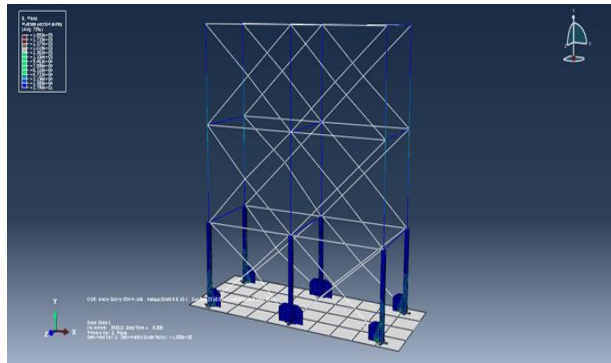
#### ۴- مدل اجزاء محدود

آنالیز اجزاء محدود قابها با استفاده از نرم افزار [ABAQUS 7] بصورت سه بعدی انجام گردید، که به عنوان نمونه در شکل های ۴ و ۵ برای قابهای فولادی ۳ و ۷ طبقه همگرا و خمشی نشان داده شده است.

در مدل سازی اجزاء سازه برای کف ستون و ستونهای طبقه اول از المان **Shell** و برای تیرها، بادبندها و ستونهای دیگر طبقات از المان **Wire** استفاده شده است. در مدل سازی کف ستون مطابق شکل (۳) فرض شده است که انتهای بال ها به صورت گیردار است چراکه این بال ها به ورق هایی با ضخامت بالا متصل می شوند که نقش تکیه گاه را دارند.



شکل (۵) قاب فولادی هفت طبقه خمشی



شکل (۴) قاب فولادی سه طبقه مهاربندی شده همگرا

برای بررسی اثر اندرکنش، دو حالت تماس مماسی و قائم در نظر گرفته شده است، به طوری که در حالت تماس قائم خصوصیات تماس سخت<sup>۱</sup> لحاظ شده، یعنی دو قطعه اجازه نفوذ در یکدیگر را ندارند و همچنین اگر نیروهایی در آنها وجود آید که موجب فاصله گرفتن آنها از هم شود، برنامه این اجازه را به آنها می‌دهد.

همچنین در حالت تماس مماسی، ضریب اصطکاک  $0/3$  در اندرکنش بین کف ستون و سطح زیرین آنها لحاظ شده است که این ضریب از آزمونهای حساسیت انجام شده بدست آمده است، چرا که کم بودن این ضریب، باعث بوجود آمدن واگرایی در پاسخ ها و یا دست یابی به جواب غلط می‌شود و از طرفی بیش از حد زیاد کردن این ضریب، باعث بیش از حد زیاد شدن زمان انجام تحلیل می‌شود. به‌توجه به رفتار غیر خطی المانهای تماسی<sup>۲</sup>، برای تحلیل مدل ساخته شده از تحلیل غیر خطی دینامیکی استفاده می‌شود.

برای بارگذاری مدل، از شتاب نگاشت El Centro NS که در قسمت صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفت، استفاده شده است [۶]. شایان ذکر است که قبل از انجام تحلیل بارگذاری تاریخچه زمانی، سازه تحت اثر بارهای ثقلی تحلیل شده است و نیروها و تغییر مکانهای ایجاد شده در سازه در اثر تحلیل با بارهای وزنی، به عنوان شرایط اولیه در شروع تحلیل تحت شتاب نگاشت، به مدل تحمیل شده است که علت آن را می‌توان برای جلوگیری از طولانی شدن بیش از حد آنالیز و نیز حصول به پاسخهای حداکثر دانست.

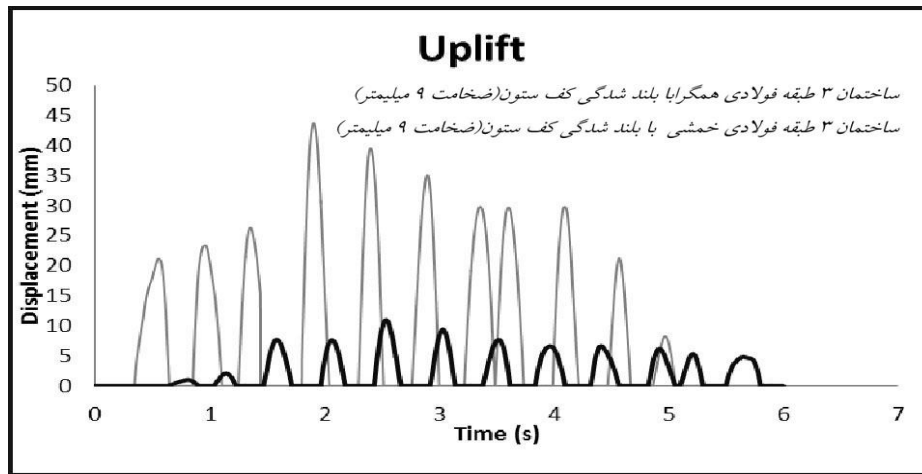
## ۵- نتایج آنالیز سازه‌های مورد مطالعه

### ۵-۱- بلندشدگی

از آنجائیکه مقادیر تغییر مکان عمودی ( $U_y$ ) در زیر کف ستون ها، می‌تواند معرف بلندشدگی در سازه باشد لذا در شکل (۶) تغییرات تاریخچه زمانی  $U_y$  در سازه‌های فولادی مهاربندی شده و خمشی سه طبقه بررسی شده است.

همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم بلندشدگی در هر دو سازه در لحظه ای به وقوع پیوسته است که شتاب وارده از طرف شتاب نگاشت El Centro NS در حدود همین لحظات، ماکزیمم مقدار خود را دارد، همچنین میزان بلند شدگی کف ستون در سیستم قاب خمشی کمتر از مقدار بلندشدگی کف ستون در سیستم دارای مهار جانبی است که این مطلب می‌تواند ناشی از افزایش سختی قاب و در نتیجه صلب تر شدن قاب مهارجانبی نسبت به قاب خمشی باشد.

1- Hard contact  
2- Contact



شکل (۶) تاریخچه زمانی تغییرات  $U_y$  در لبه راست و زیر کف ستون تسلیم شونده در سازه‌های فولادی مهاربندی شده و خمشی

همچنین شایان‌الذکر است که به علت غیر خطی لحاظ کردن مصالح در آنالیزها، سازه‌ها نرم‌تر شده و جذب انرژی آن نسبت به حالتی که رفتار مصالح در محدوده خطی باشد، کمتر شده و لذا نیروهای ایجاد شده در سازه کمتر و در نتیجه تمایل سازه برای بلند شدگی کمتر و میزان بلندشدگی کمتر خواهد بود.

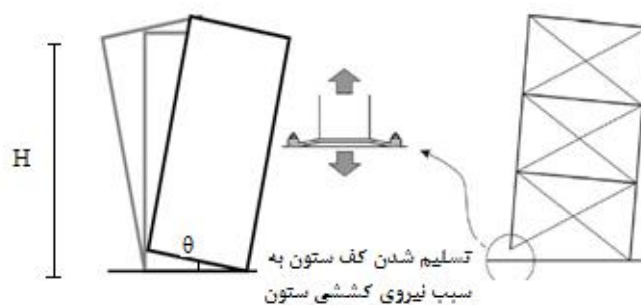
همچنین میزان بلندشدگی با افزایش تعداد طبقات مورد ارزیابی قرار گرفته است و حاکی از این است که افزایش تعداد طبقات باعث افزایش بلندشدگی می‌شود و لذا این بلندشدگی بیشتر سبب کاهش نیرو و تغییر مکان‌های خمشی می‌شود.

#### ۲-۵- تغییر مکان جانبی

در سازه‌ای که کف ستون آن دچار بلندشدگی شده است، تغییر مکان جانبی را می‌توان ناشی از دو عامل دانست:

(۱) تغییر مکان‌های خمشی ( $U_x$ )

(۲) تغییر مکان‌های جانبی ناشی از تسلیم شدن کف ستون  $H\theta$  که در شکل (۷) نشان داده شده است.

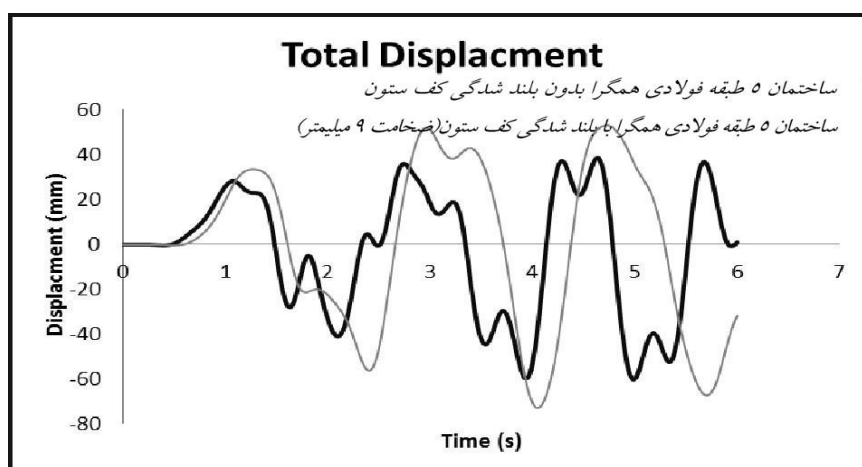


شکل (۷) تغییر مکان جانبی سازه ناشی از تسلیم شدن کف ستون

اما تغییر مکانی که اهمیت بیشتری بر روی سازه دارد، همان تغییر مکان‌های خمشی ( $U_x$ ) می‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده، حرکت گهواره‌ای به سبب بلندشدگی کف ستون سبب کاهش تغییر مکان‌های خمشی سازه شده و سبب الاستیک ماندن بیشتر اعضای سازه می‌شود، بنابراین می‌توان چنان بیان نمود که اگر تغییر مکان‌های مجموع، از مقدار مجاز آیین نامه‌ای تجاوز نکند، بلندشدگی کف ستون می‌تواند اثرات سودمندی در رابطه با تغییر مکان‌های جانبی در ساختمان داشته باشد.

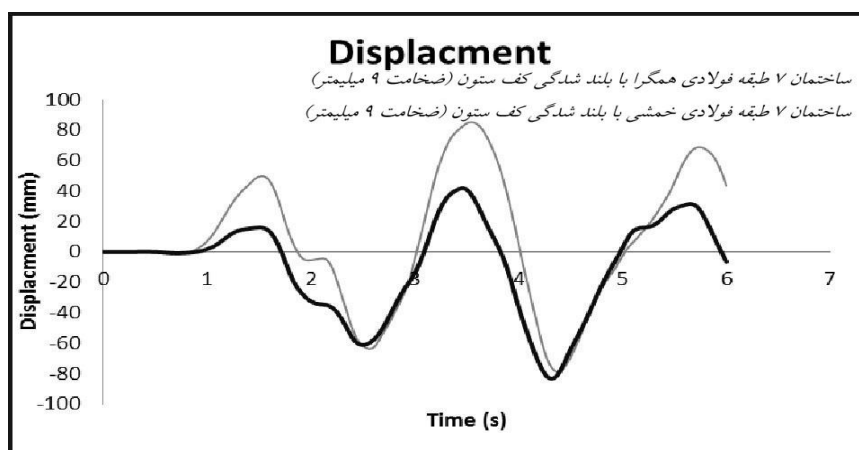
در شکل (۸)، نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان مجموع، در نقطه ای در نظر گرفته شده در بالای ساختمان مشاهده می شود. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود بین پاسخ حداکثر سازه در حالت با و بدون بلندشدگی از لحاظ زمانی اختلاف وجود دارد، و همان گونه که مشاهده می شود پاسخ های حداکثر در سازه دارای بلندشدگی، بعد از پاسخ حداکثر در سازه بدون بلندشدگی رخ می دهد. این مطلب که با تحقیقات Yim و Chopra [۴] مطابقت دارد را شاید بتوان ناشی از دیرتر رسیدن امواج زلزله به گره بالای ساختمان در سازه مجاز به بلندشدگی دانست.

همچنین از نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان واضح است که قبل از شروع بلندشدگی در یک لبه، مقادیر تغییر مکان مجموع در دو سازه تقریباً بر هم منطبق می باشند، اما پس از وقوع بلندشدگی، این نظم برقرار نبوده و در بعضی از حالت تغییر مکان سازه مجاز به بلندشدگی بیشتر از حالت گیردار شده است.



شکل (۸) مقایسه حداکثر تغییر مکان مجموع، با و بدون بلندشدگی در سازه فولادی پنج طبقه همگرا

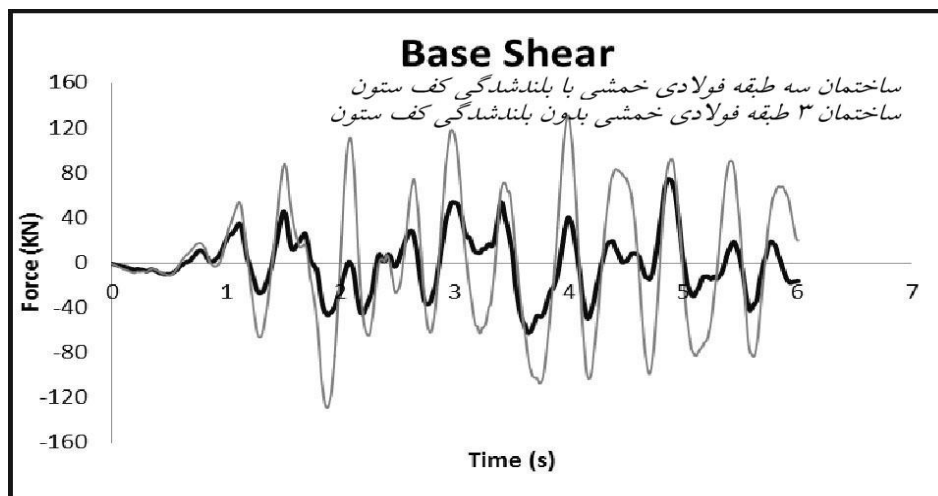
همچنین با افزایش ضخامت، مقدار برش پایه به علت کاهش بلندشدگی، کاهش می یابد. البته مقدار برش پایه در حالت کلی با افزایش ضخامت باز هم همچنان از مقدار برش پایه در حالت فیکس شده و عدم تسلیم کف ستون ها، کمتر است. در شکل (۹) مشاهده می شود که اختلاف تغییر مکان جانبی در گره بالای سازه، در سیستم های دارای مهاربند، بیشتر از سیستم قاب خمشی است. علت را می توان ناشی از صلب تر بودن سیستم دارای مهاربندی جانبی دانست که در این حالت سهم پارامتر  $H\theta$  در تغییر مکان جانبی کل در این سیستم ها بیشتر از قاب خمشی تنها است و این اختلاف در طبقات پایین تر به علت کم بودن تغییر مکان خمشی آشکارتر است



شکل (۹) مقایسه حداکثر تغییر مکان مجموع، بین دو سازه فولادی هفت طبقه خمشی و مهاربندی شده همگرا

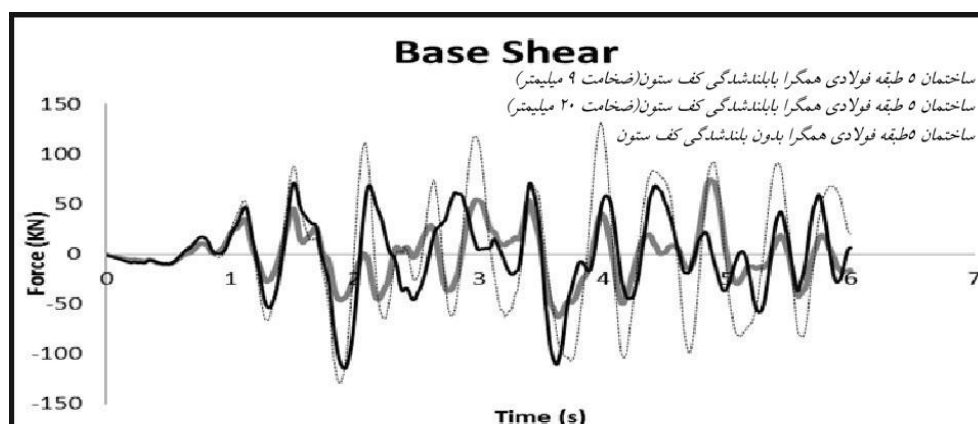
## ۳-۵- برش پایه

در سازه با کف ستون‌های مجاز به بلندشدگی سختی کل سازه در مقابله بارهای جانبی کمتر می‌شود، لذا انتظار می‌رود که حرکت گهواره‌ای، باعث کاهش مقدار برش پایه در اغلب شرایط سازه‌ای شود. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که تا قبل از آغاز بلندشدگی، یعنی در لحظات ابتدایی ارتعاش، برش پایه در هر دو حالت (بلندشدگی و عدم بلندشدگی کف ستون) یکسان است، اما با شروع بلندشدگی کف ستون، برش پایه در سازه مجاز به بلندشدگی کمتر خواهد شد. همچنین دیده می‌شود که پس از شروع بلندشدگی، شکل پاسخ برش پایه هم تفاوتی در دو سازه مذکور خواهد داشت، چراکه در تمام مدت وقوع بلندشدگی بر اثر تسلیم شدن کف ستون در یک طرف، سازه در طرف دیگر خود ارتعاش می‌کند که این امر می‌تواند باعث بروز اختلاف در شکل پاسخ برش پایه در دو سازه مذکور گردد.



شکل (۱۰) مقایسه تاریخیچه زمانی برش پایه، در سازه فولادی سه طبقه خمشی در حالت با و بدون بلندشدگی کف ستون

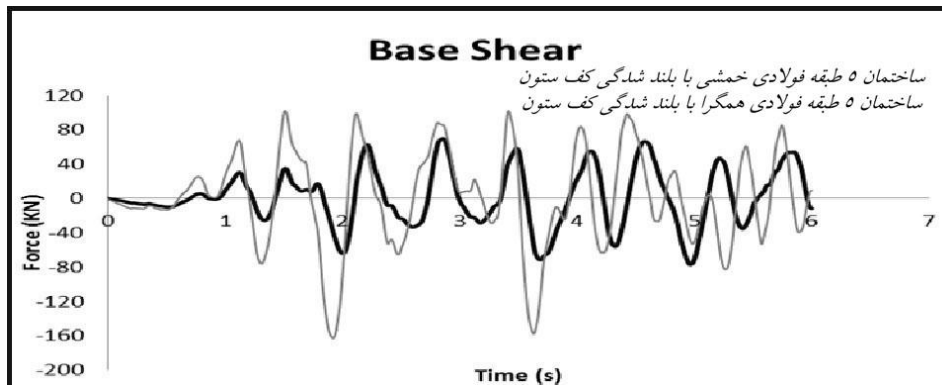
در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت در حالت تسلیم شدن کف ستون ها و ایجاد حرکت گهواره‌ای، برش پایه افزایش می‌یابد اما همچنان این مقادیر از حالت کف ستون گیردار شده کمتر است، که علت آن را می‌توان افزایش سختی کف ستون با افزایش ضخامت آن دانست که این امر سبب کاهش بلند شدگی کف ستون و کاهش استهلاك انرژی زلزله می‌شود.



شکل (۱۱) مقایسه تاریخیچه زمانی برش پایه، در سازه فولادی پنج طبقه همگرا در حالت با (افزایش ضخامت) و بدون بلندشدگی کف ستون

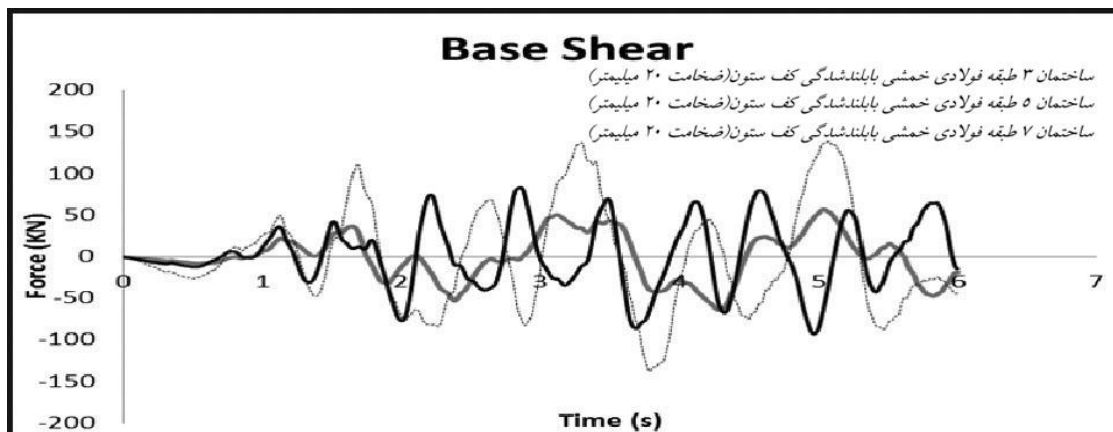


در شکل (۱۲) مشاهده می شود که مقدار برش پایه، به علت افزایش سختی، در سیستم های دارای مهاربند بیشتر از سیستم قاب خمشی تنها است. از نتایج آنالیزها مشاهده می شود که میزان اختلاف برش پایه بین دو سازه بدون و با بلندشدگی کف ستون به سبب تسلیم شدن آن، در سیستم قاب فولادی مهاربندی بیشتر از قاب خمشی تنها است که دلیل آن میزان بلند شدگی بیشتر کف ستون در سیستم دارای مهاربندی (به علت افزایش سختی قاب و در نتیجه صلب تر شدن قاب) نسبت به قاب خمشی تنها دانست.



شکل (۱۲) مقایسه تاریخیچه زمانی برش پایه، در سازه فولادی پنج طبقه همگرا و خمشی

در شکل (۱۳) مشاهده می شود که مقدار برش پایه، با افزایش تعداد طبقات و افزایش ارتفاع سازه افزایش می یابد که دلیلی بر صحت نتایج می باشد چراکه با از افزایش ارتفاع سازه، نیروی بروشی افزایش خواهد یافت.



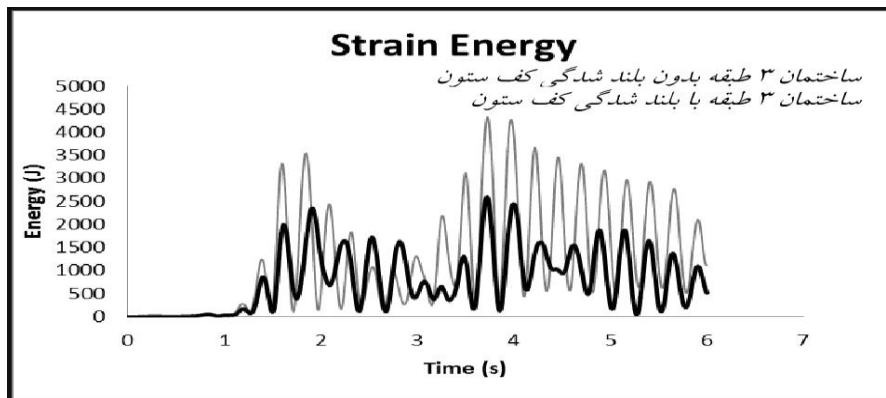
شکل (۱۳) مقایسه تاریخیچه زمانی برش پایه، در سازه فولادی خمشی با افزایش ارتفاع طبقات در حالت بلندشدگی کف ستون

## ۵-۵- انرژی کرنشی

از آنجایی که انرژی کرنشی از حاصل ضرب تنش محوری در کرنش محوری عضو بدست می آید، و با توجه به اینکه هم نیرو و هم تغییر شکل در سازه با کف ستون مجاز به بلندشدگی با توجه به نتایج بدست آمده در قس مت های قبل کمتر از سازه با کف ستون گیردار شده می باشد، لذا انتظار می رود که انرژی کرنشی اعضاء در سازه با کف ستون مجاز به بلندشدگی نیز کمتر باشد.

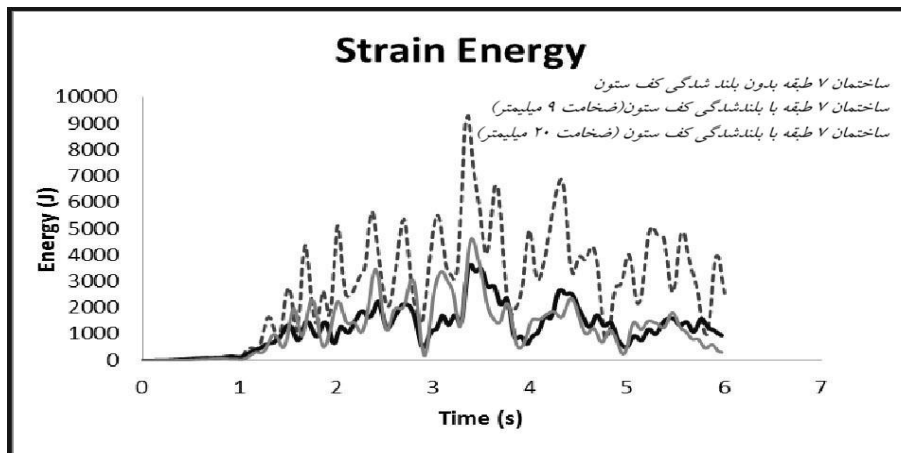
در شکل (۱۴) همچنین مشاهده می شود که بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر انرژی کرنشی در دو حالت با و بدون بلندشدگی کف ستون، مربوط به زمانی است که در آن بیشترین مقدار بلندشدگی کف ستون رخ داده است در حالتی که قبل از وقوع بلند شدگی، مقادیر انرژی کرنشی

در سازه با و بدون بلندشدگی کف ستون یکسان میباشد و همچنین کاملاً واضح است در لحظات پایانی زلزله که لنگر واژگونی وارد بر سازه لنگر مقاوم ناشی از بارهای وزنی کمتر میشود، تفاوت مقادیر انرژی کرنشی در دو سازه مذکور رو به کاهش می‌دهد. در مجموع همان گونه که انتظار می‌رفت انرژی کرنشی اعضا وقتی بلندشدگی کف ستون مجاز باشد، کمتر از مقدار مشابه در حالتی است که کف ستون مجاز به بلندشدگی نباشد.



شکل (۱۴) مقایسه تاریخچه زمانی انرژی کرنشی، در سازه سه فولادی همگرا در حالت با و بدون بلندشدگی کف ستون

همان طور که در شکل (۱۵) دیده می‌شود در سازه فولادی مهاربندی شده با وجود افزایش ضخامت (از ۹ میلیمتر به ۲۰ میلیمتر)، همچنان انرژی کرنشی از حالت گیردار کمتر است، چراکه با وجود افزایش ضخامت کف ستون، سازه اجازه بلند شدگی و ایجاد حرکت گهواره ای را دارد که این خود دلیل بر کاهش پاسخ سازه و استهلاک انرژی ورودی زلزله می‌باشد.



شکل (۱۵) مقایسه تاریخچه زمانی انرژی کرنشی، در سازه فولادی مهاربندی شده در حالت با (افزایش ضخامت) و بدون بلندشدگی کف ستون

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله اثر حرکت گهواره ای و اندرکنش به سبب تسلیم شدن کف ستون هایی با مشخصات هندسی خاص بر روی پاسخ سازه های فولادی مهاربندی شده همگرا و خمشی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱) حرکت گهواره‌ای باعث ایجاد رفتار غیر خطی در سازه می‌شود که این رفتار باعث جذب انرژی بیشتری شده و در نتیجه باعث کاهش نیروهای اعمالی بر سازه می‌شود. در مقابل، این امر باعث ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار چون نشست و دوران در سازه می‌شود.
- ۲) اختلاف شدید پاسخ سازه با و بدون فرض حرکت گهواره ای نشانگر آن است که روند فعلی طراحی سازه ها (مبتنی بر ضوابط آیین نامه‌ها) دارای حلقه مفقوده ای می‌باشد که این حلقه مفقوده کنترل سختی کف ستون و در حالت کلی خاک زیر فونداسیون در مقیاس با سختی سازه (در حالت کلی) می‌باشد که عدم وجود این کنترل منجر به آن می‌شود که در مواردی رفتار سازه با رفتار مفروض برای آن کاملاً متفاوت باشد.
- ۳) مقادیر نیرو، اعم از برش پایه، برش طبقات و نیروهای داخلی اعضاء در سازه دارای بلندشدگی در اثر تسلیم شدن کف ستون، کمتر از سازه بدون بلندشدگی و اندرکنش می‌باشد، که نتیجه کمتر شدن سختی جانبی سیستم در اثر بلندشدگی کف ستون می‌باشد.

## ۷- مراجع

- [1] FEMA440 "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures" Prepared by: applied Technology Council (ATC-55 Project). Prepared for: Federal Emergency.
- [2] Housner, G.W., 1963, The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquake, Bull. Seismol.Soc. Am., 53(2), 403-417.
- [3] Meek, J.W., "Effects of Foundation Tipping On Dynamic Response." Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. 7, PP. 1297-1311, July.
- [4] Chopra, A.K., Yim, A.M., Simplified Earthquake Analysis of Multistory Building as with Foundation Uplift Journal of Structural Engineering. ASCE. 111(12), 2708-2731, 1985.
- [5] azetas, G., "Seismic Design of Foundation and Soil - Structure Interaction "First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
- [6] Azuhata, T., Midorikawa, M., Ishihara, T., Wada, A., "Shaking Table Tests on Seismic Response Reduction Effects on Rocking Building Structural Systems" 12 WCEE, 2000.
- [7] ABAQUS, "ABAQUS Analysis User's Manual", Version 6.10, (2010)