

## بررسی اثر حرکت دورانی پی ناشی از زلزله بر روی سازه‌های بلند نامنظم در ارتفاع

خسرو برگی

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

اسدا... نورزاد

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

قاسم طرزی

کارشناس ارشد سازه دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت، ۷۶/۲/۳ تاریخ تصویب ۷۷/۶/۲۸)

### چکیده

در این مقاله با توجه به اثرات سازه در ایجاد تغییر در حرکت آزاد ناشی از زلزله در محل سازه به تعیین حرکت شش مؤلفه‌ای از حرکت سه مؤلفه‌ای زلزله در اثر تفرق امواج پرداخته شده و با توجه به حرکت پیچشی (چرخشی حول محور قائم)، مؤلفه دورانی حول محور افقی<sup>(۱)</sup> و بررسی اثر آن بر سازه‌های بلند نامنظم در ارتفاع (نامنظمی از نظر هندسی، جرم و سختی) مورد تاکید می‌باشد. براساس نتایج حاصل، تأثیر حرکت پی در سازه‌های نامنظم نسبت به سازه‌های منظم افزایش یافته و این تأثیر در مورد نیروی محوری بادبندها و لنگر انتهایی ستونها قابل ملاحظه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: حرکت دورانی پی، زلزله، سازه بلند، نامنظمی در ارتفاع

### مقدمه

مؤلفه‌ای (سه مؤلفه انتقالی و سه مؤلفه دورانی) تعیین نمود.

#### تعیین مؤلفه‌های دورانی حرکت پی

در حال حاضر وسایل استاندارد اندازه‌گیری حرکات شدید زمین تنها قادر به ثبت شتابهای انتقالی حرکات زمین می‌باشند و معمولاً در تحلیل دینامیکی سازه‌ها تحت اثر زلزله، اثر مؤلفه‌های دورانی با فرض کوچک بودن در نظر گرفته نمی‌شود. این سه مؤلفه انتقالی در یک دستگاه ترکیبی از انواع امواج زلزله یعنی امواج طولی، امواج برشی، امواج سطحی و مؤلفه‌های منعکس و منکسر آنها می‌باشد. امواج طولی غیر دورانی بوده ولی امواج دیگر می‌توانند باعث اثرات دورانی گردند. اثرات دورانی بستگی به جهت انتشار هم دارد مثلاً اگر یک موج برشی به

با روش‌های معمول تحلیل دینامیکی سازه‌ها تحت اثر زلزله، عکس‌العمل سازه را می‌توان تنها برای شتابهای انتقالی غیر همبسته زلزله که در امتداد محورهای مختصات سازه اعمال می‌گردند، بدست آورد. زمین در حرکت آزاد خود دارای سه مؤلفه تغییر مکانی می‌باشد ولی بعلت حضور ساختمان و وجود پی‌های نسبتاً صلب، حرکت زمین در محل سازه و اطراف آن تغییر نموده و سازه به علت ایجاد مانع در مسیر حرکت امواج، موجب تفرق امواج می‌گردد. از طرف دیگر پس از برخورد امواج، سازه به صورت یک منبع ارتعاشی عمل نموده و امواج پراکنده<sup>(۲)</sup> در محیط منتشر می‌نماید، لذا جهت تعیین واکنش سازه در مقابل زلزله نمی‌توان حرکت زمین به صورت آزاد را بر پایه آن اعمال نمود، بلکه باید مجموع حرکت آزاد و حرکت امواج پراکنده را بر پایه سازه اعمال کرد؛ یعنی باید واکنش سازه را در مقابل زلزله شش

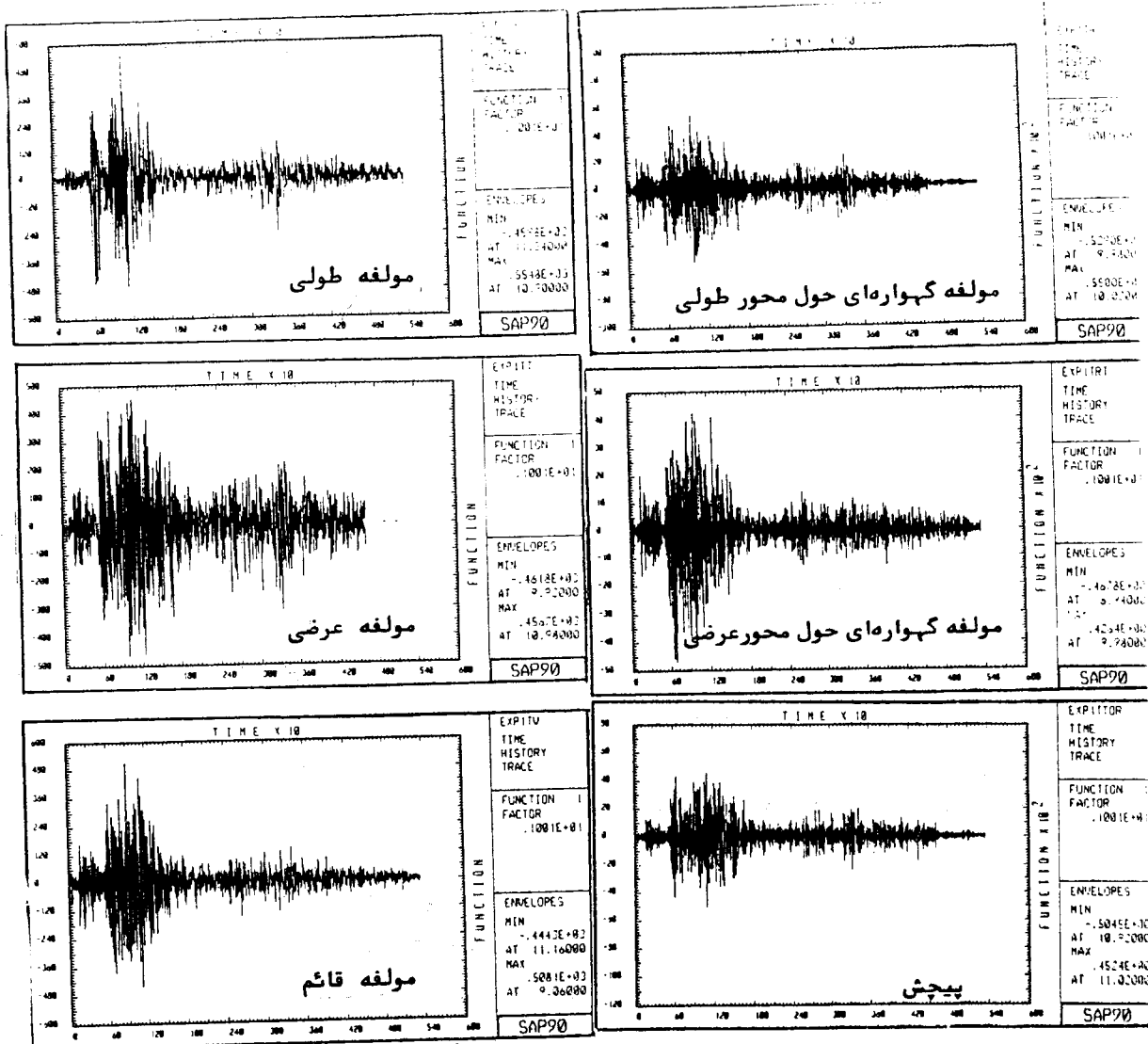
که در آن  $k, j, i$  محورها را مشخص کرده و  $\Psi_k(t)$  دوران حول محور  $K$  می باشد که به صورت مشتقات تغییر مکانهای  $x'_i$  و  $x'_j$  بیان گردیده است.

در این پژوهش [۱]، با تهیه تاریخچه زمانی شتابهای انتقالی مربوط به دو ایستگاه در زلزله های طیس و منجیل و با استفاده از روشهایی که صحت آن مورد تأیید قرار گرفته است [۲، ۴، ۵]، شتابنگاشت‌های مربوط به مؤلفه های انتقالی و دورانی بدست آمده و ارائه می گردد. در شکل‌های ۱ و ۲ این شتابنگاشت‌ها به ترتیب شش مؤلفه شتاب پی در زلزله طیس (شهریور ۱۳۵۷) مربوط به ایستگاه دیهوک و شش مؤلفه شتاب پی در زلزله منجیل (خرداد ۱۳۶۹) مربوط به ایستگاه آب بر می باشد [۱].

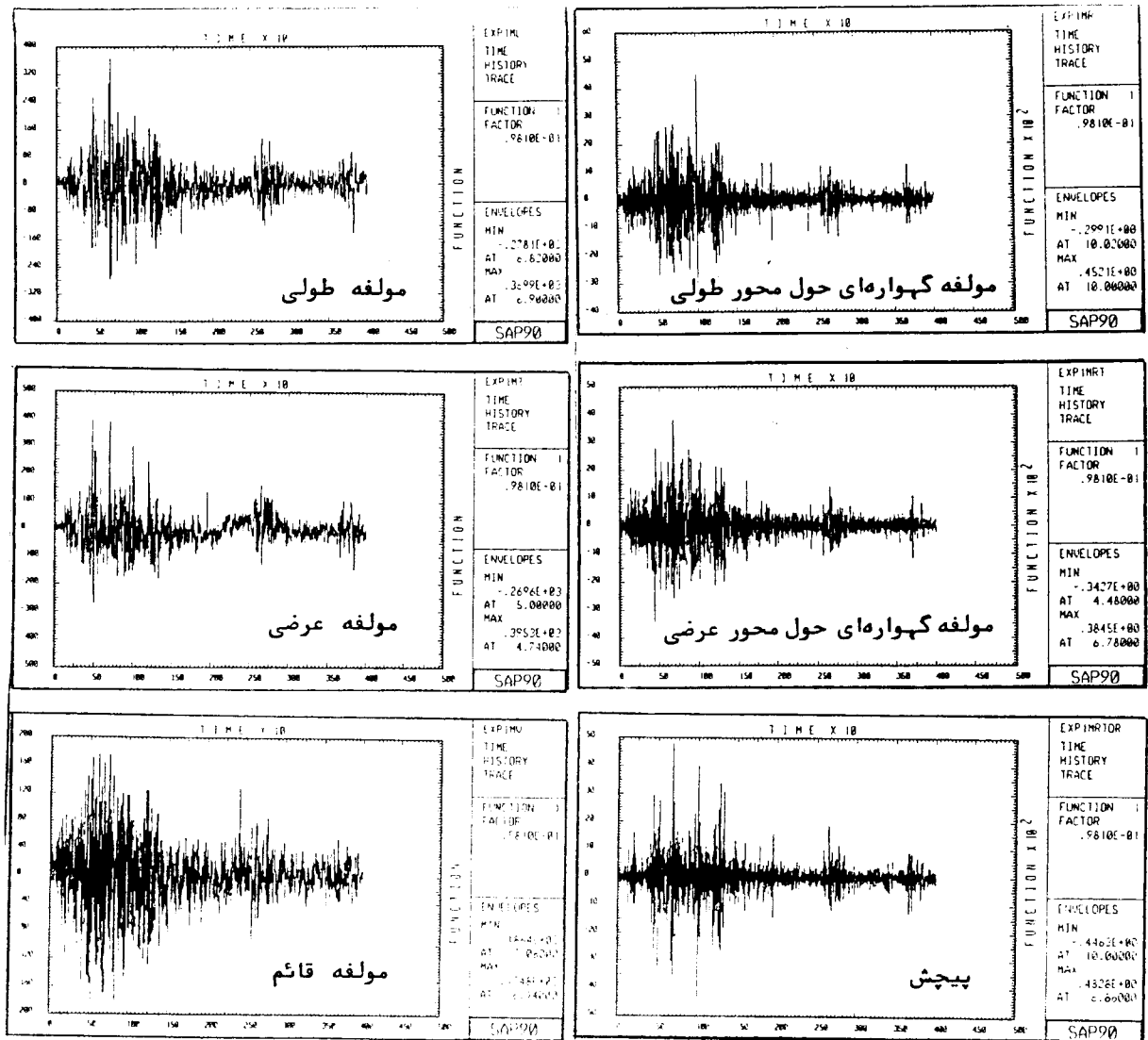
طور قائم انتشار یابد، حول محور قائم دورانی ایجاد نکرده ولی حول یک محور افقی دوران ایجاد خواهد نمود.

اثر مؤلفه های دورانی حرکت زمین در عکس العمل سازه تحت اثر زلزله توسط محققان مختلفی در مهندسی زلزله بررسی شده است. نیومارک اولین محقق است که اثر مؤلفه های دورانی زلزله را در تحقیقات خود در نظر گرفته است. وی برای بیان روابط بین مقادیر لحظه ای مؤلفه های دورانی با مؤلفه های انتقالی از روابط اصلی مکانیک محیطهای پیوسته برای دوران  $\Psi$  حول یک محور قائم به صورت زیر استفاده نمود:

$$\Psi_k(t) = (\partial x'_j / \partial x'_i - \partial x'_i / \partial x'_j) / 2 \quad (1)$$



شکل ۱: شتاب نگاشت شش مؤلفه ای زلزله طیس ایستگاه دیهوک ۱۳۵۷.



شکل ۲: شتاب نگاشت شش مولفه‌ای زلزله منجیل ایستگاه آب بر ۱۳۶۹.

### معادله حرکت سازه تحت حرکت انتقالی [۳]

$$\{V^l(t)\} = \{V(t)\} + \{V_g(t)\} \quad (۳)$$

البته کلیه عناصر بردار  $\{V_g(t)\}$  با توجه به اینکه مربوط به تغییر مکان مطلق زمین هستند، ثابت و همه باهم برابر  $V_g(t)$  می باشند. بنابراین می توان آنرا به صورت زیر نوشت:

$$\{V_g(t)\} = V_g(t) \{I\} \quad (۴)$$

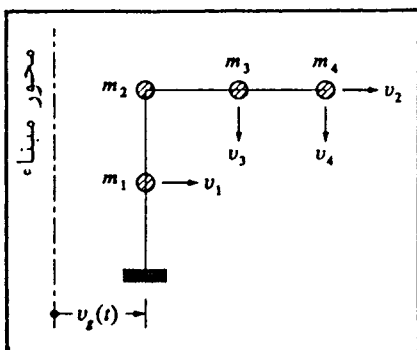
$\{I\}$  بردار واحد است که تمام عناصر آن برابر واحد می باشد.

با توجه به رابطه اخیر، معادله (۲) به صورت زیر نوشته می شود:

هرگاه سازه چند درجه آزادی مطابق شکل (۳) تحت حرکت انتقالی ناشی از زلزله قرار گیرد و تکیه گاه آن با شتاب  $\ddot{V}_g(t)$  حرکت کند، معادله حرکت آن به صورت زیر نوشته می شود:

$$[m] \{\ddot{V}^l(t)\} + [C] \{\dot{V}(t)\} + [K] \{V(t)\} = \{0\} \quad (۲)$$

اگر  $\{V^l(t)\}$  تغییر مکان کل سازه،  $\{V(t)\}$  تغییر مکان نسبی و  $\{V_g(t)\}$  تغییر مکان مطلق زمین در لحظات مختلف باشد، می توان رابطه زیر را بین آنها نوشت:



شکل ۴: سیستم چند درجه آزادی در حالت کلی تحت حرکت انتقالی صلب پی.

از مقایسه روابط (۹) و (۳) می توان دریافت که برای سازه شکل (۳) بردار  $r$  یک بردار واحد می باشد، ولی برای سازه شکل (۴) بردار  $r$  به صورت زیر می باشد:

$$\{r\}^T = \{1 \quad 1 \quad 0 \quad 0\} \quad (10)$$

تنها تأثیر بردار ضریب تأثیر  $\{r\}$  در معادله (۵)، در نیروی دینامیکی مؤثر بر سازه است که در این حالت  $P_{eff}(t)$  از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_{eff}(t) = -[m] \{r\} \ddot{V}_g(t) \quad (11)$$

معادله حرکت سازه تحت حرکت دورانی پی [۳]

مطابق شکل (۵) اگر سازه چند درجه آزادی تحت یک حرکت دورانی واحد در تکیه گاه قرار گیرد، تغییر مکان کل بر حسب تغییر مکان نسبی و تغییر مکان شبه استاتیک که از چرخش استاتیکی تکیه گاه نتیجه می شود، به صورت زیر بیان می شود:

$$\{V^I(t)\} = \{V(t)\} + \{r\} \theta_g(t) \quad (12)$$

که در آن  $\theta_g$  دوران تکیه گاه و  $\{r\}$  یک بردار شامل تغییر مکانهایی است که در نتیجه یک دوران صلب واحد در تکیه گاه بدست می آیند.

$$[m] \{\ddot{V}(t)\} + [C] \{\dot{V}(t)\} + [K] \{V(t)\} = \{P_{eff}(t)\} \quad (5)$$

که در آن:

$$\{P_{eff}\} = -[m] \{I\} \ddot{V}_g(t) \quad (6)$$

ملاحظه می شود که سازه چند درجه آزادی شکل (۳) دارای یک محور قائم بوده و در معرض یک تحریک انتقالی قرار گرفته و بدین ترتیب رابطه بین تغییر مکان کل و تغییر مکان نسبی به فرم ساده رابطه (۳) می باشد. در حالت کلی بعضی تغییر مکانهای نسبی در جهت حرکت زمین نیستند (مانند شکل ۴) و در این صورت تغییر مکان کل به صورت مجموع تغییر مکان نسبی و تغییر مکان شبه استاتیک  $V^s$  که از تغییر مکان استاتیکی تکیه گاه (پی) نتیجه می شود، نوشته می شود:

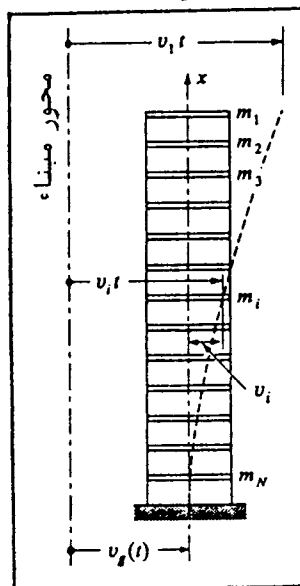
$$\{V^I(t)\} = \{V(t)\} + \{V^s(t)\} \quad (7)$$

تغییر مکان شبه استاتیک  $V^s$  را می توان برحسب یک بردار ضریب تأثیر  $r$  که از یک حرکت صلب واحد در تکیه گاه نتیجه می شود، به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\{V^s\} = \{r\} V_g \quad (8)$$

و در نتیجه:

$$\{V^I(t)\} = \{V(t)\} + \{r\} V_g(t) \quad (9)$$



شکل ۳: سیستم چند درجه آزادی تحت حرکت انتقالی صلب پی.

در این حالت فرض بر این بود که جرمها اینرسی دورانی ندارند؛ ولی اگر مطابق شکل (۶) علاوه بر اینرسی های انتقالی  $m_1$  و  $m_2$ ، اینرسی های دورانی  $J_1$  و  $J_2$  موجود باشد، باید درجات آزادی چرخشی ( $V_3$  و  $V_4$ ) در بردار ضرایب تأثیر در نظر گرفته شود و بدین ترتیب این بردار در نتیجه یک دوران صلب واحد در تکیه گاه از رابطه زیر بدست می آید:

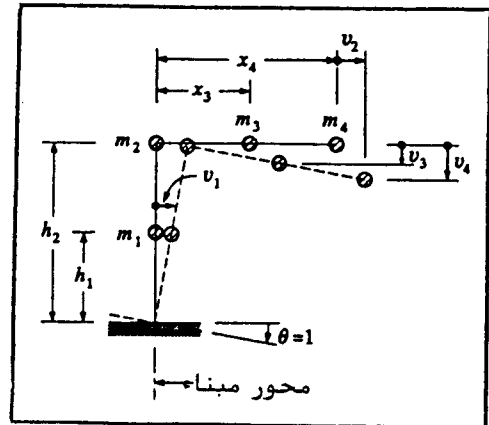
$$\{r\}^T = \{h_1 \quad h_2 \quad 1 \quad 1\} \quad (15)$$

### آنالیز دینامیکی سازه ها تحت حرکت دورانی [۱]

از آنجایی که برنامه کامپیوتری مورد استفاده تنها قادر به آنالیز دینامیکی (تاریخچه زمانی) سازه ها تحت حرکت انتقالی پی (مؤلفه های  $T, L$  و  $V$ ) بوده، جهت آنالیز تحت حرکت دورانی پی با استفاده از این برنامه، سازه به گونه ای مدل می شود که تحت این حرکت آنالیز گردد. این مدل به شرح زیر است:

در انتهای هر یک از ستونهای سازه مورد نظر یک المان صلب (گشتاور اینرسی بینهایت) کوتاه اضافه می گردد. گره های انتهایی ستونها در جهت افقی بسته شده ولی در جهت قائم اجازه حرکت دارند و گره های انتهایی المانهای صلب به تکیه گاههای غلطکی متصل می گردند. با این روش می توان حرکت دورانی (چرخش حول محور عمود بر صفحه قاب) را با تقسیم بر طول این المان صلب به یک حرکت انتقالی تبدیل کرد. با تغییر طول این المان صلب و یا افزودن جرمهای متمرکز در نقاط انتهایی آنها و یا افزودن فنر پیچشی در تکیه گاههای غلطکی می توان مقدار چرخش در تکیه گاهها را تغییر داد و با این روال می توان چرخش در تکیه گاهها را به گونه ای تنظیم کرد که مشابه شتابنگاشت حرکت دورانی پی باشد.

جهت بررسی اثر حرکت دورانی روی سازه های بلند ابتدا یک قاب دوبعدی متقارن و منظم در ارتفاع که از یک سازه متقارن منظم در پلان انتخاب شده، به عنوان الگو در نظر گرفته شده است. به تدریج از نظر هندسی، جرم و سختی در ارتفاع نامنظم گردیده و این قابها هم تحت حرکت انتقالی پی و هم تحت حرکت دورانی پی با استفاده



شکل ۵: سیستم چند درجه آزادی تحت حرکت دورانی پی.

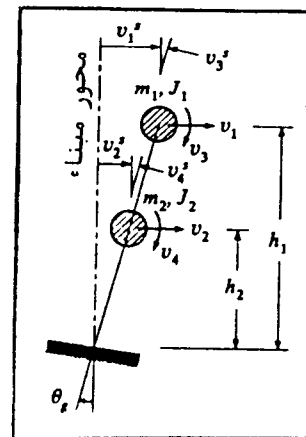
معادله حاکم بر این سازه به صورت زیر می باشد:

$$[m]\{\ddot{V}(t)\} + [C]\{\dot{V}(t)\} + [K]\{V(t)\} = -[m]\{r\}\ddot{\theta}_g(t) \quad (13)$$

که بردار ضریب تأثیر  $\{r\}$  در نتیجه یک دوران صلب واحد در تکیه گاه از رابطه زیر بدست می آید:

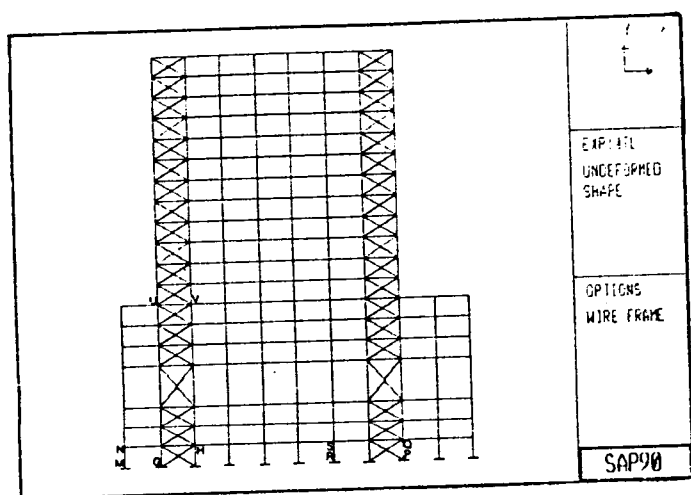
$$\{r\}^T = \{h_1 \quad h_2 \quad x_3 \quad x_4\} \quad (14)$$

بدین ترتیب پاسخ سازه در نتیجه حرکت دورانی  $\ddot{\theta}_g(t)$  دقیقاً مشابه حرکت انتقالی پی بدست می آید.

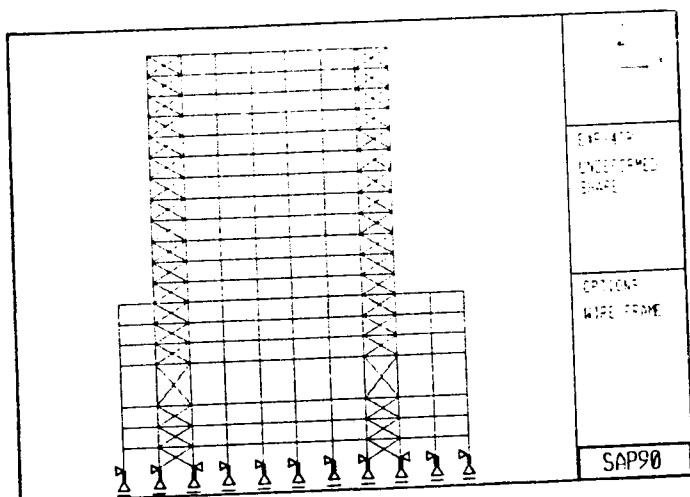


شکل ۶: برج با جرمهای دارای اینرسی دورانی تحت حرکت دورانی پی.

که تأثیر حرکت دورانی پی در نیروهای داخلی سازه‌های بلند نامنظم در ارتفاع به مراتب بیش از تأثیر آن در سازه‌های منظم است، بدین معنی که بی نظمی در ارتفاع شامل وجود طبقات نرم یا ضعیف، تغییرات شدید جرم و سختی در ارتفاع و وجود ناپیوستگی‌های بزرگ در اعضای مقاوم سازه در ارتفاع باعث افزایش تأثیر این حرکت (حرکت دورانی) می‌گردد.



شکل ۷: مدل قاب نمونه برای بررسی حرکت انتقالی.



شکل ۸: مدل قاب نمونه برای بررسی حرکت دورانی.

در سازه‌های منظم در ارتفاع، عمده تأثیر حرکت دورانی در نیروهای محوری تیرها و بادبندها می‌باشد که نسبت نیروها در این حرکت به نیروها در حرکت انتقالی پی برای تیرها و بادبندها به ترتیب حدود ۴۰٪ و ۲۰٪ می‌باشد و این تأثیر با افزایش ارتفاع و همچنین افزایش

از روش ارائه شده آنالیز می‌گردد. با مقایسه نیروهای داخلی اعضاء در این دو حرکت، اثر حرکت دورانی ارزیابی شده است. لازم به تذکر است که معیارهای نامنظمی در ارتفاع از نظر هندسی، جرم و سختی در آیین نامه‌های مختلف نظیر آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، UBC 88، Eurocode 8 و NEHRP 85 ذکر شده است. شایان توجه است که مدل‌های متعددی جهت بررسی متغیرهای مختلف در نظر گرفته شده که در این مقاله به دلیل محدودیت حجم آن به عنوان نمونه یک قاب دوبعدی که هم از نظر هندسی و هم از نظر سختی در ارتفاع نامنظم می‌باشد ارائه می‌گردد. این سازه تحت حرکت انتقالی و حرکت دورانی پی مربوط به ایستگاه دیهوک در زلزله طیس آنالیز شده و تاریخچه زمانی لنگر انتهای ستون PQ در این دو حالت ارائه گردیده و مقایسه می‌شود. البته مدل فوق و سایر مدل‌ها تحت اثر زلزله منجیل نیز تحلیل شده‌اند که در اینجا تنها به نتایج زلزله طیس اشاره می‌شود ولی در نتیجه گیری کلی نتایج زلزله منجیل نیز ملحوظ می‌باشد.

در شکل ۷ مدل قاب مورد نظر جهت حرکت انتقالی و در شکل ۸ جهت حرکت دورانی ارائه شده (جزئیات مدل‌ها در مرجع (۱) و بعنوان نمونه تاریخچه زمانی لنگر انتهای ستون PQ در این دو حالت حرکت جهت مقایسه در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. شایان ذکر است جهت نتیجه گیری کلی، تحلیل‌های متعددی بر روی سازه‌های منظم و نامنظم انجام شده که به دلیل محدودیت حجم مقاله از ارائه جزئیات مراتب خودداری شده است (جزئیات بیشتر در مرجع (۱)). در تحلیل‌های مورد اشاره نیروهای محوری اعضای افقی (تیرها) و اعضای مایل (بادبندها) و همینطور لنگر انتهای ستونها در انواع سازه‌های با ارتفاع و طول دهانه مختلف مدنظر بوده است.

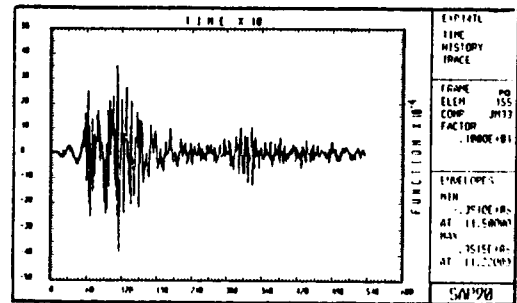
### نتیجه گیری

با آنالیز قابهای متعدد منظم و نامنظم در ارتفاع تحت حرکت دورانی پی و مقایسه تنشها و نیروهای داخلی اعضاء با حالت حرکت انتقالی پی [۱] که در اینجا برای نمونه فقط به یک حالت آنها اشاره رفت، می‌توان دریافت

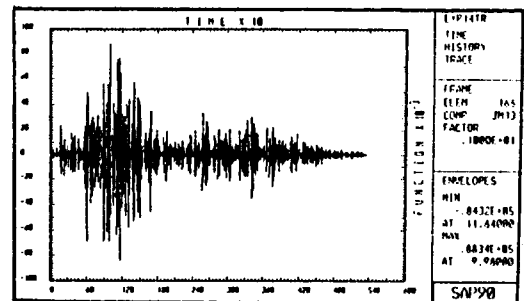
می باشند، تاثیر حرکت دورانی بیشتر است. این تاثیر در مورد لنگرهای انتهایی ستونها حدود ۵۰٪، در نیروی محوری بادبندها حدود ۳۰٪ و در مورد نیروی محوری و لنگرهای انتهایی تیرها به ترتیب حدود ۴۰٪ و ۱۵٪ می باشد. با افزایش نامنظمی و غیرمقارن شدن سازه ها، همچنین با افزایش ارتفاع و طول دهانه ها (حجم تر شدن سازه ها) تاثیر این حرکت افزایش می یابد. در این حالت چنانچه سازه نرم تر شود، تاثیر این حرکت در لنگرهای انتهایی ستونها بیشتر می شود.

در مورد سازه هایی که هم از نظر هندسی و هم از نظر سختی در ارتفاع نامنظم باشند، تاثیر حرکت دورانی نسبت به سازه هایی که تنها از نظر هندسی نامنظم هستند، افزایش می یابد. این افزایش در مورد لنگرهای انتهایی ستونها چشمگیر است و از ۵۰٪ به حدود ۸۰٪ می رسد. همچنین در مورد سازه هایی که هم از نظر هندسی و هم از نظر جرم در ارتفاع نامنظم باشند، تاثیر این حرکت نسبت به سازه های نامنظم هندسی بیشتر است (تاثیر این حرکت در مورد لنگرهای انتهایی ستونها از حدود ۵۰٪ به حدود ۶۵٪ و در مورد نیروی محوری بادبندها، از ۳۵٪ به ۴۰٪ می رسد).

در انتها توصیه می شود که جهت تحلیل دینامیکی سازه های بلند نامنظم در ارتفاع، با توجه به میزان اهمیت سازه با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، زلزله سه مؤلفه ای مورد نظر به زلزله شش مؤلفه ای تبدیل شده و سپس سازه را با روش ارائه شده تحت حرکت دورانی و در صورت لزوم تحت حرکت پیچشی نیز تحلیل کرد تا نتایجی نزدیک به واقعیت بدست آید.



شکل ۹: تاریخچه زمانی لنگر انتهایی ستون PQ از قاب نمونه در حرکت انتقالی.



شکل ۱۰: تاریخچه زمانی لنگر انتهایی ستون PQ از قاب نمونه در حرکت دورانی.

طول دهانه ها (حجم تر شدن سازه) افزایش می یابد و روی لنگرهای انتهایی ستونها نیز تاثیر می گذارد (حدود ۴۰٪). در سازه هایی که از نظر هندسی در ارتفاع نامنظم

## مراجع

- ۱ - برگی، خ. و طرزی، ق. "تعیین مولفه های دورانی حرکت پی از مولفه های انتقال حرکت زمین و بررسی اثر حرکت گهواره ای پی روی سازه های بلند نامنظم در ارتفاع." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، پاییز (۱۳۷۵).
- 2 - Li, B., Al-Bermani, F. G. A. and Kitiporncha, S. (1993). "Maximum Response of Asymmetric Structures Subject to a Multicomponent Earthquake". *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 22, 1047-1066
- 3 - Clough, R. W., and Penzien, J. (1993). "Dynamics of Structures". McGraw-Hill, Inc, Second Edition.

- 4 - Castellani, A., and Boffi, G. (1986). "Rotational Components of the Surface Ground Motion during an Earthquake". *Earthquake Eng. and soil Dynamics*, 14, 751-767.
- 5 - Singh, M. P., and Ashtiany, M. G. (1986). "Structural Response for Six Correlated Earthquake Components". *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 14, 103-119.

واژه نامه

مولفه دورانی حول محور افقی

امواج پراکنده

1 - Rocking

2 - Scattered Waves