

## رفتار غیر خطی قابهای با سیستم مهاربند زانویی تحت تأثیر زلزله

فرهاد دانشجو\* و جلیل عسگری\*\*

گروه سازه، بخش عمران، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۸۱/۳/۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۳/۲۶)

چکیده - سیستم جدید قاب با مهاربند زانویی (KBF) شامل قاب با مهار قتری است که یک یا هر دو انتهای عضو قتری به عضو زانویی متصل می‌شود. سختی از طریق عضو قتری و شکل پذیری از طریق تسلیم خمشی عضو زانویی تأمین می‌شود. در این مقاله، اثر پارامترهای هندسی و مشخصات اعضا بر سختی جانبی ارتجاعی قابهای KBF بررسی شده و برای اولین بار، محدوده مناسب برای پارامترهای هندسی که در تأمین سختی لازم سیستم موثرند تعیین شده است. سپس رفتار لرزه‌ای یک نوع از قابهای با مهاربند جدید زانویی (TKBF) و نقش پارامترهای موثر بر رفتار دینامیکی غیر خطی آن تحت تأثیر زلزله‌های ناغان و السنترو بررسی و ارزیابی شده و با رفتار لرزه‌ای سیستمهای هم محور CBF و برون محور EBF مشابه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که قابهای TKBF از لحاظ کنترل تغییر مکان غیر خطی جانبی و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و نوع مکانیزم و تغییر مکان قائم تیرهای کف، رفتار لرزه‌ای مناسبتری دارند و بنابراین سختی و شکل پذیری مناسبتری را به صورت توأم تأمین می‌کنند.

واژگان کلیدی: پاسخ غیر خطی، مهاربند زانویی، زلزله،

## Nonlinear Analysis of Knee-braced Frames under Earthquake Loadings

F. Daneshjoo and J. R. Asgari

Civil Engineering Department, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

**Abstract:** The new knee-braced frames (KBF) consist of a moment resisting frame and diagonal braces connected to short knee elements. The lateral stiffness is provided by the frame and braces while flexural yielding of the knee elements provides the ductility. In this paper, the effects of geometric parameters on lateral elastic stiffness of KBF frames are studied and the suitable limits for these parameters are determined for the first time. Then, nonlinear dynamic seismic behavior of one kind of KBF frames (TKBF) and the effects of important parameters under Naghan and Elcentro earthquakes are studied and evaluated. The seismic behavior of TKBF frames are compared with CBF and EBF frames. The results prove that suitably designed TKBF frames show better seismic behavior according to lateral nonlinear displacement, plastic hinge propagation, collapse mechanism, and vertical displacements of slabs, and, therefore, provide better stiffness and ductility requirements.

**Keywords:** Nonlinear response, Knee-braced frame, Earthquake

\*\* - کارشناس ارشد

\* - دانشیار

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| CBF قاب خمشی با یک مهار بند هم محور | KBF قاب با مهار بند زانویی                             |
| EBF قاب خمشی با مهار بند برون محور  | TKBF قاب خمشی با یک مهار بند متصل به یک زانویی در بالا |

۱- مقدمه

سختی و شکل پذیری دو موضوع اساسی در طراحی ساختمانها در برابر زلزله‌اند. ایجاد سختی و مقاومت به منظور کنترل تغییر مکان جانبی و ایجاد شکل پذیری برای افزایش قابلیت جذب انرژی و تحمل تغییر شکل‌های خمیری اهمیت دارند. در طراحی ساختمانهای فولادی مقاوم در برابر زلزله، استفاده از سیستمهای قابهای مقاوم خمشی MRF، قابهای با مهار بند هم محور CBF، و قابهای با مهار بند برون محور EBF رایج است.

قابهای مقاوم خمشی MRF شامل ستونها و تیرهایی است که توسط اتصالات خمشی به یکدیگر متصل شده‌اند. سختی جانبی این قابها به سختی خمشی ستونها، تیرها و اتصالات در صفحه خمش بستگی دارد. در طراحی این قابها فلسفه تیر ضعیف و ستون قوی حاکم است این امر ایجاد می‌کند که تیرها زودتر از ستونها تسلیم شوند و با شکل پذیری مناسب خود انرژی زلزله را جذب و مستهلک کنند و اتصالات در بارهای حدى با شکل پذیری غیر ارتجاعی مناسب خود، قابلیت تحمل تغییر شکل‌های خمیری را بالا ببرند. این قابها دارای شکل پذیری مناسب ولی سختی جانبی کمتری اند [۱]. قابهای با مهار بند هم محور CBF در برابر زلزله از نظر سختی، مقاومت و کنترل تغییر مکانهای جانبی در محدوده خطی دارای رفتار بسیار مناسبی اند، ولی در محدوده غیر ارتجاعی به علت سختی جانبی مهار بندها، قابلیت جذب انرژی کمتری دارند و در نتیجه دارای شکل پذیری کمتری اند [۱ و ۵]. قابهای با مهار بند هم محور شکل‌های مختلفی دارند که در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران برخی از آنها معرفی شده است [۵]. در این قابها برش وارده در ابتدا توسط اعضای قطری جذب شده و سپس مستقیماً به نیروی فشاری و کششی

تبدیل شده و به سیستم قائم انتقال می‌یابد. در قابهای با مهار بند برون محور EBF، عضو قطری به صورت برون محور به تیر کف متصل می‌شود. در محل اتصال تیر و ستون و باد بند مقداری خروج از مرکزیت ایجاد می‌شود به نحوی که تیر رابط توانایی تحمل تغییر شکل‌های بزرگ را داشته باشد و همانند فیوز شکل پذیر عمل کند [۲ و ۷]. لذا یکی از اهداف اصلی در طراحی این قابها در برابر زلزله، جلوگیری از کمانش باد بندها از طریق به‌وجود آمدن مفاصل پلاستیک برشی و خمشی در تیرهای رابط می‌باشد. قابهای با مهار بند برون محور از قابلیت هر دو قابهای مقاوم خمشی و قابهای با مهار بند هم محور بهره گرفته‌اند و بنابراین سختی و شکل پذیری مناسب را به صورت توأم تأمین می‌کنند [۱ - ۲]. تعیین صحیح طول تیرهای رابط و طراحی مناسب آنها بسیار حائز اهمیت‌اند. برخی از شکل‌های قابهای با مهار بند برون محور در مرجع [۱] ارائه شده‌اند.

ضوابط طراحی قابهای مقاوم خمشی MRF، قابهای با مهار بند هم محور CBF و با مهار بند برون محور EBF در مرجع [۸] ارائه شده است. اگرچه قابهای EBF دارای رفتار بسیار مناسبتری‌اند ولی با تسلیم تیر رابط در اثر بارهای زلزله، خسارات جدی به کف وارد خواهد شد و چون این عضو به عنوان یک عضو اصلی سازه‌ای محسوب می‌شود ترمیم سازه نیز مشکل خواهد بود. این موضوع و گسترش مفاصل پلاستیک به تیرها و سپس به ستونها در قابهای EBF، و امکان به‌وجود آمدن نیروهای نا متعادل بر ستونها در صورتی که تیر رابط از یک مقدار مشخص بزرگتر باشد، و موارد و دلایل دیگر، تمایل به یافتن سیستمهای جدید مقاوم در برابر زلزله با رفتار مناسبتر از لحاظ شکل پذیری و سختی جانبی را افزایش می‌دهد. معرفی سیستم جدید قاب خمشی با مهار بند زانویی<sup>۱</sup> تلاش مضاعفی

مطالعات و تحقیقات بعدی نشان داد که این موضوع باعث ایجاد ناپایداری در منحنی چرخه‌ای می‌شود. لذا نتیجه‌گیری شد که مهار بندها همانند عضو فشاری با دو انتهای مفصل طراحی شوند [۹-۱۰]. در سال ۱۹۹۷ نیز آزمایشات دینامیکی عملی بر روی یک مدل بزرگ قاب KBF دو طبقه انجام شد و نتیجه‌گیری شد که می‌توان عضو زانویی را به نحوی طراحی کرد که این سیستم قابلیت جذب و استهلاک انرژی را بدون از دست دادن مقاومت جانبی داشته باشد [۱۱]. آسیبهایی ناشی از زلزله در این سیستمها در عضو زانویی متمرکز می‌شود و در نتیجه از انتقال خسارت به اعضای اصلی سازه به میزان قابل ملاحظه‌ای جلوگیری می‌کند. شکل (۲) دو نمونه از اتصال بادبند به زانویی را نشان می‌دهد.

### ۳- اثر پارامترهای هندسی بر سختی جانبی الاستیک قابهای

#### KBF

سختی جانبی قاب برابر با نسبت نیروی وارده بر بالای قاب به تغییر مکان جانبی متناظر با آن در نظر گرفته می‌شود. هر قدر که سختی جانبی قاب بیشتر باشد تغییر مکان جانبی متناظر با آن کمتر می‌شود. سختی جانبی الاستیک قاب K تابعی از پارامترهای هندسی و مشخصات اعضا طبق معادله (۱) است [۴ و ۱۱۴].

$$\frac{K}{EI_c/H^3} = f\left(\frac{I_b}{I_c}, \frac{I_k}{I_c}, \frac{I_k}{I_b}, \frac{A}{A_k}, \frac{H}{B}, \frac{h}{H}, \frac{b}{B}, \frac{A_b/B}{I_c/H^3}, \frac{A_c/H}{I_c/H^3}, \frac{A_k/I_k}{I_c/H^3}\right) \quad (1)$$

A, H, h, B, b به ترتیب برابر ممان اینرسی عضو، سطح مقطع عضو، ارتفاع قاب، ارتفاع زانویی، طول دهانه قاب و فاصله افقی زانویی‌اند که در شکل (۱) مشخص شده‌اند. زیرنویسهای c, b, k به ترتیب نشانگر عضو زانویی، تیر و ستون‌اند. تغییر شکلهای محوری المان خمشی در مقایسه با تغییر شکل خمشی آن نا چیز است. بنابراین از سه پارامتر آخر معادله (۱) می‌توان صرف‌نظر کرد و آن را به صورت معادله (۲) بازنویسی نمود.

$$\frac{K}{EI_c/H^3} = f\left(\frac{I_b}{I_c}, \frac{I_k}{I_c}, \frac{I_k}{I_b}, \frac{A}{A_k}, \frac{H}{B}, \frac{h}{H}, \frac{b}{B}\right) \quad (2)$$

در سیستمهای KBF عضو قطری باید برای مقابله با کمانش

برای یافتن سیستمهای جدید مقاوم در برابر زلزله با رفتار لرزه‌ای مناسبتر از سیستمهای قبلی است.

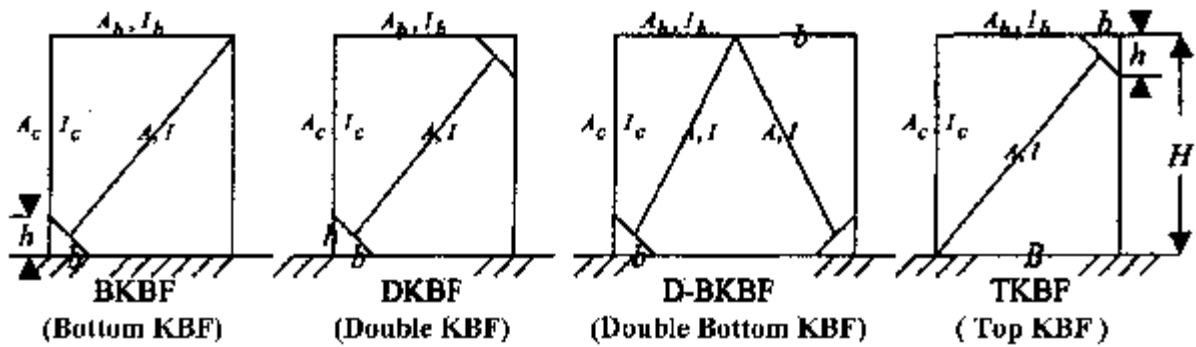
در این مقاله ضمن معرفی سیستمهای جدید قاب خمشی با مهار بند زانویی KBF، محدوده مناسب برای طراحی پارامترهای هندسی که در تأمین سختی لازم این سیستم موثرند، تعیین می‌شود. همچنین رفتار خطی و غیر خطی دینامیکی یک نوع قاب نمونه یک طبقه با مهاربند جدید زانویی KBF تحت تأثیر زلزله‌های ناغان و الاسترو بررسی می‌شود و رفتار لرزه‌ای آن با سیستمهای هم محور CBF و برون محور EBF مشابه مقایسه می‌شود. در این مقایسه‌ها، تغییر مکان جانبی، ضرایب برش پایه، افت طبقات و ضرایب شکل پذیری، و روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قابها تحت تأثیر زلزله‌های ناغان و الاسترو بررسی می‌شود.

### ۲- سیستم جدید قاب با مهار بندی زانویی KBF

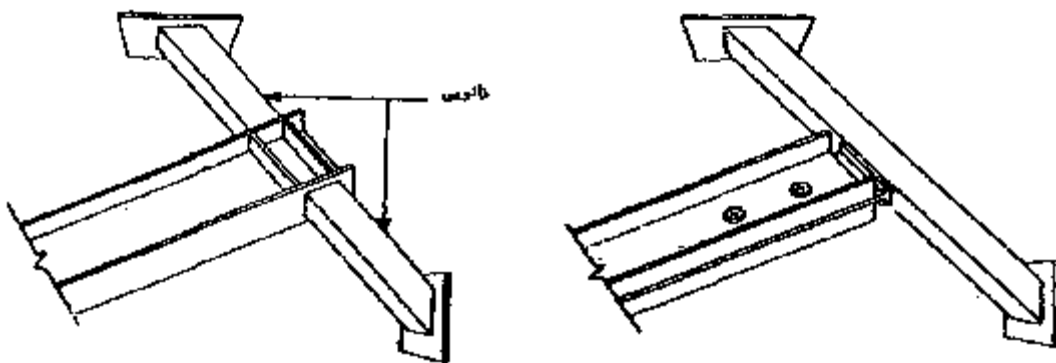
سیستم قاب با مهار بندی زانویی KBF در سال ۱۹۸۶ توسط آقای پروفیسور آریستیزابال اوچوا<sup>۲</sup> معرفی شد و سپس در سالهای ۱۹۹۰، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴ توسط محققان دیگری تعریف دقیقتری از این سیستم ارائه شد [۶، ۹، ۱۰ و ۱۱]. این سیستم شامل قاب با مهار قطری است که یک یا هر دو انتهای عضو قطری به عضو زانویی متصل می‌شود. سختی از طریق عضو قطری و شکل پذیری از طریق تسلیم خمشی عضو زانویی تأمین می‌شود. رفتار غیر خطی مناسب این سیستم به رفتار زانویی بستگی دارد، که به صورت فیوز در هنگام زلزله شدید عمل می‌کند و انرژی را از طریق لهیدگی خمشی عضو زانویی مستهلک می‌کند.

طراحی عضو زانویی دارای اهمیت خاصی است و مقطع آن می‌بایست با رعایت ضوابط مقاطع پلاستیک طراحی شود. شکل (۱) انواع سیستمهای قابهای با مهار بند جدید زانویی را نشان می‌دهد.

در تحقیقات اولیه انجام گرفته بر روی این سیستمها فرض بر این بوده است که کمانش مهار بند در فشار مجاز باشد، ولی



شکل ۱- چهار نوع قاب خمشی با مهار بند زانویی KBF



شکل ۲- دو نمونه از اتصال بادبند به زانویی [۱۱]

دارند. پارامترها  $h/H$  و  $b/B$  با توجه به نسبت‌های  $H/B$  مختلف برای تعیین سختی قاب دارای اهمیت‌اند. برای بررسی اثر پارامترهای  $h/H$  و  $b/B$  و  $H/B$  بر سختی ارتجاعی قاب‌های BKBF, DKBF, TKBF، مقادیر  $h/H$  و  $b/B$  از صفر تا یک به ازای سه مقدار مختلف  $\{0.5, 0.75, 1.0\}$   $H/B =$  تغییر داده شدند. به این ترتیب تغییرات زاویه عضو زانویی نیز به صورت خودکار در تحلیلها وارد شد. قاب‌ها تحت بار جانبی واحد تحلیل شده و تغییر مکان جانبی آنها محاسبه شد. با تقسیم بار واحد بر تغییر مکان جانبی، سختی جانبی الاستیک هر قاب  $K$  تعیین شد. سختی نرمال شده هر قاب نسبت به سختی ستون با تقسیم  $K$  بر  $EI_c/H^3$  مربوطه به دست آمد. به ازای  $h/H=0$  و  $b/B=0$  قاب TKBF به قاب CBF تبدیل می‌شود. به ازای  $h/H=0$  و  $b/B > 0$  قاب TKBF به قاب EBF تبدیل می‌شود. به ازای  $h/H=0$  و  $b/B=1$  یا  $h/H=1$  و  $b/B=0$  قاب

(معمولاً حول محور خارج از پلان) طراحی شود. لذا مهار جانبی همانند قاب‌های EBF نیاز خواهد بود. چون بادبند بیشترین سختی جانبی را تأمین می‌کند، سختی حاصل از تیر قابل صرف‌نظر کردن است و پارامتر  $I_b/I_c$  از حساسیت بالایی برخوردار نخواهد بود. در نتیجه معادله (۲) به صورت معادله (۳) بازنویسی می‌شود.

$$\frac{K}{EI_c} \frac{1}{H^3} = f\left(\frac{I_k}{I_c}, \frac{I_k}{I_b}, \frac{A}{A_k}, \frac{H}{B}, \frac{h}{H}, \frac{b}{B}\right) \quad (3)$$

### ۳-الف- اثر شکل هندسی قاب و موقعیت مهار بند‌های

#### زانویی و تعیین محدوده آنها

شکل هندسی قاب و موقعیت مهاربند زانویی به سه پارامتر چهارم و پنجم و ششم معادله (۳) بستگی دارند. پارامتر  $H/B$  یعنی نسبت ارتفاع به طول دهانه قاب با توجه به محدودیت‌های معماری و اجرایی در طراحی ساختمانها، حدود مشخصی

مشخص شده منحنیهای تغییرات  $K/EI_c/H^3$  با تغییر  $A/A_k$  ترسیم شدند. همچنین منحنیهای تغییرات  $K/EI_c/H^3$  با تغییرات  $I_k/I_b$  و با تغییرات  $I_k/I_c$  نیز ترسیم شدند. سه نمونه از این منحنیها در شکلهای (۷- الف، ب و ج) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد به طور کلی سختی قابهای TKBF و BKBF از قابهای DKBF بیشتر است. با افزایش  $A/A_k$  هر اندازه  $H/B$  به یک نزدیکتر و  $h/H$  کوچکتر باشد، سیستم دارای سختی بیشتری است و برای  $h/H$  بزرگ، سختی سیستم به مقدار ثابتی میل می‌کند. مقادیر سختی مدل‌های TKBF و BKBF برای DKBF مقادیر کوچکتر  $A/A_k$  اختلاف چندانی ندارند. با افزایش  $I_k/I_c$  سختی جانبی هر سه مدل KBF افزایش می‌یابد و برای مقادیر کوچکتر  $h/H$  و  $H/B$ ، سختی سیستم به مقدار ثابتی میل می‌کند. با افزایش  $I_k/I_b$  سختی سیستم افزایش می‌یابد و برای مقادیر کوچکتر  $h/H$  و  $H/B$ ، سختی جانبی به مقدار ثابتی میل می‌کند.

#### ۴- طراحی قابهای نمونه

برای بررسی رفتار غیر خطی دینامیکی قابهای KBF تحت تأثیر زلزله، قاب محور D از یک ساختمان یک طبقه فولادی منظم که دارای پلان شکل (۸) است و با فرض واقع شدن در تهران، برای مطالعه و بررسی انتخاب شد. این ساختمان در دو جهت و در دهانه‌های کناری دارای سیستم مرکب قاب خمشی با مهاربند TKBF است. اتصال تیرها به ستونها و زانویی به تیر و زانویی به ستون از نوع خمشی و اتصال مهاربند قطری به زانویی و به پای ستون مفصلی و اتصال ستونها به پی گیردار است. بارگذاری قابها شامل بارهای ثقلی و زلزله بر اساس استاندارد ۵۱۹ و آیین نامه ۲۸۰۰ ایران است. قابها با استفاده از آیین نامه AISC-LRFD طراحی شده‌اند. مقاطع با استفاده از ضوابط قسمت دوم آیین نامه AISC مجدداً کنترل شده‌اند.

عضو زانویی برای تسلیم پلاستیک با ظرفیت چرخش کافی از طریق محدود کردن نسبت عرض به ضخامت طراحی می‌شود [۱]. اتصال بادبند به زانویی باید از تغییر شکل جانبی جلوگیری کند، به طوری که افت و کاهش ناگهانی در سختی

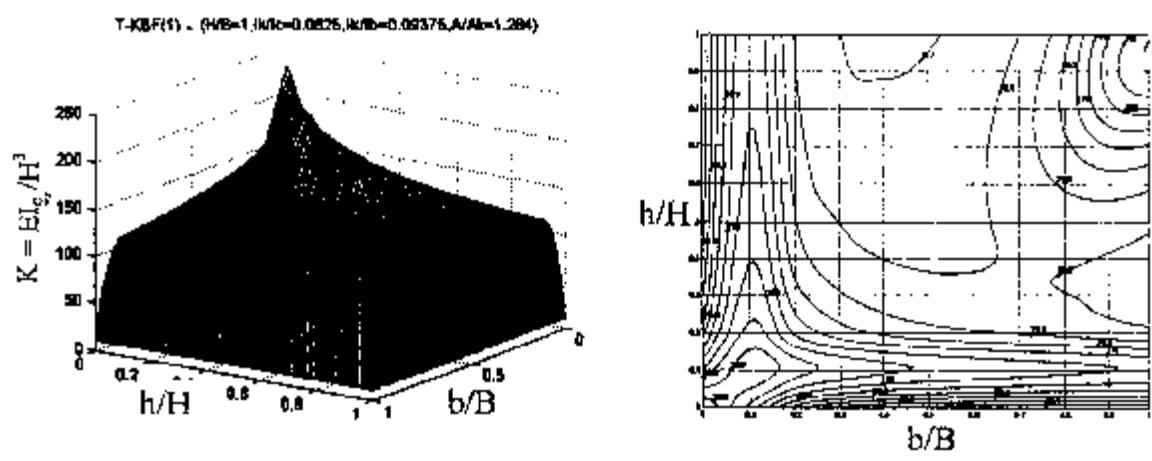
TKBF به قاب MRF تبدیل می‌شود. به ازای  $h/H > 0$  و  $1 > b/B = 0$  قاب TKBF به قاب با برون محوری روی ستونها تبدیل می‌شود که آیین نامه‌ها اجازه استفاده از آن را نداده‌اند. لذا با بررسی توأم این پارامترها، چندین نوع دیگر سیستم مقاوم در برابر بار جانبی نیز در تحلیلها وارد شدند. بدین ترتیب به طور مثال موقعیت قابهای TKBF به قابهای CBF و EBF مشخص می‌شود. نتایج حاصل با توجه به پارامترهای موثر، با نرم افزار متلب مورد تحلیل و درونیابی دو بعدی قرار گرفته و بهترین منحنی ممکن از نقاط عبور داده شدند. سپس منحنیهای سه بعدی سختی و منحنیهای هم سختی مربوط به هر قاب برای سه مقدار مختلف  $H/B$  نیز همانند پلانهای توپوگرافی ترسیم شدند. شکلهای (۳)، (۴) و (۵) یک نمونه از این منحنیها را برای هر یک از قابهای DKBF, BKBF, TKBF نشان می‌دهند.

منحنیهای هم سختی بهترین محدوده برای سیستمهای KBF را نشان می‌دهند که در آنها سختی و شکل هندسی به صورت توأم لحاظ شده‌اند. با بررسی سطوح سه بعدی سختی و منحنیهای هم سختی ترسیم شده و تقسیم این منحنیها به چند ناحیه، سطح سختی مناسب برای هر یک از قابهای TKBF, DKBF و BKBF مطابق شکلهای (۶- الف و ۶- ب) مشخص شده‌اند.

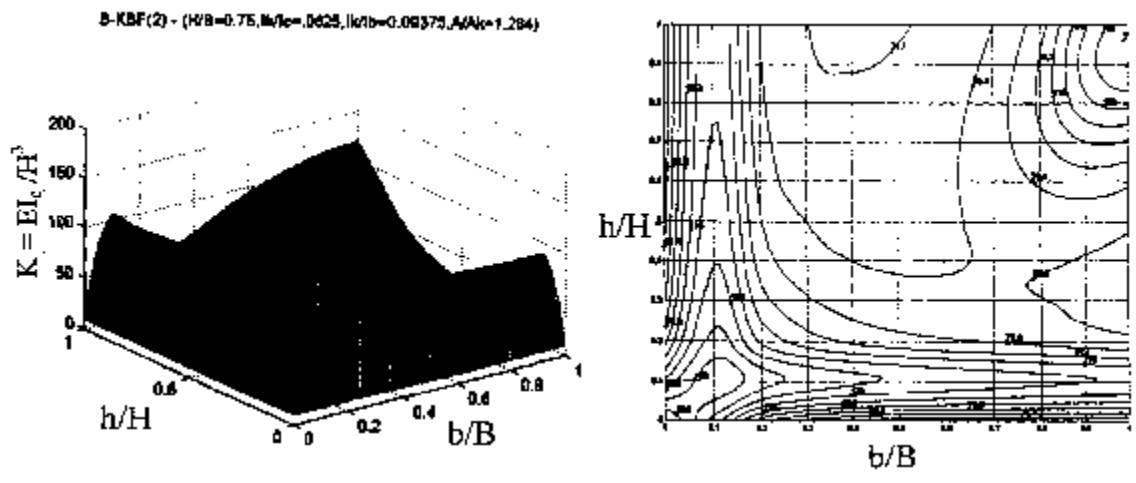
#### ۳- ب- اثر مشخصات اعضا بر سختی جانبی الاستیک

##### سیستمهای KBF

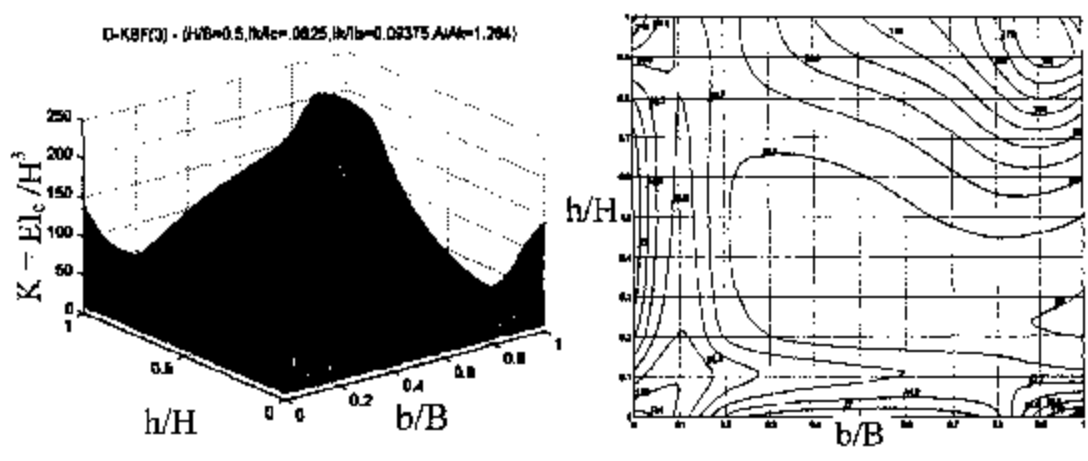
پارامترهای اول و دوم و سوم معادله (۳) به مشخصات اعضا مربوط می‌شوند. برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای  $I_k/I_b$  و  $I_k/I_c$  بر سختی جانبی قابهای KBF، با توجه به نتایج بررسیهای انجام شده در بخش ۳- الف، به ازای  $\{0.2, 0.3\}$  و  $h/H = \{0.1, 0.5, 0.75, 1\}$  جمعاً ۹ حالت برای هر مدل قاب KBF، مشخصات گره‌های اتصال زانویی به تیر، ستون و مهار بند تعیین شدند. سپس با تغییر مشخصات مقاطع اعضا، تغییر مکان جانبی قابها تحت بار جانبی واحد محاسبه شدند. پس از تعیین سختی الاستیک قابها، نسبت  $K/EI_c/H^3$



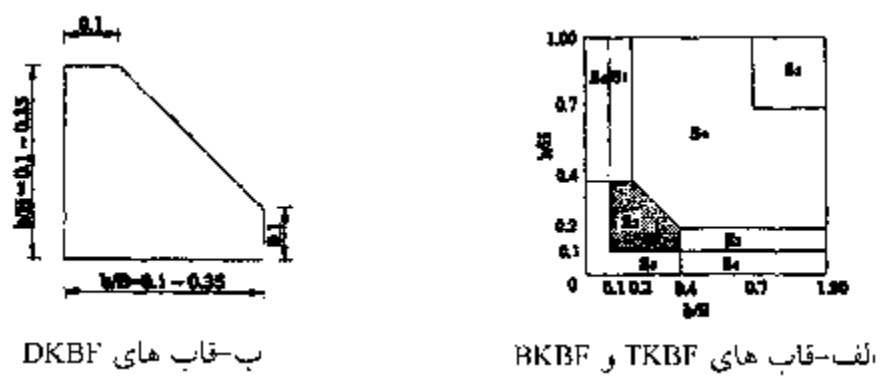
شکل ۳- یک نمونه از سطح سه بعدی سختی و منحنیهای هم سختی سیستمهای TKBF، H/B=1.



شکل ۴- یک نمونه از سطح سه بعدی سختی و منحنیهای هم سختی سیستمهای BKBF، H/B=0.75.

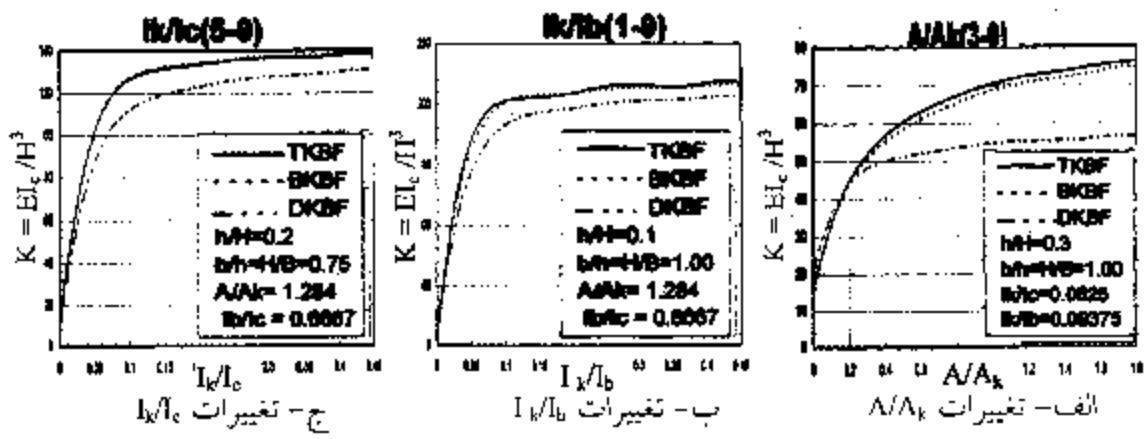


شکل ۵- یک نمونه از سطح سه بعدی سختی و منحنیهای هم سختی سیستمهای DKBF، H/B=0.5.



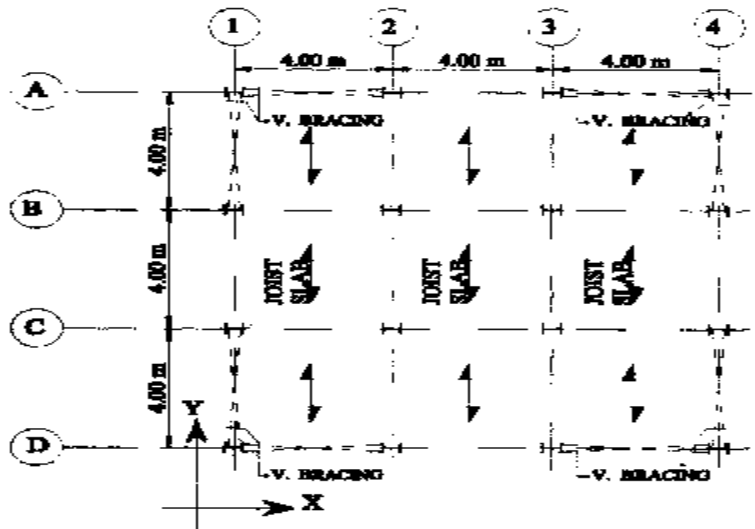
الف-قاب های TKBF و BKBF      ب-قاب های DKBF

شکل ۶- سطوح سختی مناسب برای قابهای DKBF, BKBF, TKBF



الف- تغییرات  $A/A_k$       ب- تغییرات  $I_x/I_b$       ج- تغییرات  $I_x/I_c$

شکل ۷- سه نمونه از منحنیهای تغییرات  $K/EI_c/H^3$  با  $A/A_k$  و  $I_x/I_b$  و  $I_x/I_c$



شکل ۸- پلان محوربندی و قاب بندی ساختمان مورد مطالعه

شده‌اند، تحت تأثیر شتاب زلزله‌های ناغان ۱۳۵۶ و السترو ۱۹۴۰ (شکل ۱۱)، با استفاده از برنامه DRAIN 2DX به صورت تاریخیچه زمانی تحلیل شده و با رفتار قابهای EBF و CBF نمونه مقایسه شده‌اند.

نسبت میرایی پنج در صد ثابت فرض شده و ماتریس میرایی تابعی از جرم و سختی در نظر گرفته شده است [۱۲]. کفهای طبقات قاب، صلب فرض شده و تحلیل به صورت دو بعدی انجام شده است. در مدل رایانه‌ای قابهای TKBF برای اعضای تیر، ستون و زانویی از المان تیر-ستون و برای مهاربند قطری از المان خرپایی استفاده شده است. در مدل قابهای EBF و CBF برای اعضای تیر از المان تیر و برای ستونها از المان تیر-ستون و برای مهاربند از المان خرپایی استفاده شده است. شکل (۱۲-الف) سطح تسلیم برای المانهای تیر-ستون، شکل (۱۲-ب) سطح تسلیم برای المانهای تیر در قابهای EBF و شکل (۱۲-ج) رفتار غیر ارتجاعی المانهای مهاربندی را نشان می‌دهند. سطح تسلیمی که در المانهای تیری واقع در مود برش استفاده می‌شود (همانند مدل EBF-1)، سطح تسلیم معادل است [۵]، به عبارت دیگر از سطح تسلیم معادل بالها استفاده می‌شود. در مدل EBF-2 نیز به دلیل اینکه طول تیر رابط زیاد است، از لنگر تسلیم کل مقطع تیر  $M_{pf}^* = b_f \cdot t_f (h - t_f)$  استفاده شده است.  $M_{pf}^*$  لنگر پلاستیک بالها و  $b_f$ ،  $t_f$ ،  $h$  به ترتیب عرض بال، ضخامت بال و ارتفاع مقطع‌اند.

تغییر مکان ماکزیمم نسبی طبقات، ضریب برش پایه ماکزیمم طبقات و شکل پذیری قابها محاسبه و جهت ارزیابی با مقادیر مجاز آیین نامه مقایسه شدند. به منظور بررسی شکل‌پذیری قابهای مورد مطالعه، تغییرات ضریب برش پایه با حد اکثر تغییر مکان خطی و حداکثر تغییر مکان غیر خطی آنها تحت تأثیر زلزله‌های ناغان و السترو با اعمال ضرایب متفاوت PGA، برای همه مدلها محاسبه و ترسیم شدند. چند نمونه از این نمودارها در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. در شکل (۱۴) تغییرات ضریب برش پایه با تغییر مکان جانبی مدل‌های مورد مطالعه، تحت تأثیر زلزله‌های ناغان و السترو ترسیم شده‌اند.

قاب ایجاد نکند. عضو زانویی باید طوری انتخاب شود که به‌طور جانبی پایدار باشد، بدون اینکه نیازی به مهار جانبی در محل اتصال بادبند قطری به زانویی باشد [۱۱]. لذا از مقاطع تو خالی جعبه‌ای قوطی شکل برای عضو زانویی استفاده شده است.

استاندارد BS5950 اشاره می‌کند که مقاطع تو خالی مربعی نیازی به کنترل کمانش پیچشی ندارند. ابعاد زانویی نیز باید طوری انتخاب شود که مقاومت و شکل پذیری لازم را ایجاد کند. طراحی دیگر اعضای قاب نیز باید به گونه‌ای باشد که قویتر از عضو زانویی باشند، به طوری که عضو زانویی بتواند به حد تسلیم برسد. لذا، در طراحی کلیه قابها، ستونها قویتر از تیرها و هر دو عضو تیر و ستون قویتر از عضو زانویی انتخاب شده‌اند. عضو مهار بند در قابهای TKBF با فرض دو انتهای مفصلی و به صورت محافظه کارانه برای فشار طراحی شده است. به این ترتیب پنج مدل متفاوت برای سیستم مرکب قاب خمشی و مهار بند زانویی TKBF با مشخصات ارائه شده در جداول (۱) و (۲) و شکل (۹)، طراحی شد.

دو مدل برای سیستم مرکب قاب خمشی و مهاربند برون محور EBF با برون محوریهای  $1.5 \text{ Mp/Vp}$  و  $2.6 \text{ Mp/Vp}$  و مطابق شکل (۱۰-الف)، و دو مدل برای سیستم مرکب قاب خمشی و باد بند هم محور CBF با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) و شکل (۱۰-ب)، انتخاب شدند. مقاطع تیرها، ستونها و مهاربندها در قابهای EBF همانند قابهای TKBF در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان رفتار این دو سیستم را با همدیگر مقایسه نمود. مقاطع تیرها، ستونها و مهاربندها در یکی از قابهای CBF همانند قابهای TKBF در نظر گرفته شده است ولی در مدل دوم، عضو مهار بند برای نیروهای کششی طراحی شده است و در نتیجه کمانش عضو مهاربند مجاز است. جدول (۳) مشخصات هندسی قابهای CBF را نشان می‌دهد.

#### ۵- تحلیل دینامیکی غیر خطی قابهای خمشی با مهاربند

##### زانویی تحت تأثیر زلزله

به منظور بررسی رفتار دینامیکی غیر خطی قابهای KBF تحت تأثیر زلزله، رفتار قابهای TKBF نمونه که قبلاً طراحی



جدول ۱- خلاصه طراحی پنج مدل قابهای خمشی با مهار بند زانویی TKBF

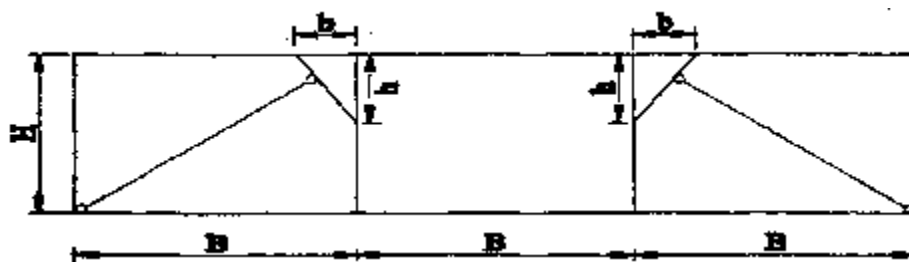
| نام مدل‌های TKBF | زانویی        |          | تیر          |          | ستون  | مهاربندی |
|------------------|---------------|----------|--------------|----------|-------|----------|
|                  | مقطع BOX (cm) | نسبت تنش | مقطع انتخابی | نسبت تنش |       |          |
|                  | 7 × 7 × 0.5   | 0.948    | 1PB12        | 0.809    | IPB14 | 2UNP12   |
| TKBF-۱           | 8 × 8 × 0.56  | 0.836    | 1PB12        | 0.802    | IPB14 | 2UNP12   |
| TKBF-۲           | 9 × 9 × 0.45  | 0.958    | 1PB12        | 0.795    | IPB14 | 2UNP12   |
| TKBF-۳           | 9 × 9 × 0.56  | 0.923    | 1PB12        | 0.788    | IPB14 | 2UNP12   |
| TKBF-۴           | 10 × 10 × 0.5 | 0.900    | 1PB12        | 0.780    | IPB14 | 2UNP12   |
| TKBF-۵           | 7 × 7 × 0.5   |          |              |          |       |          |

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل‌های TKBF

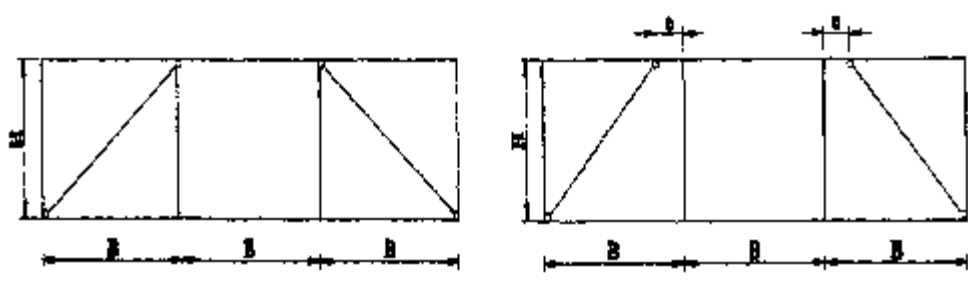
| l(m) | b(m)   | h(m) | b/h  | h/H  | H(m) | B(m) | عنوان مدل |
|------|--------|------|------|------|------|------|-----------|
| 4.73 | 0.3375 | 0.45 | 0.75 | 0.15 | 3.00 | 4.00 | TKBF-۱    |
| 4.64 | 0.45   | 0.60 | 0.75 | 0.20 | 3.00 | 4.00 | TKBF-۲    |
| 4.53 | 0.5625 | 0.75 | 0.75 | 0.25 | 3.00 | 4.00 | TKBF-۳    |
| 4.46 | 0.675  | 0.90 | 0.75 | 0.30 | 3.00 | 4.00 | TKBF-۴    |
| 4.37 | 0.7875 | 1.05 | 0.75 | 0.35 | 3.00 | 4.00 | TKBF-۵    |

جدول ۳- مشخصات هندسی مدل‌های CBF

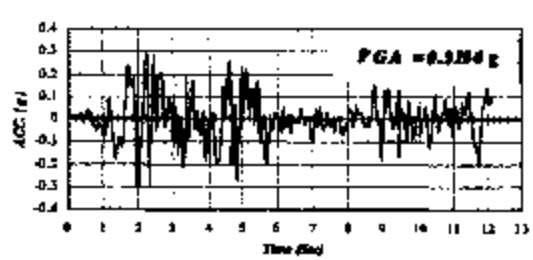
| L(m) | H(m) | B(m) | عنوان مدل |
|------|------|------|-----------|
| 5.00 | 3.00 | 4.00 | CBF-۱     |
| 5.00 | 3.00 | 4.00 | CBF-۲     |



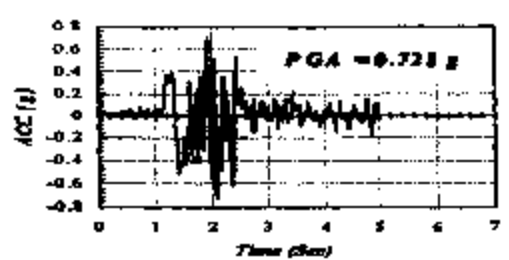
شکل ۹- مدل قابهای TKBF



شکل ۱۰- مدل قابهای EBF و CBF

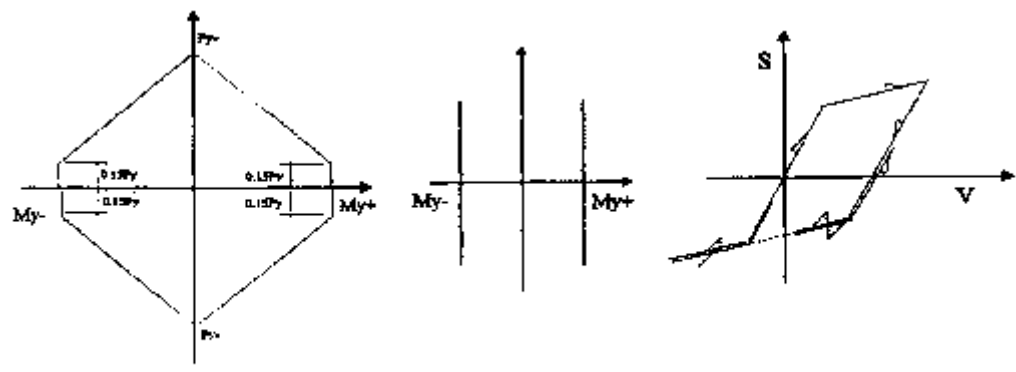


ب- زلزله السترو ۱۹۴۰ آمریکا



الف- زلزله ناغان ۱۳۵۶ ایران

شکل ۱۱- تاریخچه زمان شتاب زلزله‌های ناغان و السترو

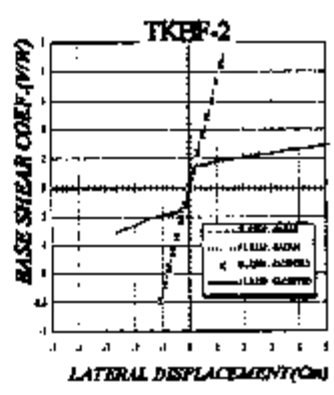
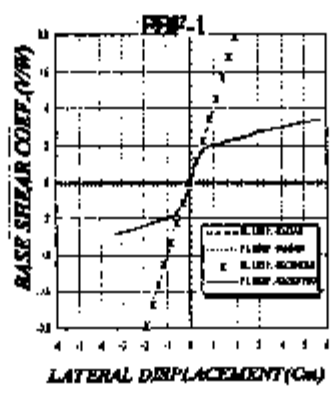
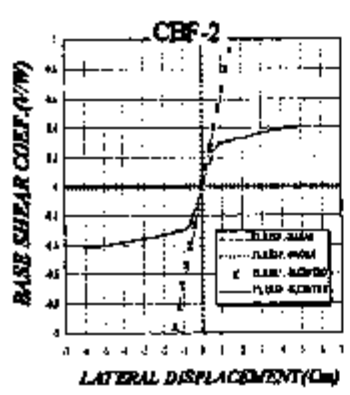


ج- المان تیر - ستون

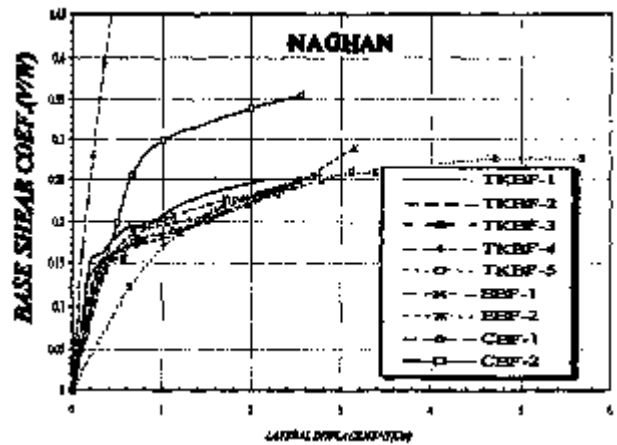
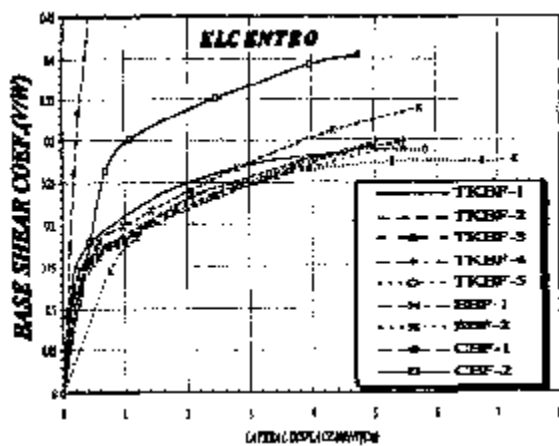
ب- المان تیر

الف- المان خربا

شکل ۱۲- سطوح تسلیم و رفتار غیر ارتجاعی المانهای تیر، تیر- ستون و مهاربند



شکل ۱۳- تغییرات ضریب برش پایه با تغییر مکان جانبی (السترو و ناغان) PGA های مختلف



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات ضریب برش پایه با تغییر مکان غیر خطی مدلها (زلزله ناغان)

همچنان که ملاحظه می شود، مدل های EBF بیشترین تغییر مکان جانبی را در بین سایر مدل های مورد مطالعه دارند و مدل CBF-1 نیز کمترین مقدار ممکن را داراست. از بین مدل های TKBF، مدل های TKBF-3 و TKBF-4 به ترتیب با نسبت  $h/H$  برابر  $0/25$  و  $0/3$  از نقطه نظر تغییر مکان جانبی در بین سایر مدل های TKBF قرار دارند. بنابراین تحت تأثیر زلزله های فوق مدل های TKBF در مقایسه با مدل های EBF تغییر مکان جانبی کمتری دارند.

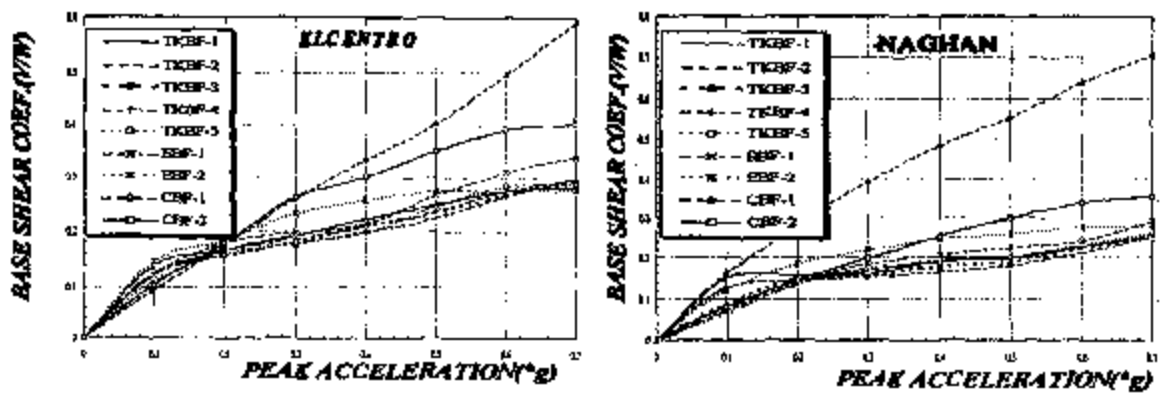
تغییرات حداکثر تغییر مکان قائم طبقات مدل های مختلف قابها در برابر تغییرات PGA زلزله های ناغان و السنترو در شکل (۱۷) نشان داده شده اند.

شکل (۱۸) روند تشکیل مفاصل پلاستیک به ازای PGA های  $0.1g$  و  $0.2g$  و  $0.3g$ ، در قاب های مورد مطالعه را نشان می دهد. در این شکلها علامت (●) روی اعضای تیر، ستون، مهاربند، زانویی نشان دهنده تشکیل مفاصل پلاستیک و علامت (O) روی مهاربندها نشان دهنده کمانش اعضای مهاربندی است.

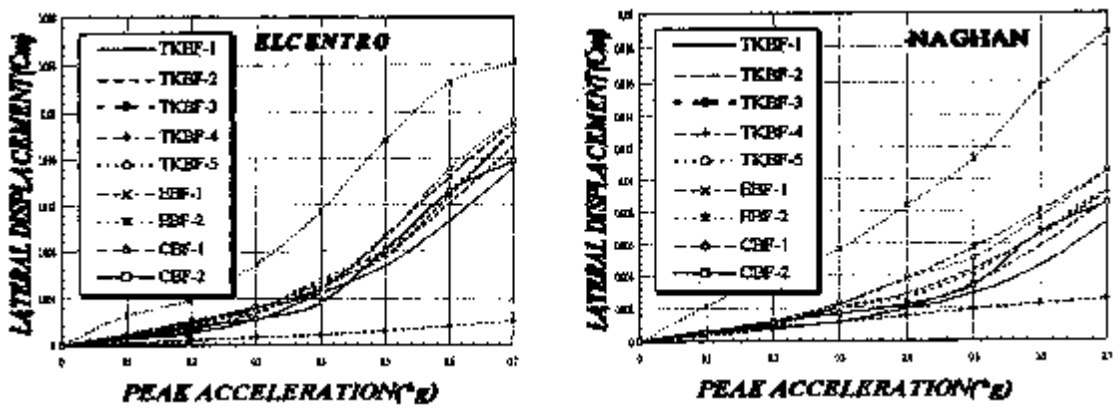
همچنان که در شکل های مربوط به مدل های TKBF مشهود است نیروهای زلزله اساساً توسط اعضای زانویی تحمل شده و از طریق لهیدگی خمشی، بارهای زلزله را مستهلک می کند. با

همان طوری که در شکلها ملاحظه می شود، مدل های CBF بیشترین ضریب برش پایه را نسبت به سایر مدل های مورد مطالعه دارند. در بین مدل های KBF نیز مدل TKBF-1 بیشترین ضریب برش پایه را نسبت به سایر مدل های TKBF داراست. ضریب برش پایه مدل های EBF تقریباً هم سطح با برخی مدل های TKBF است. همچنین می توان چنین استنباط کرد که ضرایب برش پایه با تغییر مکان جانبی به صورت دو خطی قابل بیان اند. با شبیه سازی نمودار  $(\Delta - V/W)$  با یک رابطه دوخطی، ملاحظه می شود که شیب شاخه اول (ارتجاعی) قاب های CBF-1 بیشتر از سایر مدل های مورد مطالعه می باشد. در قاب های TKBF نیز با افزایش نسبت  $h/H$  شیب شاخه یا به عبارت دیگر، سختی، کاهش می یابد و این نشانگر این است که سختی ارتجاعی قاب های CBF از قاب های TKBF و EBF بیشتر است و سختی قاب های TKBF در بین سختی قاب های EBF و CBF قرار دارد. تغییرات بیشینه ضریب برش پایه مدل های مختلف با افزایش PGA زلزله های ناغان و السنترو در شکل (۱۵) مقایسه شده اند.

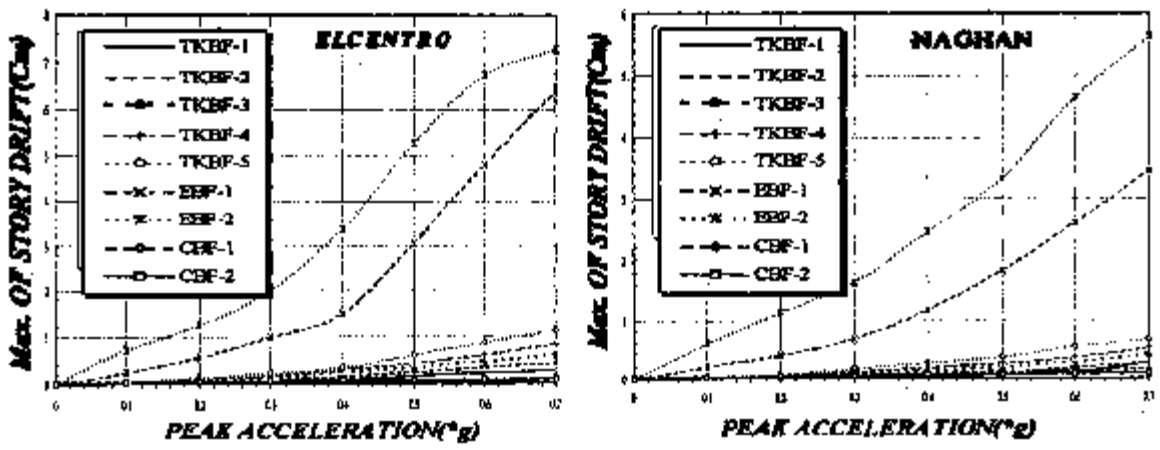
تغییرات ماکزیمم تغییر مکان جانبی طبقه به نسبت ارتفاع با افزایش حداکثر شتاب زلزله های ناغان و السنترو در شکل (۱۶) مقایسه شده اند.



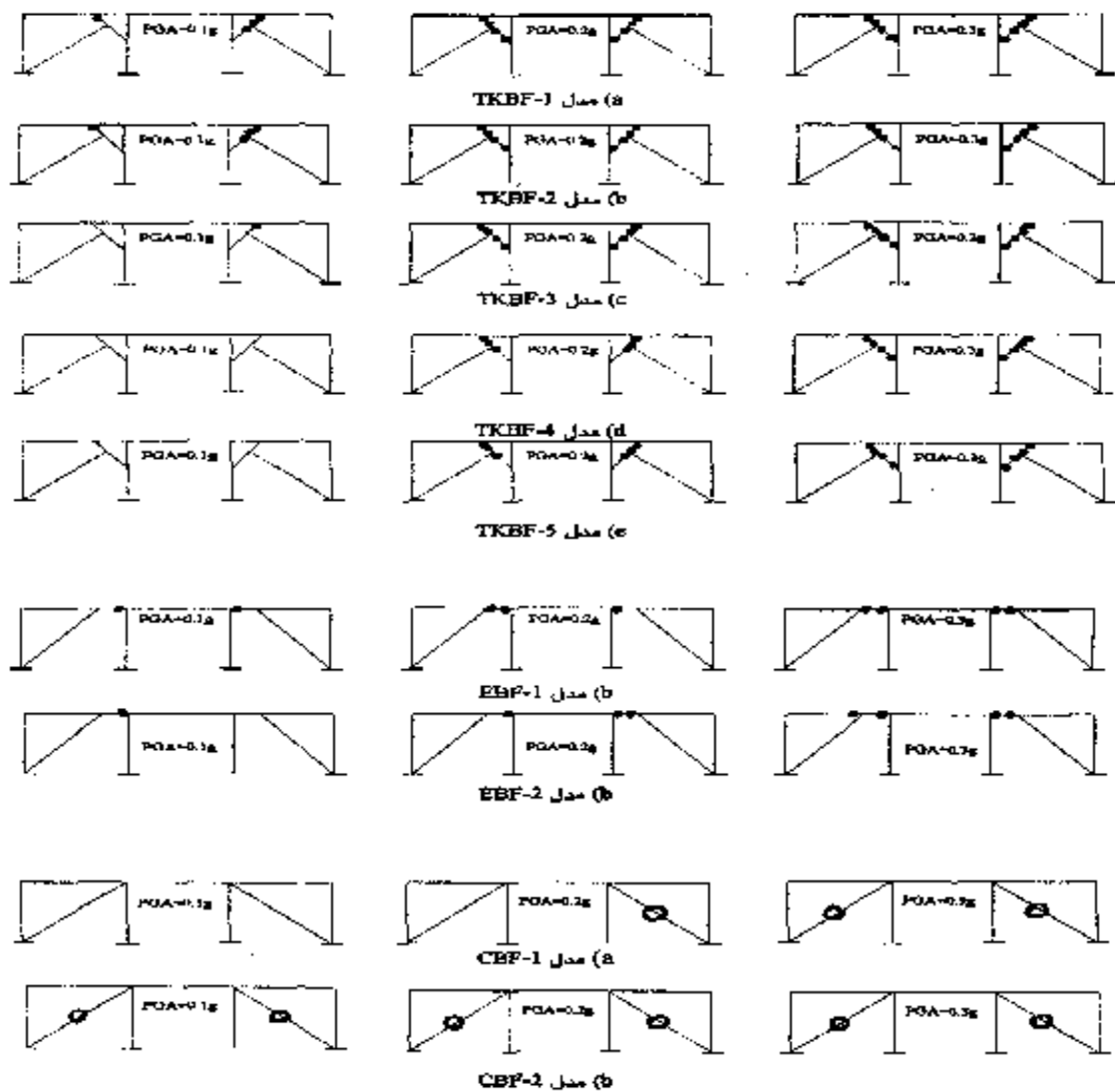
شکل ۱۵- تغییرات ضریب برش پایه با افزایش شتاب ماکزیمم زلزله‌های ناغان و السترو



شکل ۱۶- تغییرات ماکزیمم تغییر مکان جانبی طبقه با PGA زلزله‌های ناغان و السترو



شکل ۱۷- مقایسه بیشینه افت طبقه برای مدل‌های مختلف با افزایش PGA زلزله‌ها



شکل ۱۸- روند تشکیل مفاصل پلاستیک قابها تحت تأثیر زلزله ناغان

است. در قاب CBF-1 به ازای PGAهای وارده، به علت قوی بودن عضو قطری و زیاد بودن سختی قاب فقط اعضای مهاربندی کمانش پیدا کرده‌اند، اما در مدل CBF-2 به دلیل ضعیف بودن مهاربندیها، اعضای مهاربندی تسلیم شده‌اند. با افزایش PGA در قابهای CBF مشاهده می‌شود که مفاصل پلاستیک در ستونها نیز تشکیل شده است.

#### ۶- نتایج

۱- از طریق بررسی اثر پارامترهای هندسی بر سختی ارتجاعی قاب های یک طبقه KBF و مقایسه سطوح سه بعدی

افزایش نسبت  $h/H$  زلزله‌السترو نسبت به زلزله ناغان اثر بیشتری در تشکیل مفاصل پلاستیک دارد اولین مفصل پلاستیک که در قابهای EBF تشکیل می‌شود، مکانیزم تیر است. پس از این مرحله با افزایش شتاب وارده، تشکیل مفاصل پلاستیک به ستونها نیز گسترش یافته است. این موضوع در مقایسه با مدل‌های TKBF قابل توجه است، برای اینکه در این قابها، اولین مفاصل پلاستیک روی عضو زانوئی تشکیل می‌شوند که از اعضای اصلی سازه‌ای محسوب نمی‌شود. اولین مکانیزمی که در قابهای CBF تشکیل می‌شود، مکانیزم کمانش اعضای مهاربندی

۵- ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک در قابهای مورد مطالعه به صورت زیر است:

- قابهای TKBF: زانویی - تیر - ستون
- قابهای EBF: تیر - ستون
- قابهای CBF: بادبند - ستون - تیر

لذا از لحاظ تشکیل و گسترش مفاصل پلاستیک و نوع مکانیزم، قابهای TKBF تحت تأثیر زلزله بهتر عمل می‌کنند. در قابهای TKBF به ازای PGA های پایین فقط اعضای زانویی آسیب می‌بینند ولی در قابهای EBF در تیرهای طبقه مفصل تشکیل می‌شود. در صد تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای اصلی سازه‌ای (تیر و ستون) در قابهای KBF به ازای PGA های بزرگ از قابهای EBF مشابه کمتر است.

۶- شکل پذیری قابهای KBF مورد مطالعه از شکل پذیری قابهای EBF مشابه بیشتر است. شکل پذیری قابهای KBF با زانویی کوتاه بیشتر از قابهای با زانویی بلند است. برش پایه قابهای TKBF با نسبت  $h/H$  کوچک، بیشتر از قابهای با نسبت  $h/H$  بزرگ است.

۷- نتایج فوق مربوط به بررسی رفتار قابهای یک طبقه است. برای تعمیم و گسترش نتایج، مطالعه رفتار قابهای چند طبقه با سیستم مهار بند زانویی ضروری است.

سختی و منحنیهای هم سختی، بهترین محدوده برای تعیین پارامترهای هندسی که در تأمین سختی لازم سیستم موثرند مطابق شکل (۶-الف) و (۶-ب) تعیین شد. محدوده مشخص شده در شکل (۷-ب) برای هر سه نوع قاب  $DKBF, BKBF, TKBF$  یک طبقه مناسب است. بنابر این محدوده  $0.1 < b/B < 0.35$  و  $0.1 < h/H < 0.35$  در طراحی این قابها می‌بایست رعایت شود.

۲- سختی جانبی ارتجاعی قابهای KBF بیشتر از سختی جانبی قابهای EBF مشابه و کمتر از قابهای CBF مشابه است. لذا قابهای KBF از لحاظ سختی جانبی رفتار مناسبتری نسبت به قابهای EBF دارند.

۳- تغییر مکان جانبی قابهای با مهاربندی TKBF، کمتر از قابهای EBF و بیشتر از قابهای CBF است. بنابر این قابهای TKBF تحت تأثیر زلزله از لحاظ تغییر مکان جانبی از مدل‌های EBF مشابه رفتار مناسبتری دارند.

۴- قابهای TKBF از لحاظ کنترل تغییر مکان قائم (افت) طبقه از مدل‌های EBF مشابه بهتر عمل می‌کنند. تیرهای کف در قابهای EBF به علت تشکیل فیوز شکل‌پذیر بر روی آنها، پس از تسلیم افت شدیدی دارند، در نتیجه خسارات و آسیب دیدگی‌های شدیدی بر کف‌های ساختمانی وارد خواهند ساخت. لذا از این نظر نیز قابهای TKBF بر قابهای EBF مشابه برتری دارند.

## واژه نامه

1. knee braced frames (KBF)
2. Aristazabal-Ochoa, J. D

## مراجع

۱. عسگری، ج.، "بررسی رفتار دینامیکی خطی و غیر خطی قابهای با مهار بند جدید زانویی تحت تأثیر زلزله" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما دکتر دانشجو، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۸.
۲. ناطقی، ا. رفتار و طراحی لرزه‌ای قاب‌های خارج از مرکز، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، چاپ اول، ۱۳۷۵.
۳. طاحونسی، ش.، طراحی سازه‌های فولادی به روش حالات حدی، چاپ اول، ۱۳۷۰.
۴. کمال زاده، م.، "بررسی اثر پارامترهای هندسی بر رفتار غیر خطی سیستم باد بند KBF" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما دکتر اردشیر دیلمی، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۷.

9. Sam, M. T., Balendra T., and Liaw, C.Y., "Earthquake-Resistant Steel Frames With Energy Dissipating Knee Elements," *Engineering Struct.*, Vol. 17, No. 5, pp. 334-343, 1995.
10. Balendra, T., Sam, M.T., Liaw, C.Y., and Lee, S.L., "Preliminary Studies into The Behaviour of Knee Braced Frames Subject to Seismic Loading," *Engineering Struct.*, Vol. 13, PP. 68-74, 1991.
11. Balendra, T., Lim E.L., and Lee, S.L., "Ductile Knee for Seismic Resistant Structures," *Eng. Struct.*, Vol. 16, No. 4, P 263-269, 1994.
12. Prakash, V. Powell, G.H. "Drain\_2DX User's Guide", Department of Civil Engineering University of California Berkeley, California, 1992.
5. دادخواه چیمه، ا.، "بررسی رفتار قابهای با بادبندی هم‌مرکز و خارج از مرکز و فرم ترکیبی آنها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.
6. Balendra, T., Sam, M. T., and Liaw, C. Y., "Diagonal Brace With Ductile Knee Anchor for Aseismic Steel Frame," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, PP. 847-858, 1990.
7. Popov, E., and Engelhardt, M., "Seismic Eccentrically Braced Frames," *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 10, 1988.
8. Elias G. Abu. Saba, *Design of Steel Structures*, Chapman & Hall, 1995.