

## مطالعه اجزاء محدود رفتار غیر خطی قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری

شاهرخ مالک

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حسین حداد کلور

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

کامبیز کامیاب مقدم

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد رضا پورافشاری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۲/۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۱۰/۴، تاریخ تصویب ۸۲/۱۰/۲۰)

### چکیده

رفتار غیر خطی قابهای یک دهانه یک طبقه متشکل از تیرهای لانه زنبوری از طریق مطالعات اجزاء محدود مدلهای تفصیلی قاب های نمونه تحت اثر ترکیب بارهای قائم و افقی مورد بررسی قرار داده شده است. قابهای مورد مطالعه دارای تیرهای با طولهای متفاوت (تعداد سوراخهای متفاوت) در نظر گرفته شده اند. همچنین دونوع ستون مختلف (ستون با جان تو پر وستون دوبل تسمه دار) مورد مطالعه قرار داده شده و رفتار قابهای متشکل از دو نوع ستون مزبور با یکدیگر مقایسه گردیده است. علاوه بر قابهای متشکل از تیرهای منفرد لانه زنبوری با اتصالات متقارب المحور، قابهای متشکل از تیرهای دوبل خرجینی با اتصالات متداول و همچنین اتصالات خرجینی اصلاح شده نیز مورد بررسی قرار داده شده اند. ضمن توصیف رفتار غیر خطی قابها و پدیده های مشاهده شده، مسائل مربوط به بروز و گسترش پلاستیسیته، بروز مکانیسم موسوم به ویرندیلی و کمانش جانبی پیچشی جان مورد توجه ویژه قرار داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعات با نتایج آزمایشات قبلی نگارنده اول حاکی از تطابق نزدیکی بوده است که نشان دهنده قابلیت روش به کار گرفته شده در تخمین رفتار غیر خطی قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری می باشد.

**واژه های کلیدی:** تیر لانه زنبوری، کمانش جانبی پیچشی جان، اتصال خرجینی، قاب متشکل از تیر لانه زنبوری

### مقدمه

صور گسیختگی و دانسته های روز در ارتباط با تیرهای لانه زنبوری وقابهای متشکل از این تیرها توسط مالک [۱۵] مورد بحث قرار داده شده است. وجود سوراخها منجر به بروز تغییر شکلهای ثانویه موسوم به "برشی" می گردد که رفتار این تیرها را بغرنج می سازد. علاوه بر بروز تغییر شکلهای برشی، حالات متنوع گسیختگی محتمل این تیرها، تشکیل مکانیسم خمشی کلی، مکانیسم موسوم به ویرندیلی، کمانش جانبی پیچشی کلی، تیر، گونه های مختلف کمانش موضعی جان، بروز شکست در گوشه های سوراخها و گسیختگی جوش جان بیش از سایر گونه های محتمل مانند لهیدگی جان و کمانش بال مورد توجه قرار داده شده اند [۱۵].

علیرغم استفاده گسترده از قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری به صورت قابهای خمشی لنگرگیر، با یا بدون مهاربندی در سطح بین المللی و ملی، هیچگونه تحقیقی در زمینه رفتار قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری به استثناء مطالعات انجام شده توسط یازیر نظر مالک [۱] تا [۷]، [۱۱] تا [۱۶] گزارش نگردیده است. هدف از انجام تحقیق گزارش شده در مقاله حاضر، درک بهتر رفتار غیرخطی استاتیکی چنین قابهایی است که پیش نیاز مطالعات گسترده تر جاری و آتی در ارتباط با رفتار سیکلیک و دینامیکی و طراحی لرزه ای آنهاست. از میان مطالعات انجام شده مرتبط می توان از مطالعات ارائه شده در مراجع [۱۳] و [۱۴] یاد کرد.

از تیرهای لانه زنبوری، تحت اثر اعمال ترکیبی از بارهای قائم وافقی به صورت افزایشده مونوتونیک، به کار گرفته شده است. رفتار غیر خطی مصالح و اثرات غیر خطی هندسی مورد بررسی قرار داده شده اند ولی مطالعات شامل آنالیز شکست نمیباشد. لازم به یادآوری است که آنالیز شکست برای تیرهای لانه زنبوری و بررسی نحوه شروع و گسترش ترک در تیرهای لانه زنبوری در مرجع [۱۹] گزارش گردیده است. در این مرجع، برنامه اجزاء محدود غیر خطی با قابلیت آنالیز شکست (شروع و گسترش ترک در گوشه سوراخها) تدوین گردیده و نتایج تحلیل حاکی از تطابق نزدیکی با نتایج آزمایشهای مالک [۱] و [۲۰] بوده است. با ایجاد قوس پیشنهادی در گوشه سوراخها، در کلیه آزمایشهای انجام شده هیچگونه علایمی از شکست مشاهده نگردید. لذا تحلیلهای به عمل آمده در این کار، به میزان کافی گویای رفتار واقعگرایانه قاب خواهند بود.

### مدلهای مورد مطالعه

قابهای نمونه مورد مطالعه شامل سه دسته کلی به شرح زیر می باشند که مدلسازی و تحلیل تفصیلی اجزاء محدود آنها به شرحی که خواهد آمد، انجام گردیده است:

#### مجموعه A

این مجموعه از نمونه های مورد مطالعه شامل قابهای دارای ستونهای ساخته شده از ورق با جان توپر مطابق شکل (۱) می باشند و تیرهای لانه زنبوری دارای تعداد سوراخهای متفاوت (ولذا به طولهای متفاوت) در نظر گرفته شده اند. اتصال تیرها به ستون از نوع پیچی و توسط سپری های فوقانی و تحتانی طراحی گردیده است. این مجموعه دارای مشخصات قابهایی می باشند که توسط مالک و وثوق [۵] آزمایش گردیده اند. به طوری که ملاحظه میگردد، سوراخهای ابتدایی و انتهایی تیرها در این نمونه ها با ورق پر شده است لذا در این مجموعه ۴ قاب به ترتیب شامل تیرهایی با شش مدول (با دو سوراخ پر شده در طرفین و ۴ سوراخ باقیمانده)، ۸ مدول (با دو سوراخ پر شده در طرفین و ۶ سوراخ باقیمانده)، ۱۰ مدول و ۱۲ مدول (هریک با دو سوراخ پر شده در طرفین و به ترتیب با ۸ و ۱۰ سوراخ باقیمانده) مورد مطالعه قرار داده شده

مطالعات انجام شده و گزارش شده در مراجع مذکور در فوق حاکی از آن است که در تیر لانه زنبوری با الگوی برش مطابق مقررات ملی ایران - مبحث دهم - ضمیمه الف [۱۶] تحت اثر تغییرات لنگر (اعمال برش)، با افزایش بار، پلاستیسیته گسترده بروز می نماید. در صورت استفاده از شعاع قوس حداقل توصیه شده در این مرجع، حتی پس از تشکیل مکانیسم ویرندیلی، با توجه به آن که با حضور این شعاع قوس، مسأله تکینه به مسأله دارای تمرکز تنش به میزان معین تبدیل گردیده است، کماتش موضعی یا شکست در گوشه سوراخها اتفاق نمی افتد و اثرات سخت شدگی تنجشی منجر به قابلیت تحمل بارهای بیشتر می گردد تا کماتش الاستیک پلاستیک جان در مد جانبی پیچشی اتفاق افتد. با توجه به آنکه کماتش جانبی پیچشی جان پدیده ای ماهیتاً غیر شکل پذیر به شمار می رود، لذا در صورتی که با تأمین تکیه گاه جانبی در طول بالها، از بروز کماتش جانبی پیچشی کلی تیر ممانعت به عمل آمده باشد، ظرفیت باربری نهایی تیر، با ظرفیت جان از نظر مقاومت در مقابل کماتش جانبی پیچشی محدود خواهد گردید. مالک [۱] و [۱۶] انحاء مختلف کماتش عضو قائم جان را به سه حالت طبقه بندی نموده است:

- کماتش تحت اثر فشار مسلط

- کماتش تحت اثر برش مسلط (کوماتش جانبی پیچشی جان)

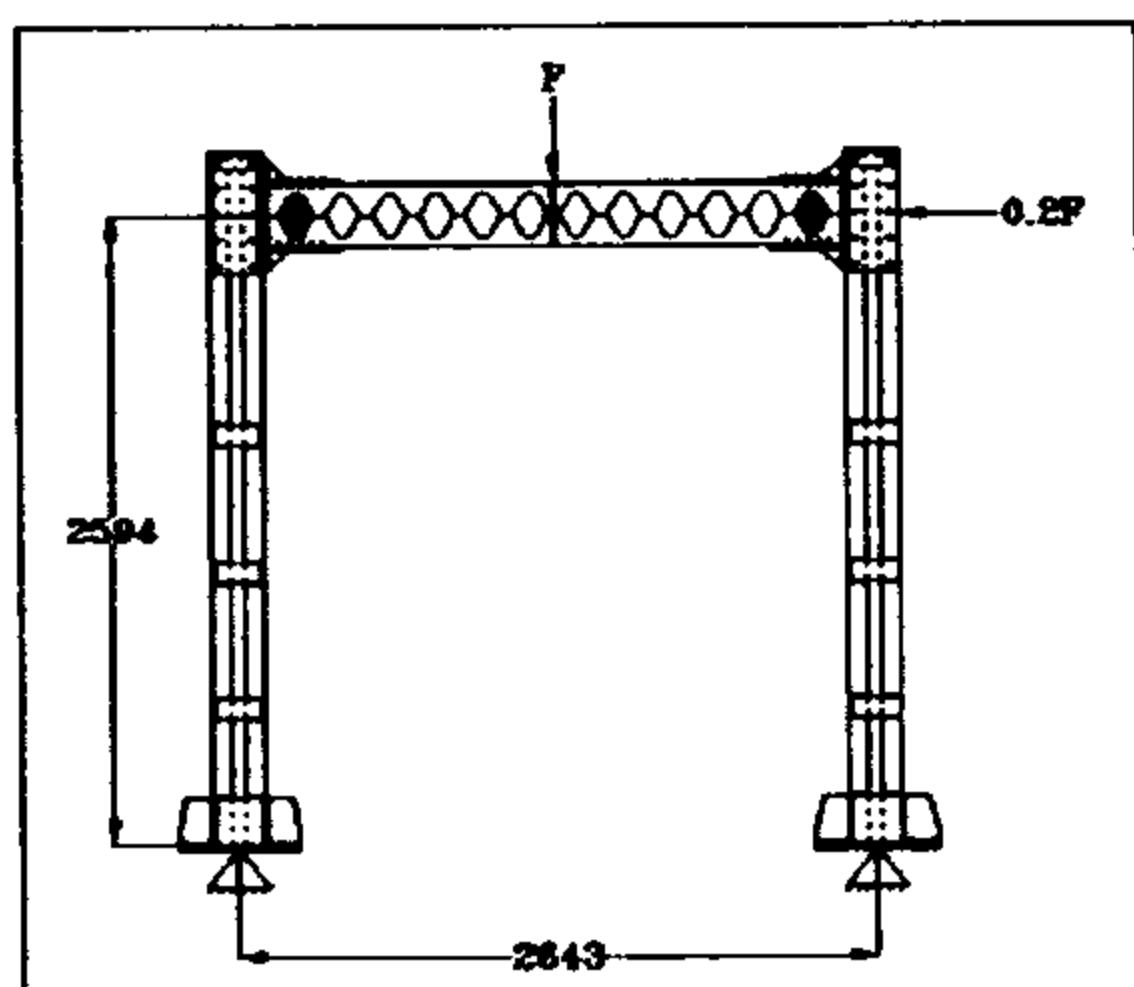
- حالت ترکیبی کماتش جان

مطالعات مزبور همچنین نشان داده است که فرمولهای پیشنهادی در مراجع [۱۷] و [۱۸] به ترتیب برای تخمین مقاومت عضو قائم جان در مقابل کماتش تحت اثر فشار مسلط و کماتش جانبی پیچشی جان در جهت عدم اطمینان بوده و در عین حال دقت مکفی برای مقاصد طراحی را دارا نمی باشند [۸] و [۱۰].

لذا مطالعات در زمینه پدیده کماتش جانبی پیچشی جان از اهمیت ویژه ای از نظر شناخت رفتار، شکل پذیری و تخمین مقاومت نهایی تیر و سازه های متشکل از تیرهای لانه زنبوری برخوردار است.

در مطالعاتی که طی مقاله حاضر گزارش گردیده، روش اجزاء محدود جهت ارائه ویژگیهای رفتاری قابهای متشکل

متعاقباً مورد آزمایش قرار داده شوند تا نتایج آزمایش با نتایج مطالعات اجزاء محدود مورد مقایسه قرار داده شود. لذا به منظور صرفه جویی درمیزان مصالح مصرفی، اتصالات از نوع پیچی در نظر گرفته شده است که پس از بروز خرابی در تیر بتوان از همان ستونها مکرراً استفاده نمود. در شبکه بندی و مدل‌های اجزاء محدود مورد بررسی نیز تلاش بر این بوده است که مدل اجزاء محدود حتی المقدور مدل واقع گرایانه‌ای از نمونه‌های آزمایش باشد.



شکل ۳: نمونه‌ای از قابهای مجموعه B.

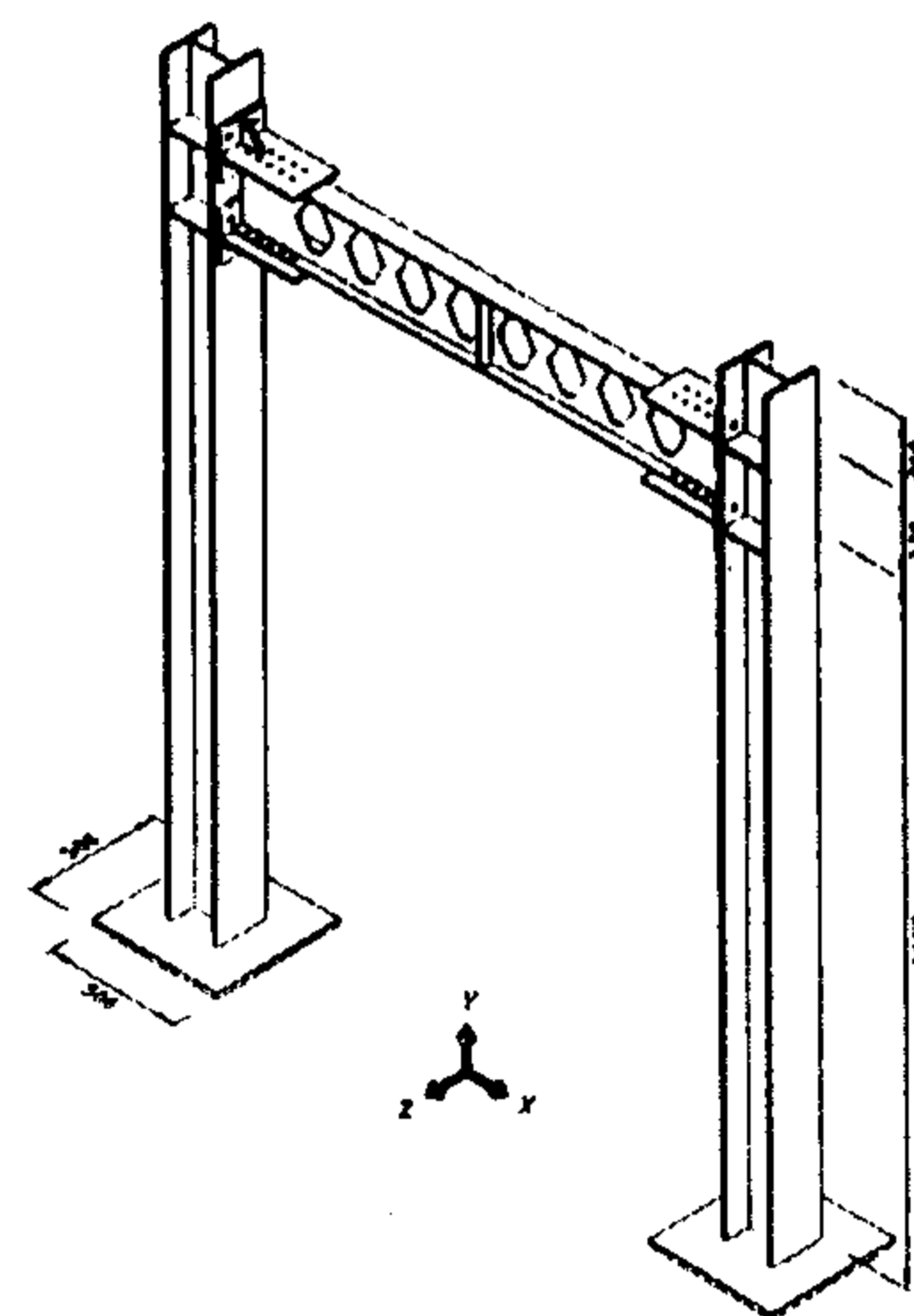
#### مجموعه C

قابهای مورد مطالعه در چارچوب مجموعه C شامل قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری دابل خرچینی با اتصالات خرچینی متداول و تقویت شده به شرح نشان داده شده در شکل (۴) می باشند.

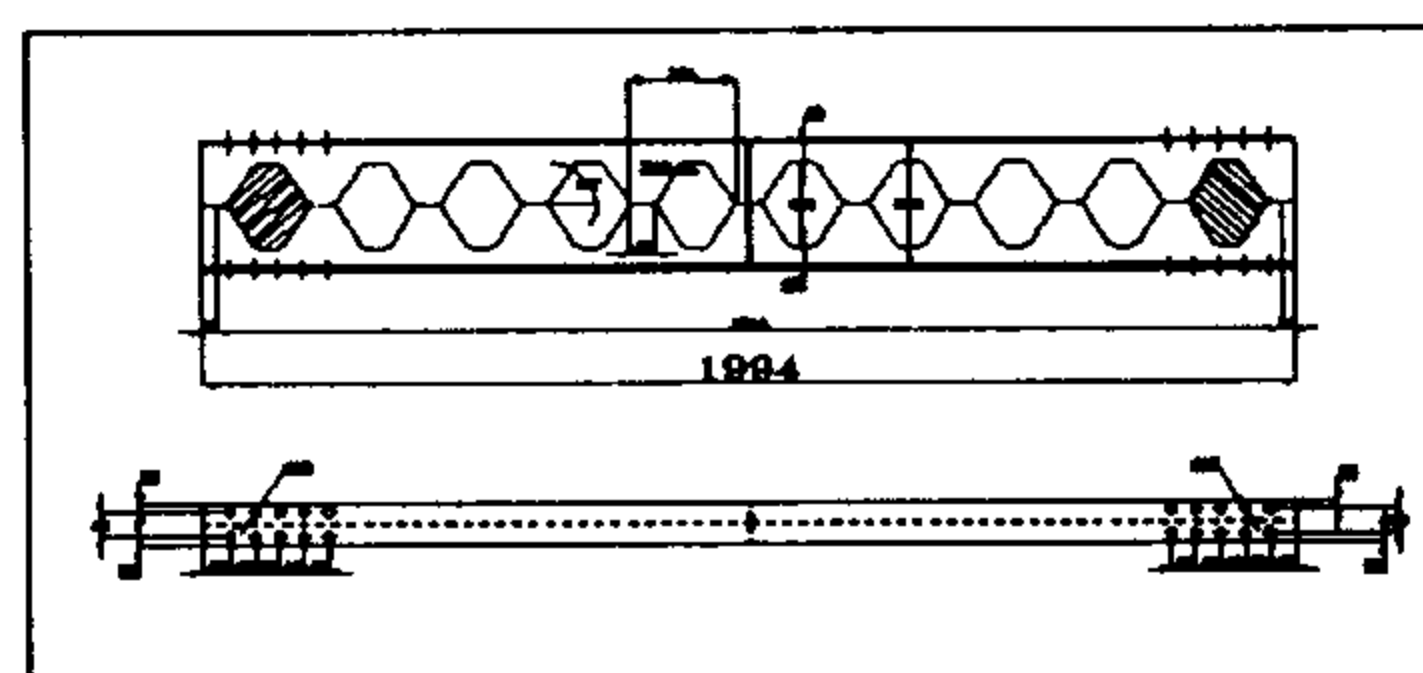
در این قابهای نمونه اتصالات خرچینی به صورت متداول (نبشی فوقانی و تحتانی)، به صورت اصلاح شده بالچکی تقویتی، نبشی های فوقانی و تحتانی به همراه ورق های فوقانی و تحتانی و همچنین به صورت طراحی شده به نحوی که حد فاصل بین نبشی ها و ورق های فوقانی و تحتانی قابل جوشکاری بوده و به این ترتیب دیافراگمی در اطراف ستون تشکیل گردد، در نظر گرفته شده اند. ستونها از نوع تسمه دار می باشند.

لازم به یادآوری است که با توجه به آنکه عملاتیرهای خرچینی به صورت یکسره و ممتد در طرفین ستونها امتداد می یابند، نمونه های دیگری از قاب دارای ۲ دهانه نیز مورد مطالعه قرار گرفته اند که با توجه به حجم محدود مقاله حاضر، نتایج آن مطالعات در چارچوب مقاله حاضر ارائه نگردیده است. لذا قابهای مجموعه C به منظور مطالعه رفتار اتصالات انتهایی خرچینی متداول و اصلاح شده و به منظور مقایسه ظرفیت باربری چنین قابهایی با قاب های

است. مشخصات نمونه ای از تیرها در شکل (۲) ارائه گردیده است. همچنین حالت بارگذاری شامل بار قائم افزایش یابنده  $F$  در وسط دهانه تیر و بار جانبی معادل  $0.2F$  در تراز محور تیر می باشد که در محل اتصال تیر به ستون اعمال گردیده است. نسبت بار جانبی به بار قائم در کلیه گامهای بارگذاری افزایشنده مونوتونیک یکسان و معادل  $0.2$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نمونه‌ای از قابهای مجموعه A.



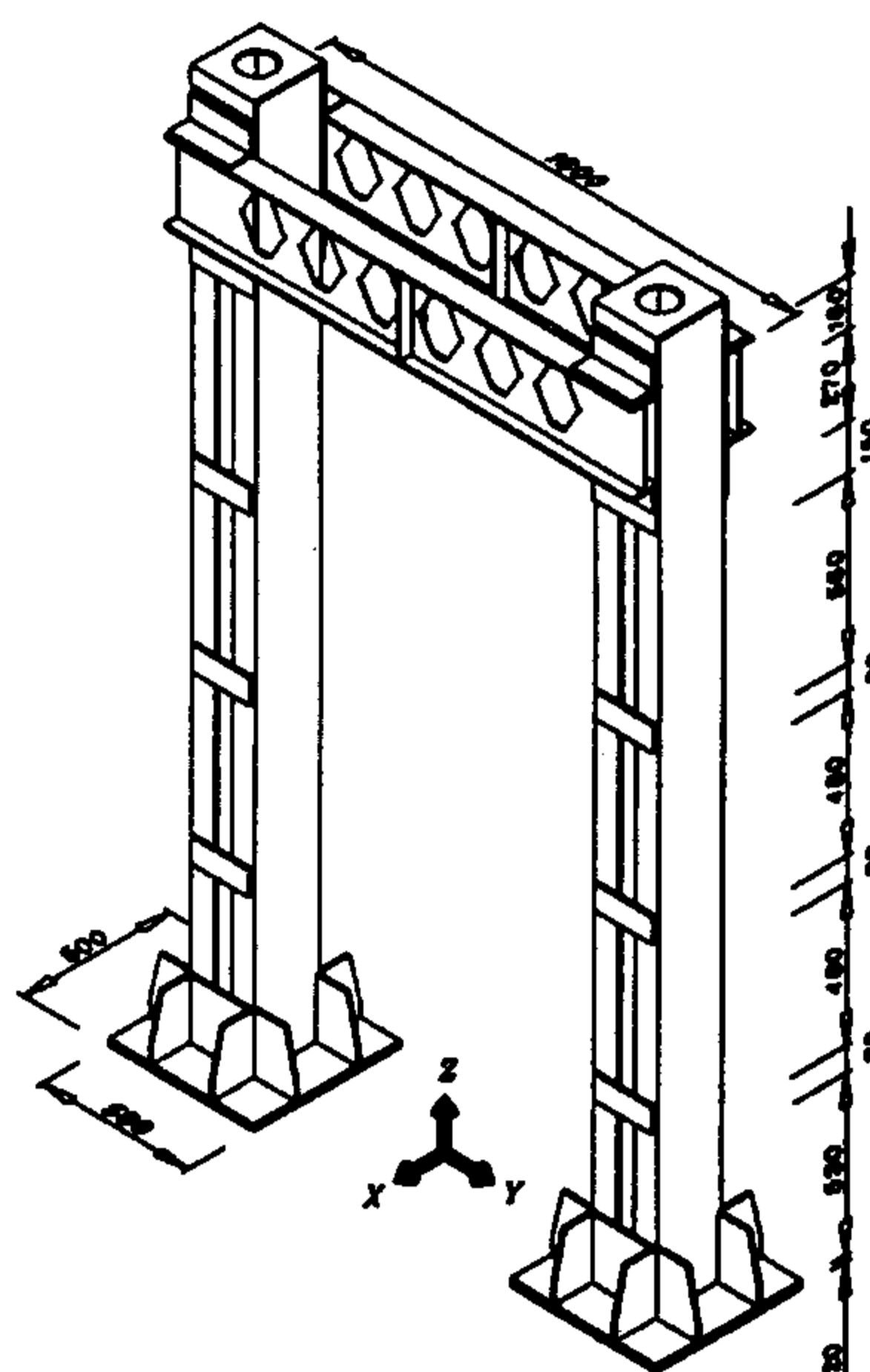
شکل ۲: نمونه‌ای از مشخصات تیر لانه زنبوری مورد مطالعه در قابها.

#### مجموعه B

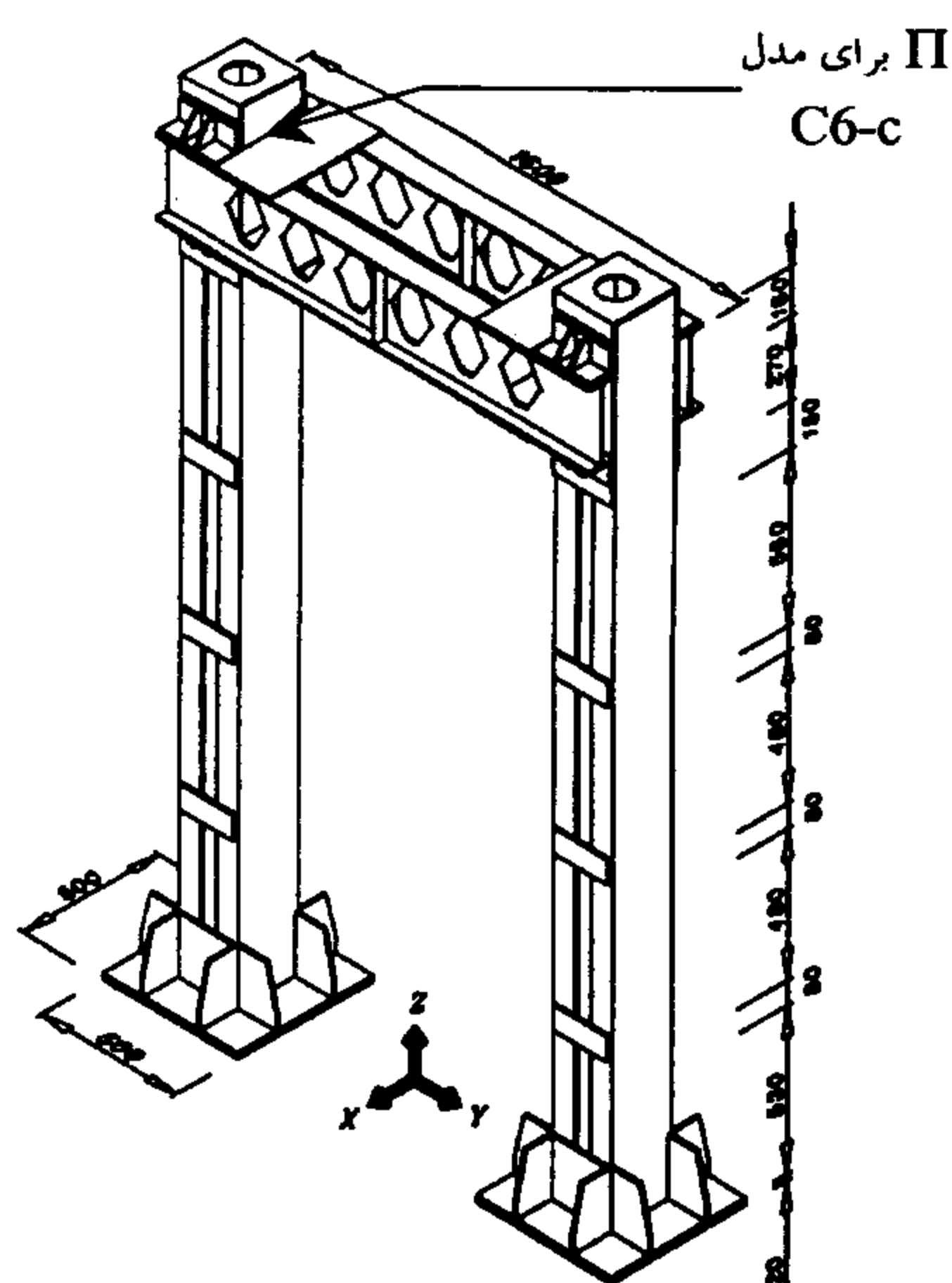
قابهای نمونه مجموعه B مطابق با مجموعه A اختیار گردیده اند، با این تفاوت که ستونهای مجموعه B از نوع دابل ناودانی تسمه دار با فاصله ای طراحی گردیده است که گشتاور اینرسی ظاهری یکسانی با ستون های مدل‌های مجموعه A داشته باشد. شکل (۳) نمونه ای از قابهای مورد نظر را نشان می دهد. طراحی اتصال تیر به ستون و ورق پوششی ستون در محل اتصال از نوع پیچی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های آزمایش به همین شکل طراحی گردیده اند و در نظر است

جانبی پیچشی جان، دو حالت با سخت شوندگی تنجشی نسبتاً کم (شکل ۵-الف) و نسبتاً قابل ملاحظه (شکل ۵-ب) مورد مطالعه قرار داده شده اند. رفتار مصالح به صورت نشان داده شده در (شکل ۵-الف) را می توان حالت ایده آل سازی شده رفتار مصالح به صورتی که طی آزمایشات گزارش شده در مرجع [۵] از قرائت های کرنش سنج ها حاصل گردیده است، تلقی نمود. باید به این نکته توجه داشت که بسیاری از مواضع بحرانی در تیرهای لانه زنبوری تنشهای پس ماند ناشی از نورد، برش و جوشکاری را تجربه می نمایند. میانگین ایده آل سازی شده منحنی تنش-کرنش حاصل از نتایج ۶ آزمایش کوپن کششی انتخاب شده از مصالح تیرهای لانه زنبوری آزمایش شده (مرجع ۵) در شکل (۵-ج) ارائه گردیده است. آنالیزهای اولیه به دلایل زیر نشان دهنده عدم حصول به نتایج واقعگرایانه کمی با استفاده از مدل مصالح حاصله از نتایج آزمایش کششی تک محوری بوده است و بار حدی محاسبه شده با استفاده از این مصالح به مقدار قابل ملاحظه ای (در حدود ۲۳٪) از نتایج آزمایش (نمونه A12) کمتر حاصل گردید. گرچه در همین مدل نیز ظرفیت باربری با بروز پدیده کماتش جانبی - پیچشی الاستوپلاستیک جان کنترل گردید. در واقع به دلیل بروز تمرکز تنش، وجود تنشهای پس ماند ناشی از نورد، برش و جوشکاری، ماهیت دو محوری غالب تنشها در جان، اثر پلاستیسیته محصور موضعی در بدنه الاستیک، اثرات غالب سخت شدگی کرنشی در مواضع تمرکز تنش و بروز پلاستیسیته محصور و مقاطع تحت تاثیر برش فزاینده، نتایج تحلیل مبتنی بر نتایج آزمایشهای کوپن کششی تک محوری تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشها نداشته اند. اثر غالب سخت شدگی کرنشی در جان تیرهای لانه زنبوری در رژیم ماورای الاستیک در مرجع ۲۴ نیز مورد تاکید قرار داده شده است. الگوهای تنش پس ماند تیرهای لانه زنبوری توسط نگارنده اول تعیین و اندازه گیری شده است. در واقع با توجه به الگوی تنش های پس ماند و عوامل مذکور در فوق، در مواضع مختلف تیر، رفتار متفاوتی (با سیلان زودرس یا متاخر) از نظر عملکرد مصالح مشهود است ولی در مطالعات حاضر، تعریف خواص مصالح متفاوت برای اجزاء محدود متفاوت در

هم محور مورد بررسی قرار داده شده اند.



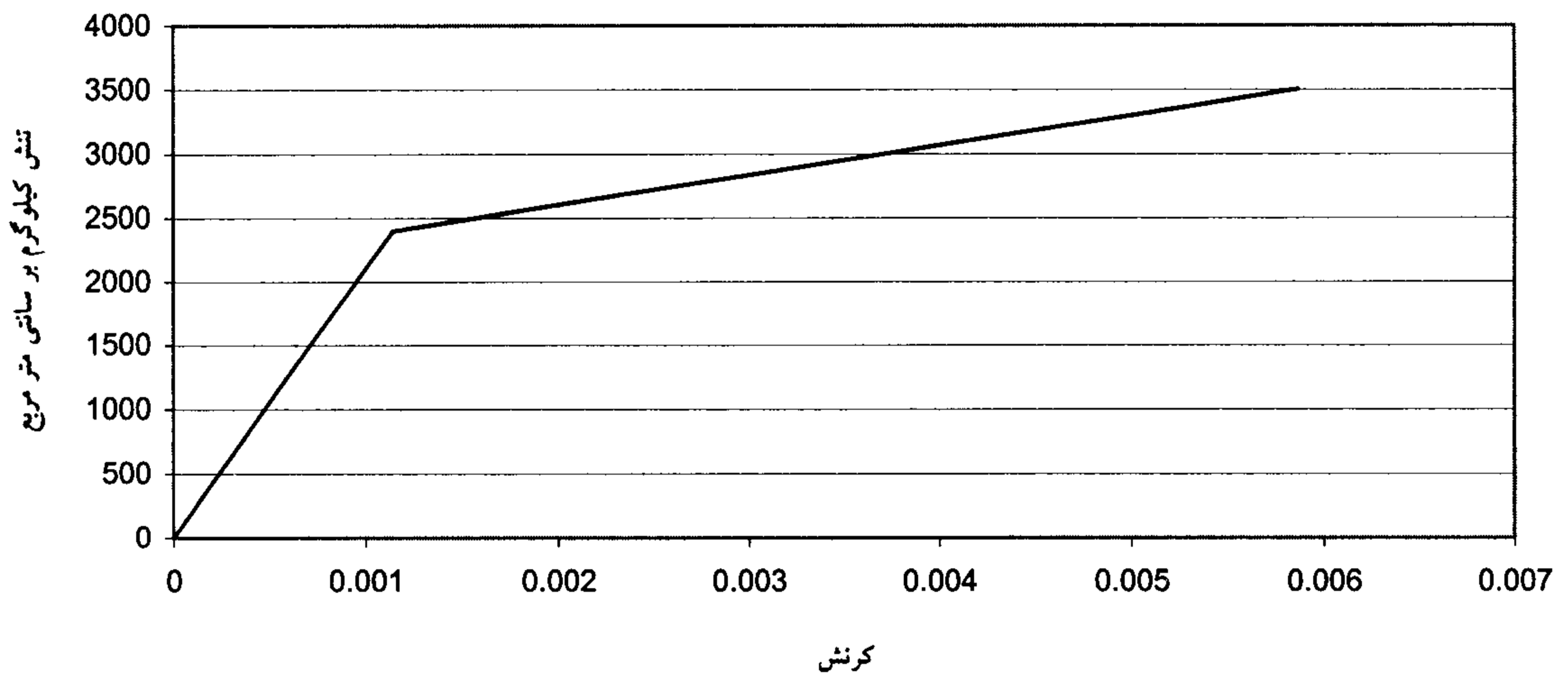
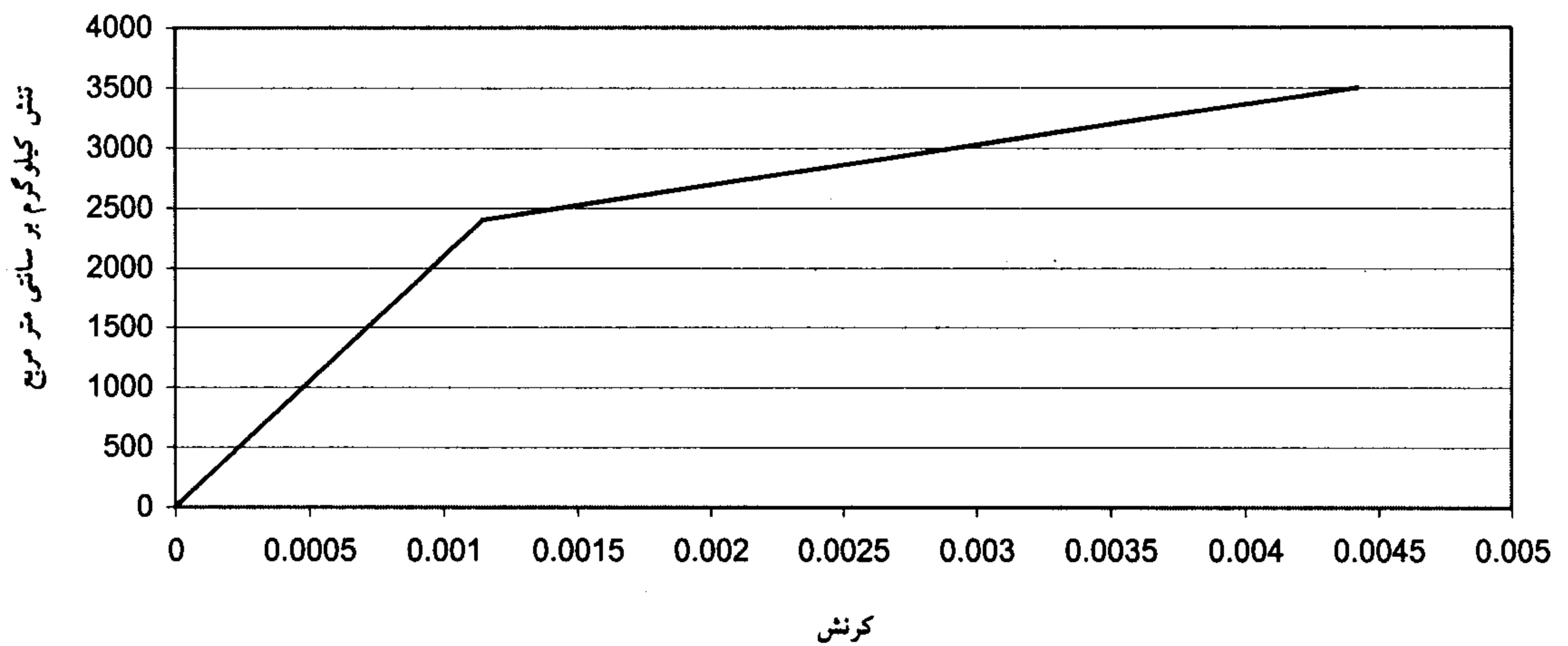
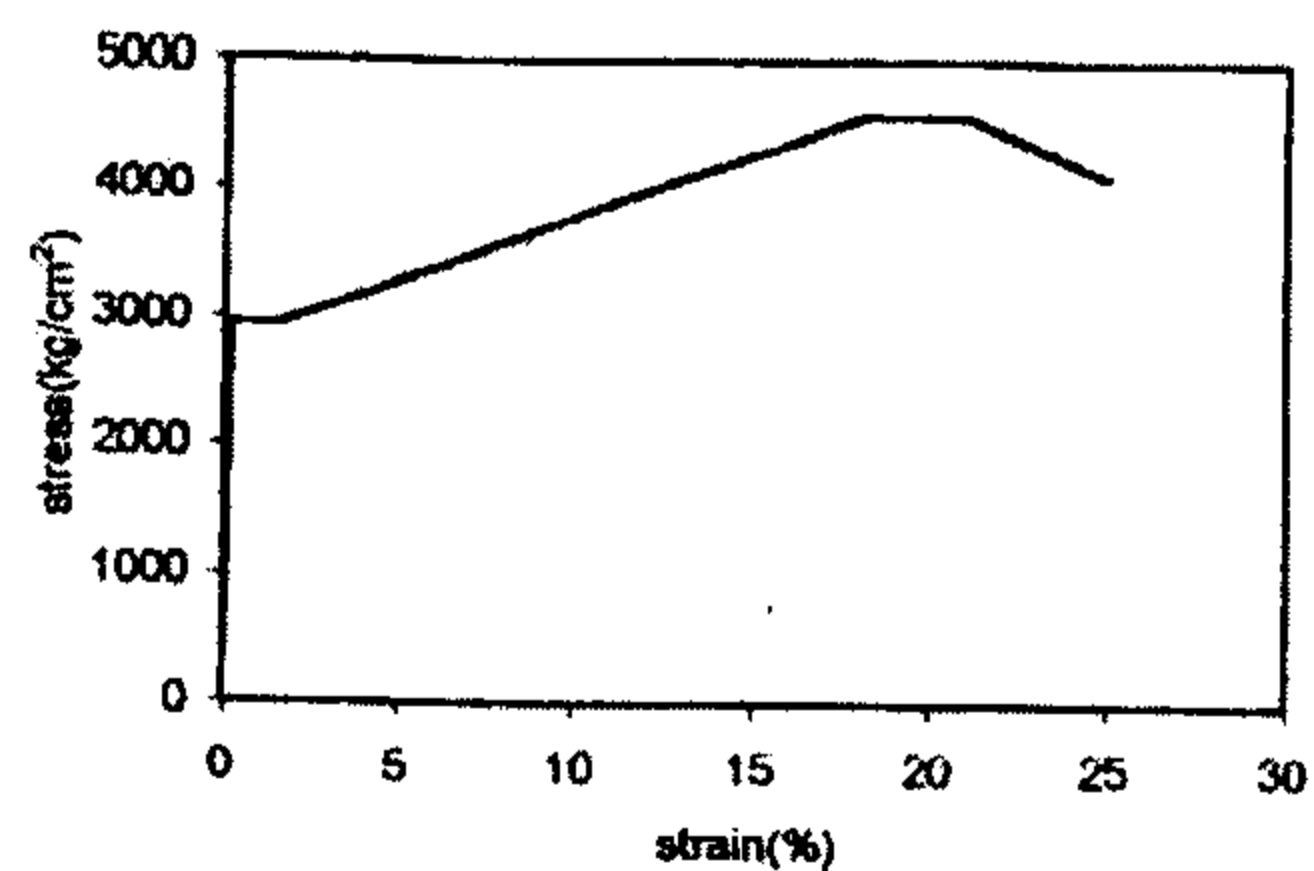
الف - با اتصال خرجینی متداول



ب - با اتصال خرجینی تقویت شده  
شکل ۴: نمونه هایی از قابهای مجموعه C.

## مشخصات مصالح

مشخصات مصالح به صورت دوخطی تعریف گردیده است که شامل خط الاستیک و خط الاستوپلاستیک با سخت شوندگی تنجشی ثابت می باشد. شکل (۶) تغییرات تنش - تنجش دو خطی را برای مصالح ایده آل سازی شده نشان می دهد. به منظور مطالعه اثرات ایزوله میزان سخت شوندگی تنجشی، بر ظرفیت کماتش

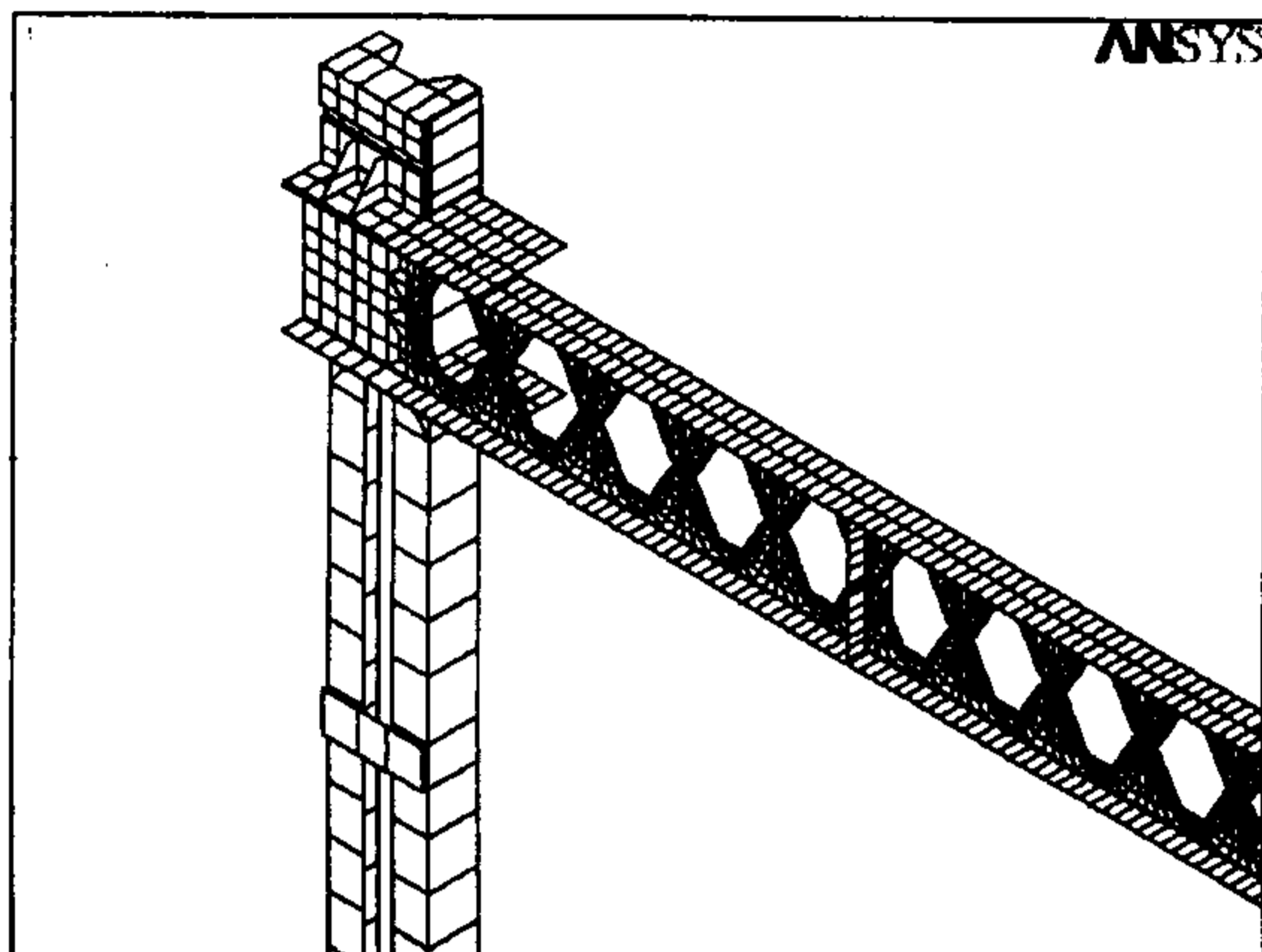
الف - مدل مصالح I ( $E_t = 2.33 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ )ب - مدل مصالح II ( $E_t = 3.36 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ )

ج - مدل مصالح براساس میانگین ایده آل سازی شده ۶ آزمایش کوپن کششی (از مصالح نمونه های آزمایش شده)

$$F_u = 4570 \text{ Kg/cm}^2 - F_y = 2940 \text{ Kg/cm}^2 - E_t = 9870 \text{ Kg/cm}^2 - E = 2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$v = 0.3 - F_y = 2400 \text{ Kg/cm}^2 - E = 2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

شکل ۵: معرفی مدل مصالح به کار رفته در تحلیلها.



شکل ۸ - ب: بخشی از مدل اجزاء محدود قاب C-10c.

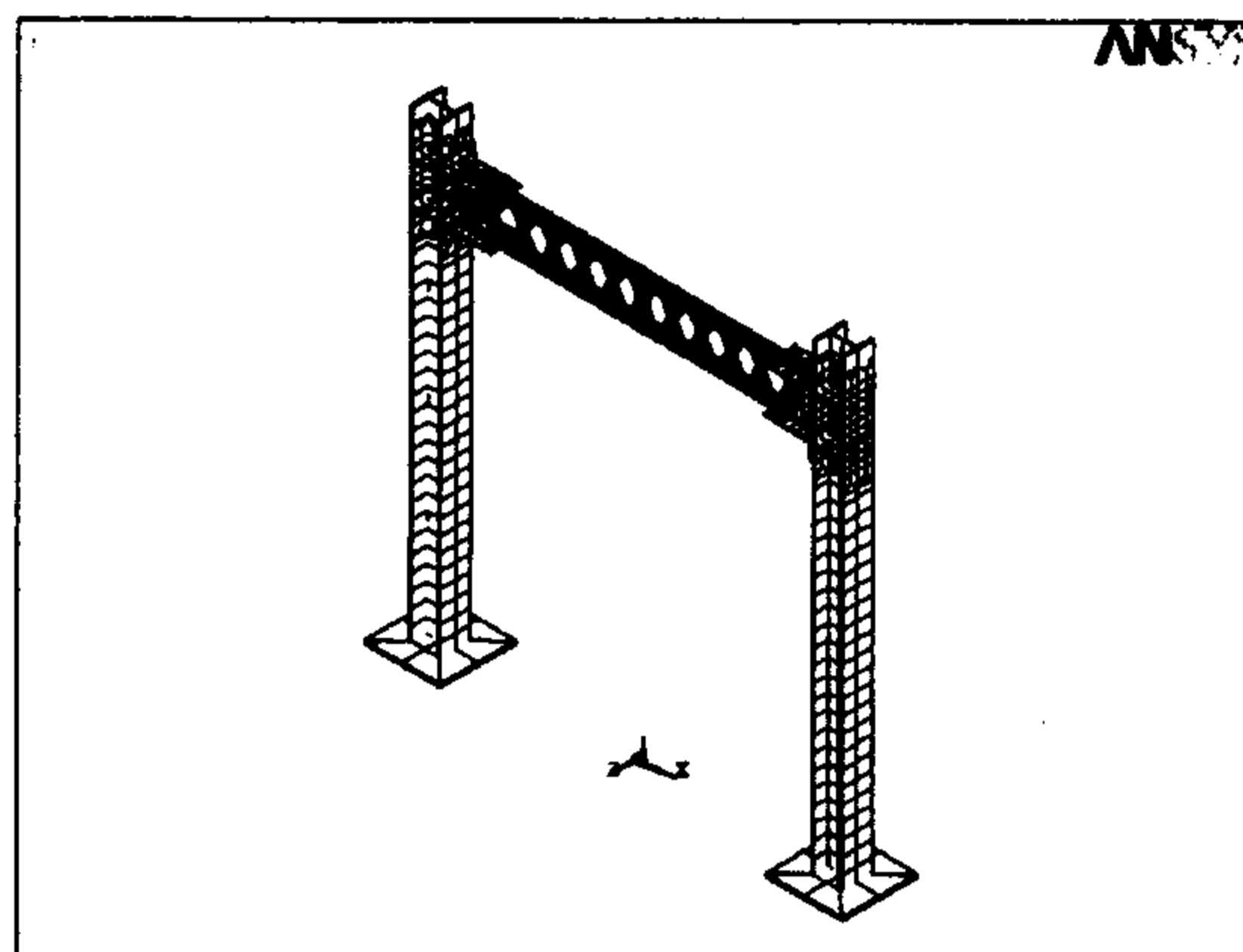
### مدلسازی اجزاء محدود

برای مدلسازی اجزاء محدود کوشش به عمل آمد که در مواضع تمرکز تنش و همچنین مواضع بروز کماتش، شبکه های اجزاء محدود متناسباً ریز شده و مدل تفصیلی نمایشگر جزئیات نمونه های مورد مطالعه باشد. به منظور بررسی کماتش جان، مدل سه بعدی کامل قابهای مجموعه های A و B تشکیل داده شد. بالهای قابهای این دو مجموعه دارای تکیه گاه جانبی میباشند و لذا کماتش جانبی پیچشی کلی تیر امکان وقوع نخواهد یافت. بال و جان تیر لانه زنبوری و بال و جان ستونها و تسمه ها با اجزاء محدود صفحه - پوسته ای ۸ گرهی ایزوپارامتریک مدل سازی گردیده اند. با توجه به تعداد زیاد درجات آزادی حاصله در محل جوشها، درجات آزادی صفحات متصل شونده به یکدیگر وابسته گردیده است. همچنین اتصالات پیچی به این ترتیب مدل سازی گردیده اند که گویی در محل پیچها همسازی کامل بین درجات آزادی مربوطه برقرار است. به منظور جلوگیری از عبور غیرواقعی اجزاء محدود نمایشگر اجزاء صفحات در تماس با یکدیگر، از اجزاء محدود تماسی (فاقد قابلیت انتقال کشش) در این مواضع استفاده شده است.

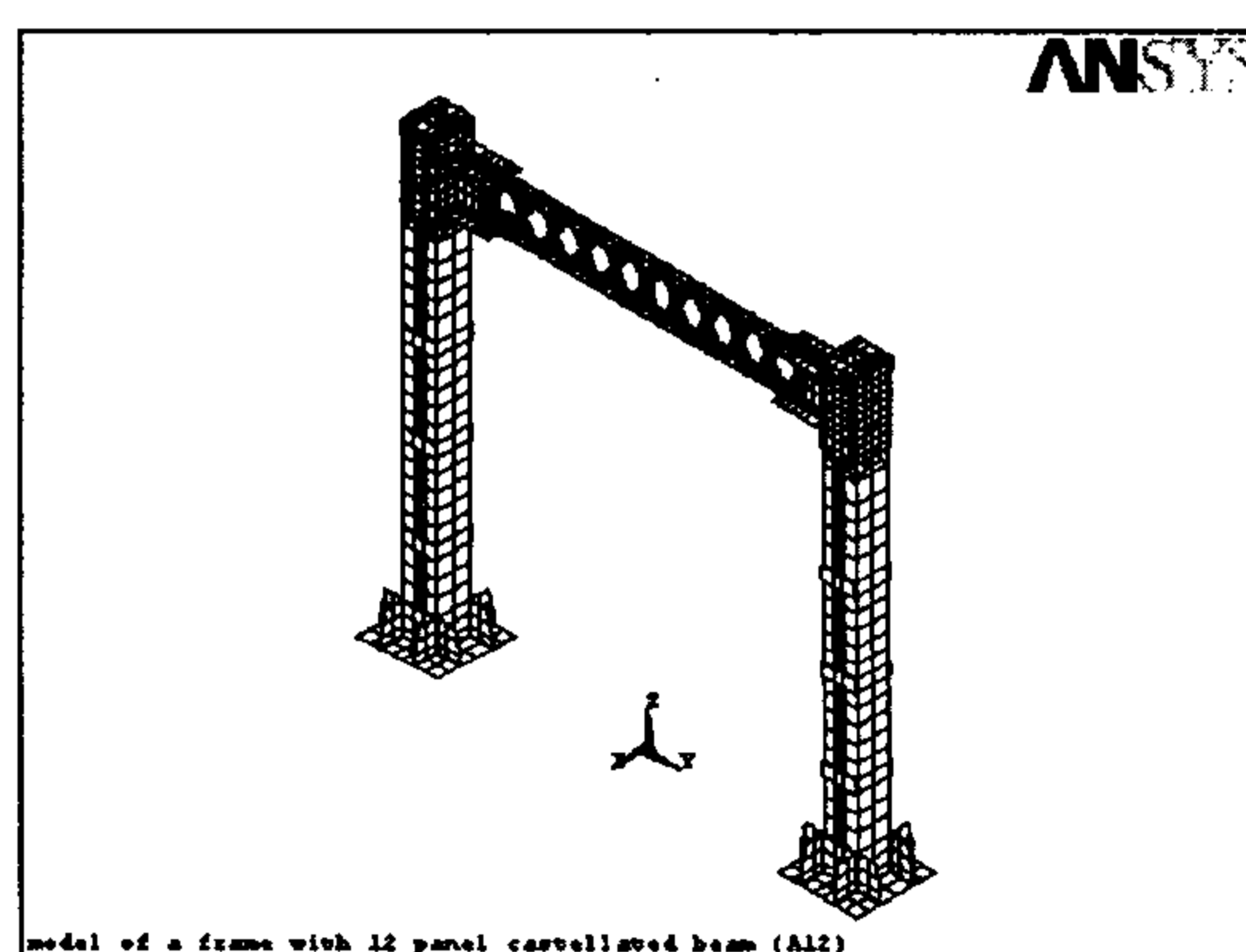
در مورد مدل C با توجه به آن که جان و بال تیرها در صفحه تقارن واقع نمی گردند، میتوان از تقارن بهره گرفت و تحلیل را برای نیمی از مدل انجام داد.

### تحلیل اجزاء محدود

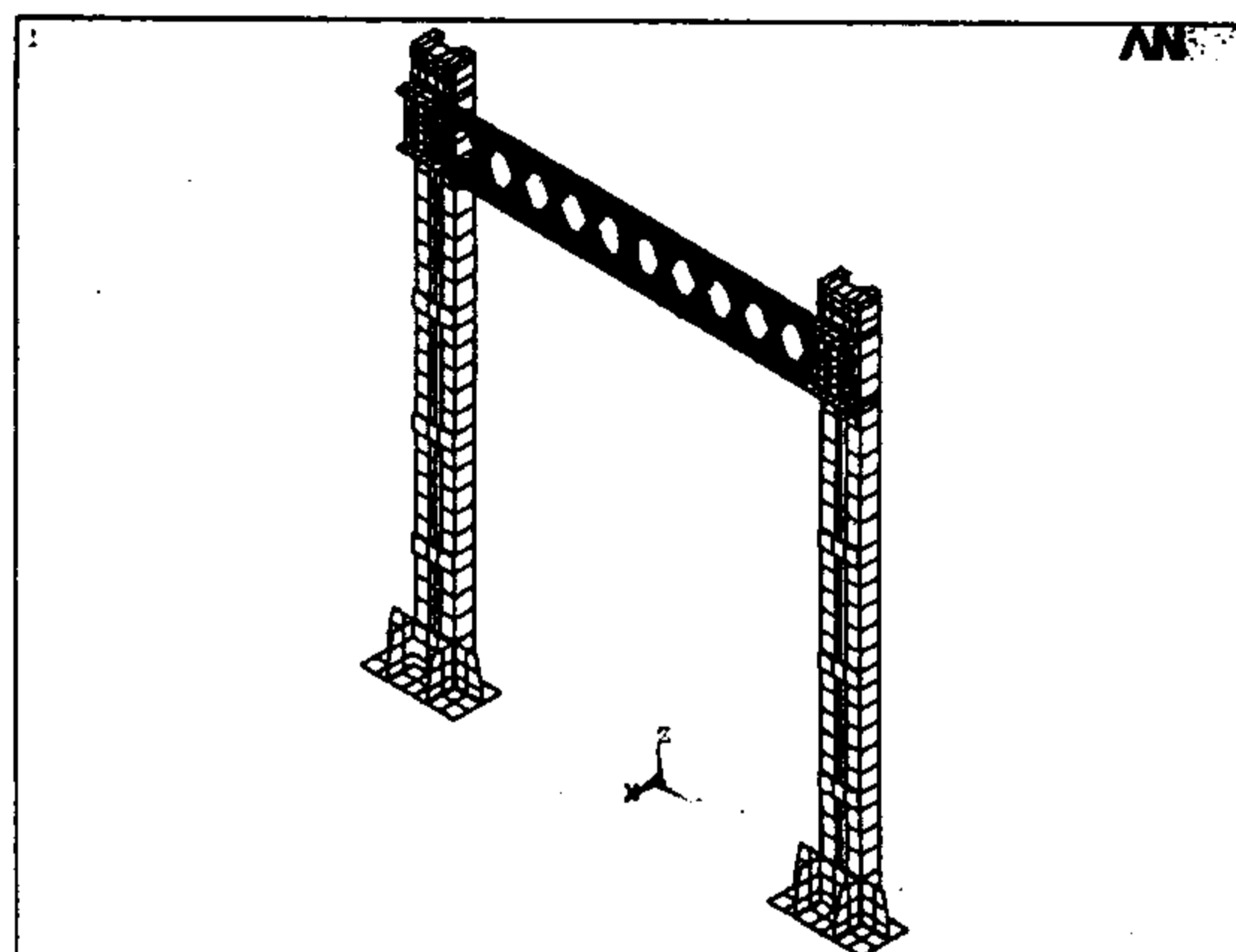
به منظور تحلیل اجزاء محدود غیر خطی، با در نظر گرفتن اثرات توأم غیر خطی هندسی و مصالح، از



شکل ۶: نمونه ای از مدل اجزاء محدود مورد استفاده در مجموعه قابهای A.



شکل ۷: نمونه ای از مدل اجزاء محدود مورد استفاده در مجموعه قابهای B.



شکل ۸ - الف: مدل اجزاء محدود قاب C10-a.

مواضع مختلف تیر مورد نظر نبوده است بلکه در اینجا کوشش به عمل آمده است با مشخصات ایده آل سازی شده مصالح واحدی به نتایج واقعگرایانه چه از نظر ارائه پدیده های رفتاری و چه از نظر دقت تخمین بارهای حدی و ویژگیهای تغییر شکل مجموعه دست یابیم.

جدول ۱: مشخصات مدلها و تحلیلها برای مجموعه های A و B.

نام تحلیل	نوع مصالح		تعداد درجات آزادی	نام مدل	نوع ستون	تعداد مدول های تیر لانه زنبوری با احتساب سوراخهای پر شده انتهایی در طرفین تیر	نوع مدل
	نوع I: $E = 2/1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $E_t = 2/33 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	نوع II: $E = 2/1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $E_t = 3/36 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$					
A6-I A6-II	I II		۳۷۳۱۴	A6	مقطع معادل IPB180 ساخته شده با ورق	۶	مجموعه A
A8-I A8-II	I II		۴۴۱۹۰	A8	،	۸	
A10-I A10-II	I II		۵۰۸۹۸	A10	،	۱۰	
A12-I A12-II	I II		۵۷۶۰۶	A12	،	۱۲	
B6-II	II		۴۹۶۲۶	B6	ستون دوبر ناودانی تسمه دار	۶	مجموعه B
B8-II	II		۵۵۲۳۰	B8	،	۸	
B10-II	II		۶۰۸۳۴	B10	،	۱۰	
B12-II	II		۶۶۴۳۸	B12	،	۱۲	

### شبکه بندی اجزاء محدود

شکلهای (۶) و (۷) نمونه هایی از شبکه بندی اجزاء محدود اختیار شده را برای مدلها A12 و B12 نمایش می دهند، همچنین شکلهای (۸-الف و ب) شبکه های اجزاء محدود نمایشگر مدلها C10-a و C10-c ارائه می نمایند در مدلها اخیر الذکر، با استفاده از تقارن، نیمی از مجموعه قاب و تیرهای خرجینی مدل سازی گردیده است.

### نتایج تحلیل

#### مجموعه های A و B

در ارتباط با مجموعه های نمونه های A و B، در

برنامه ANSYS استفاده گردیده است. به منظور از دست ندادن دقت و نیل به رفتار واقعی (مشاهده شده در آزمایشهای قبلی مالک [۱] و مالک و محمودیان [۸] و مالک و وثوق [۵])، لازم بود از گامهای بارهای افزایشنده بالنسبه بسیار کوچکی استفاده گردد، در غیر اینصورت نتایج تحلیل قادر به ارائه مد صحیح کمانش و ظرفیت نهایی قابها در حدود میزان قابل قبول از دیدگاه عملی نمی گردید.

### خلاصه مشخصات مدلها

در جدول (۱) و (۲) خلاصه مشخصات مدلها ارائه

گردیده است.

جدول ۲: مشخصات مدلها و تحلیلها برای مجموعه های قابهای C.

نام تحلیل	نوع مصالح	نام مدل	تعداد درجات آزادی	نوع اتصال	نوع ستون	تعداد مدول های تیر لانه زنبوری از بر ستون تا بر ستون	نوع مدل
C6 - a - I C6 - a - II	I II	C6-a	۶۷۲۵۶	خرجینی متداول	دوبل ناودانی تسمه دار	۶	مجموعه C
C6 - b - I C6 - b - II	I II	C6-b	۶۷۵۴۵	خرجینی تقویت شده بالچکی و ورق های فوقانی و تحتانی	دوبل ناودانی تسمه دار		
C6 - c - I C6 - c - II	I II	C6-c	۶۷۵۴۵	مانند بالا ولی با برقراری اتصال بین نبشی ها و ورق های فوقانی و تحتانی	دوبل ناودانی تسمه دار		
C10 - a - I C10 - a - II	I II	C10-a	۹۵۶۷۲	خرجینی متداول	دوبل ناودانی تسمه دار	۱۰	
C10 - c - I C10 - c - II	I II	C10-c	۹۷۴۵۶	خرجینی تقویت شده بالچکی و ورق های فوقانی و تحتانی با تامین اتصال بین نبشی ها و ورق ها	دوبل ناودانی تسمه دار		

سیستم موجود خواهد بود.

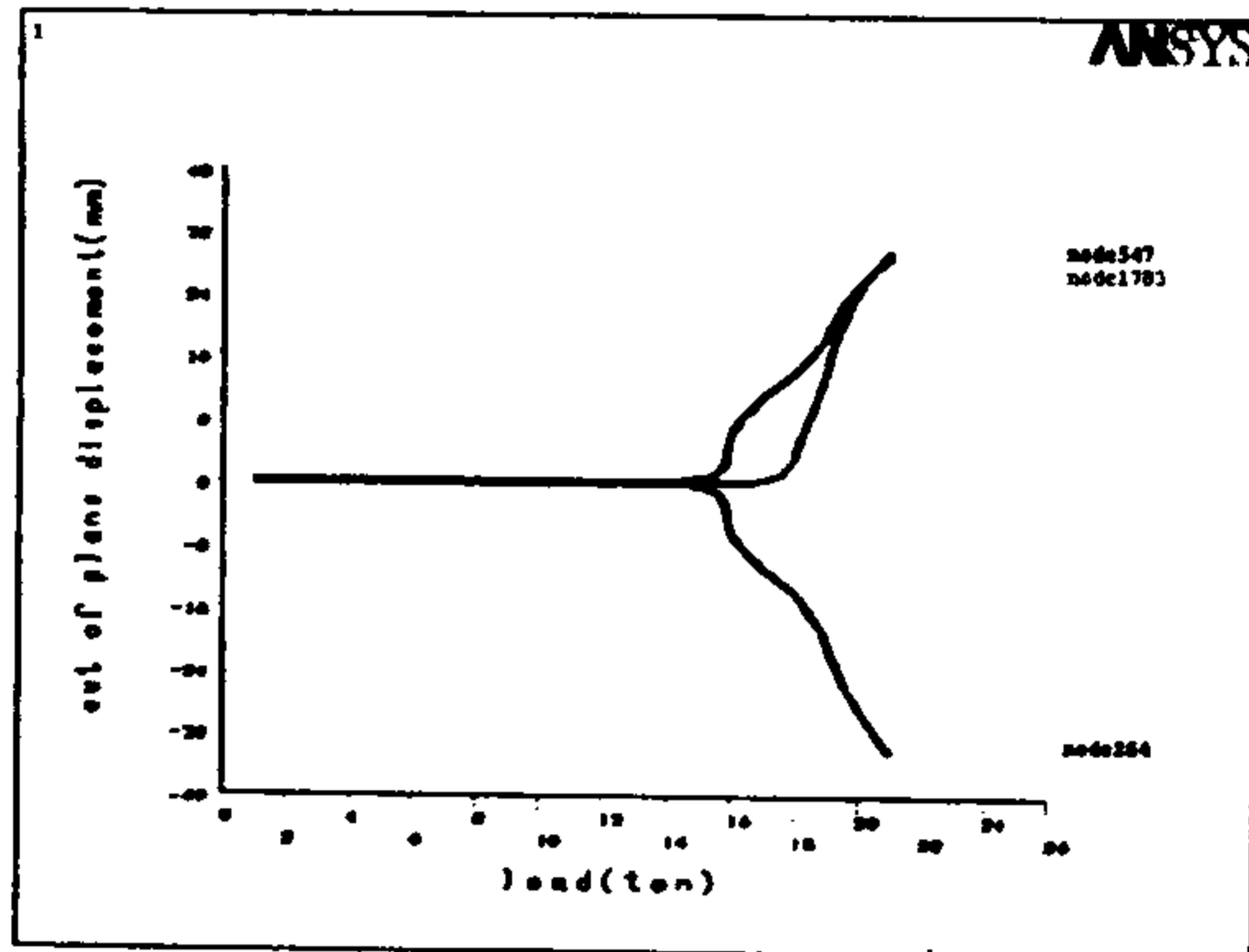
#### مجموعه مدلهای A

شکل (۹ - الف و ب) حالت تغییر شکل یافته قاب و جان کمانش یافته را به عنوان حاصل تحلیل های A6-I و A10-I نمایش می دهد به طوری که در شکل (۹ - الف) مشخص می گردد، کمانش جانبی پیچشی جان پس از بروز در یک عضو قائم بحرانی جان بلافاصله و متعاقباً در کلیه اعضاء قائم جان در نیمه بحرانی تیر بروز می نماید. شکل تغییر مکان یافته بزرگنمایی شده تیر، نمایشگر تشکیل مکانیسم ویرندیلی می باشد. در شکل (۱۰) بردارهای تنش های اصلی تیر لانه زنبوری

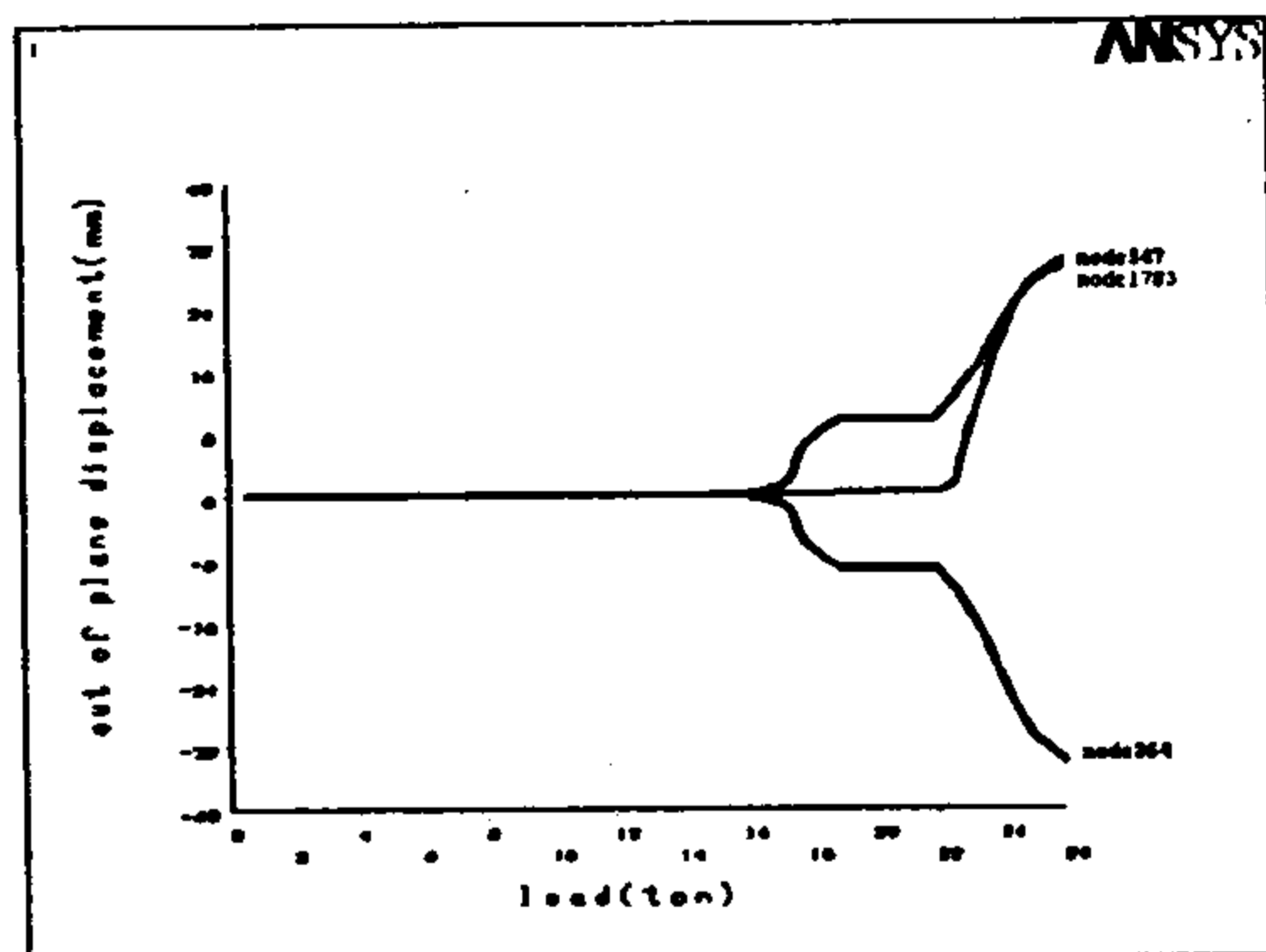
مدلهای A8 و A10 و A12 و همچنین B8 و B10 و B12 در کلیه تحلیل ها پس از بروز پلاستیسیته گسترده، کمانش جانبی پیچشی جان، ظرفیت باربری قاب را کنترل می نماید. این پدیده در حالت کمانشی الاستوپلاستیک پس از گسترش پلاستیسیته حادث می گردد. معذک در مورد مدل های A6 و B6 در کلیه تحلیل ها (A6-I, A6-II, B6-II) پس از بروز کمانش جانبی پیچشی تنها عضو قائم جان فیما بین دو سوراخ موجود در نیمه بحرانی تیر (که در آن نیمه اثرات برش ناشی از بارهای قائم و افقی به طور متزاید ترکیب می گردد)، در واقع مسأله به تیر سوراخداری با سوراخی بزرگتر از سوراخهای اولیه تبدیل می گردد و لذا قابلیت جذب بار بیشتر همچنان در



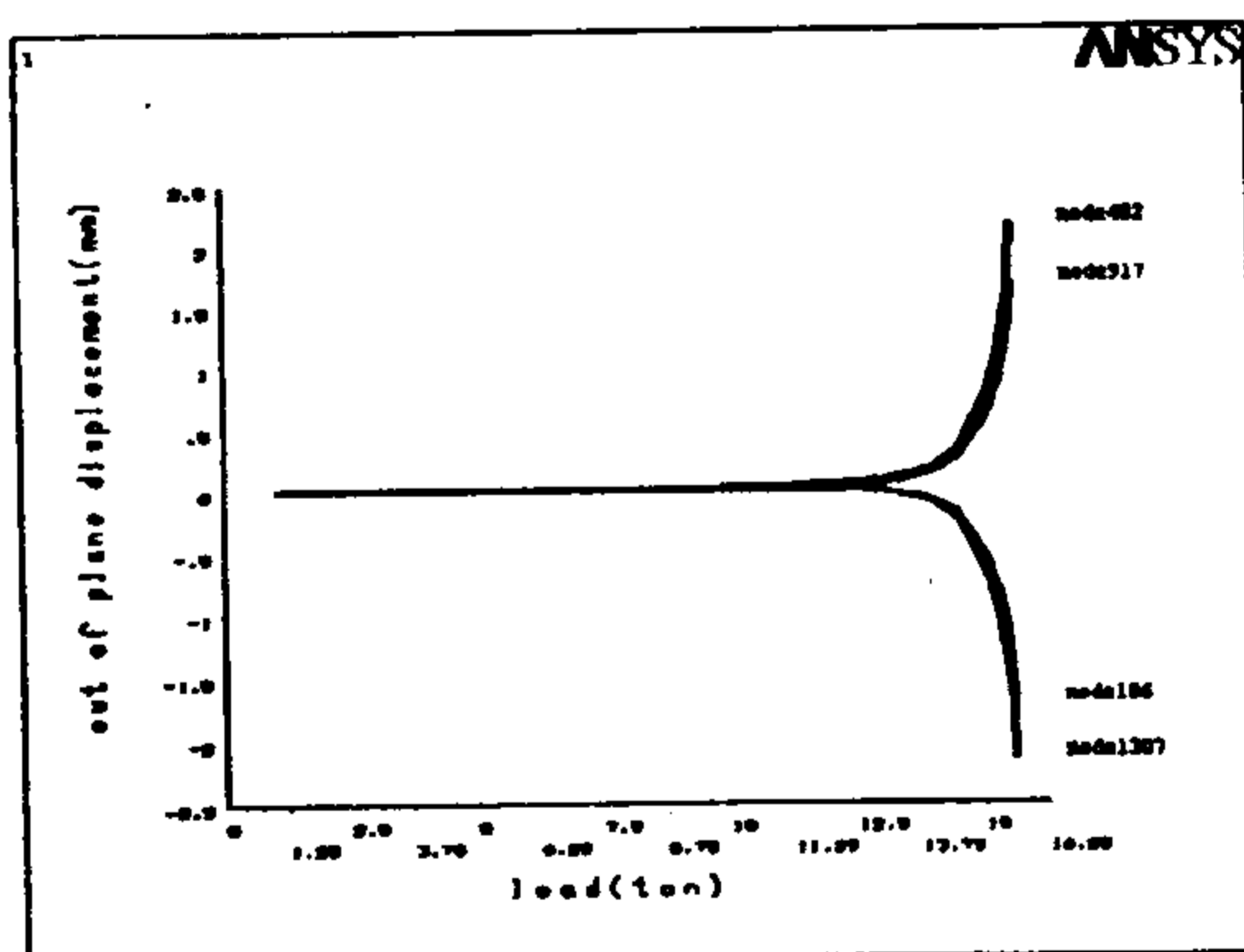
منحنی های بار- تغییر مکان خارج از صفحه جان در موضع کمانش در عضو قائم جان بحرانی در شکل (۱۱) برای تحلیلهای A6-I, A6-II و همچنین A8-I نشان داده شده اند. از مقایسه نتایج ، رفتار متمایز تیر دارای ۲ سوراخ در نیمه بحرانی با سایر تیرها به نحوی که در بالا ذکر شد، قابل تشخیص است. همچنین اثرات سخت شوندگی تنجشی بالاتر مدلهای دارای پسوند II بر بار بحرانی قاب از این منحنی ها استدراک می گردد.



شکل ۱۱ - الف : نمودار بار - تغییر مکان جانبی جان برای مدل تحلیل A6-I.

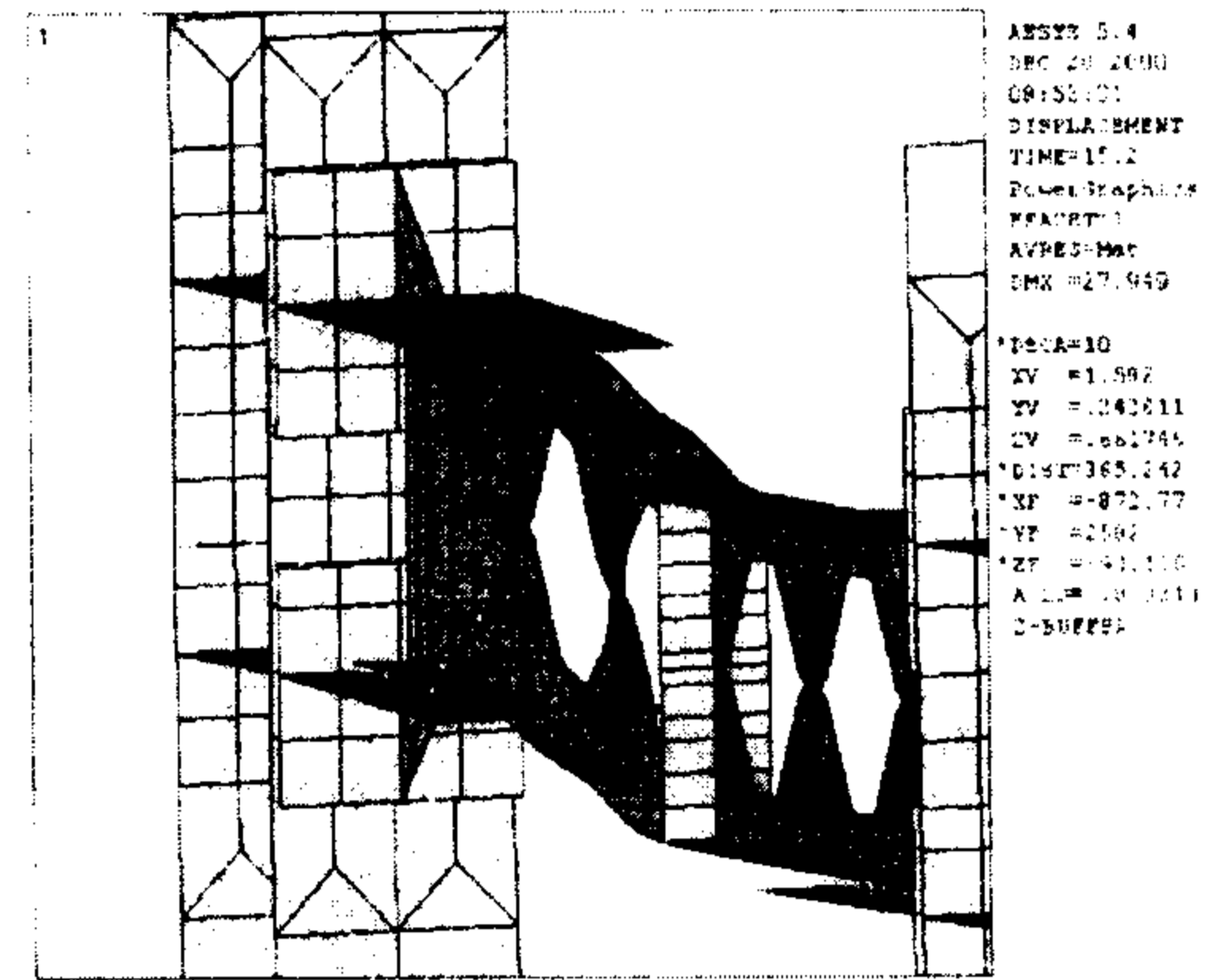


شکل ۱۱ - ب : نمودار بار - تغییر مکان جانبی جان برای مدل تحلیل A6-II.

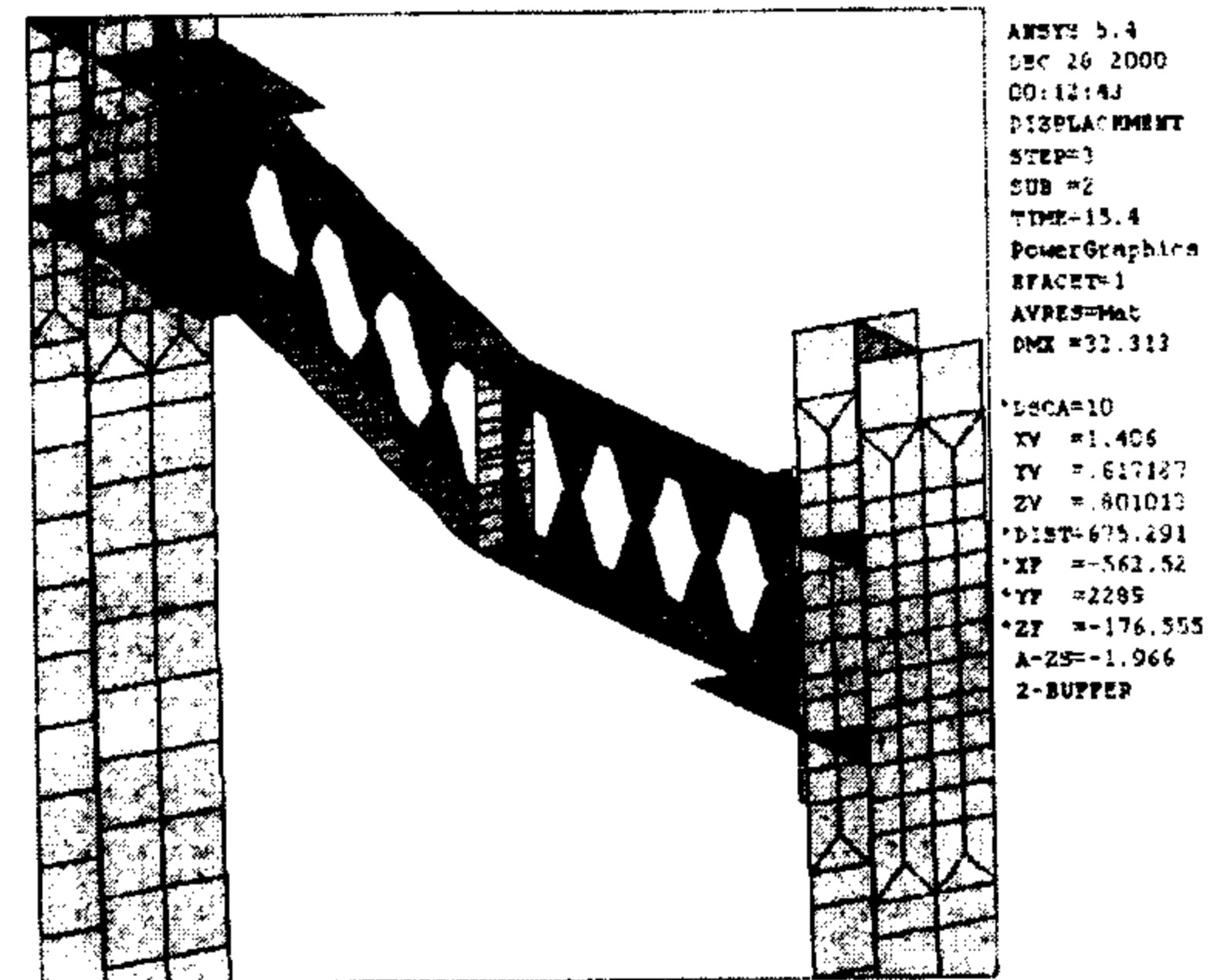


شکل ۱۱ - ج : نمودار بار - تغییر مکان جانبی جان برای مدل تحلیل A8-I.

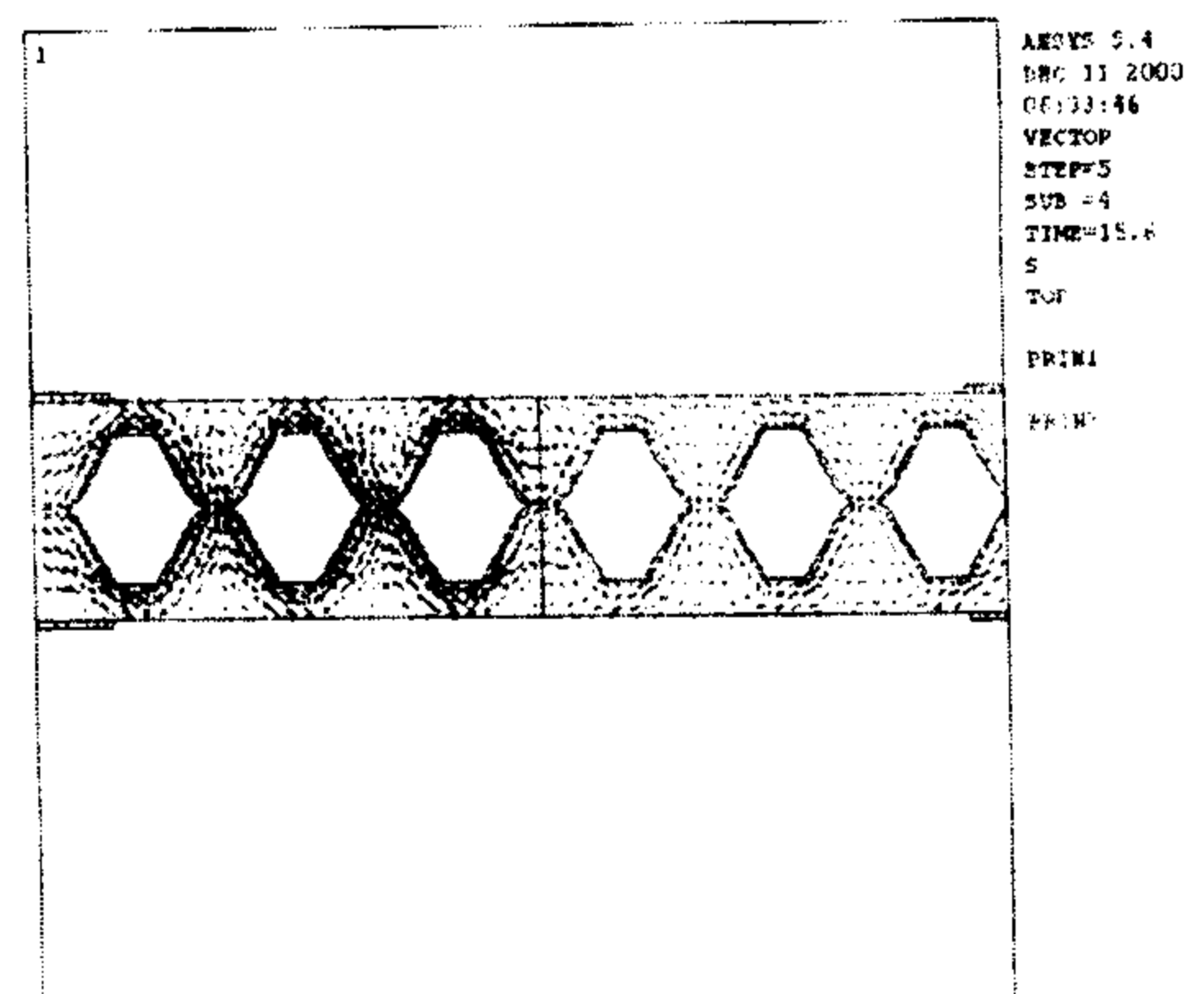
در تحلیل (A8-I) نشان داده شده است که حاکی از توزیع تقریباً مشابه تنش در جان نیمه بحرانی تیر عمدتاً در اثر حضور برش یکنواخت ناشی از ترکیب اثرات برش ناشی از بارهای قائم و افقی در این نیمه می باشد.



شکل ۹ - الف : حالت تغییر شکل یافته مدل تحلیل A6-I پس از بروز کمانش جان.



شکل ۹ - ب : حالت تغییر شکل یافته مدل تحلیل A10-I پس از بروز کمانش جان.



شکل ۱۰ : بردار تنش های اصلی حاصله در مدل تحلیل A8-I.

جدول ۴: نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های سری B.

نام تحلیل	شروع سیلان F(تن)	بار پلاستیسیته گسترده F(تن)	بار شروع کمانش F(تن)	بار نهایی F(تن)
B6_II	۴/۸	۸/۸	۱۶/۱	۲۵/۶
B8_II	۵	۹/۲	۱۴/۴	۱۷/۱
B10_II	۵/۲	۹/۶	۱۴/۱	۱۷/۰
B12_II	۵/۴	۱۰/۱	۱۳/۸	۱۶/۹

نتایج تحلیل مجموعه مدل‌های C

مقایسه اشکال تغییر مکان بزرگنمایی شده حاصل از تحلیل‌های C10-a و C10-c (شکل‌های ۱۴ و ۱۵) نشان دهنده بروز کمانش جانبی پیشگی کلی در تیر خرچینی در حالت استفاده از اتصال خرچینی متداول می باشد، حال آنکه در اتصال تقویت شده، در تیر با طول مورد بحث، از کمانش جانبی پیشگی کلی تیر ممانعت به عمل آمده و خرابی به صورت کمانش جان وتشکیل مکانیسم ویرندیلی صورت گرفته است.

در مورد مدل های C6 به دلیل کوتاهی تیر، تمایل به بروز کمانش جانبی پیشگی کلی کمتر است. ولی به طور تقریباً همزمان با کمانش کلی، کمانش جان در محل اتصال وکمانش جانبی پیشگی عضو قائم جان آغاز می گردد (شکل ۱۶).

در مدل‌های دارای ورق های فوقانی و تحتانی C6\_b کمانش جانبی - پیشگی کلی تیر محذوف شده است ولی کمانش موضعی جان در محل تکیه گاه وهمچنین کمانش جانبی پیشگی اعضاء قائم جان در نیمه بحرانی تیر حادث گردیده است (شکل ۱۷).

در مدل های C6-c-I,II صرفاً کمانش جانبی پیشگی اعضاء قائم جان تیر لانه زنبوری رفتار بارز و مشخصی از خود نشان داده است واز کمانش کلی تیر ممانعت به عمل آمده وکمانش موضعی جان در محل اتصال نیز صرفاً پس از بروز کمانش جانبی پیشگی جان تیر آغاز گردیده است (شکل ۱۸).

همچنین باید توجه داشت که تغییرات جزئی بار در مرحله شروع تسلیم وبار متناظر بروز پلاستیسیته گسترده با افزایش طول تیر (دهانه قاب)، ناشی از کاهش میزان سهمی از برش کل بوده است که در اثر اعمال بار جانبی در تیر ایجاد می گردد. با افزایش طول تیر، میزان برش ناشی از بار جانبی کاهش می یابد.

نتایج در جدول (۳) خلاصه گردیده است. بار شروع سیلان در موضع جوش جان قرائت گردیده است و منظور از بار متناظر با پلاستیسیته گسترده، باری است که تحت اثر آن، پلاستیسیته در مقاطع قائم گذرنده از گوشه باز شوها در تمام ارتفاع مقطع T نفوذ کرده باشد.

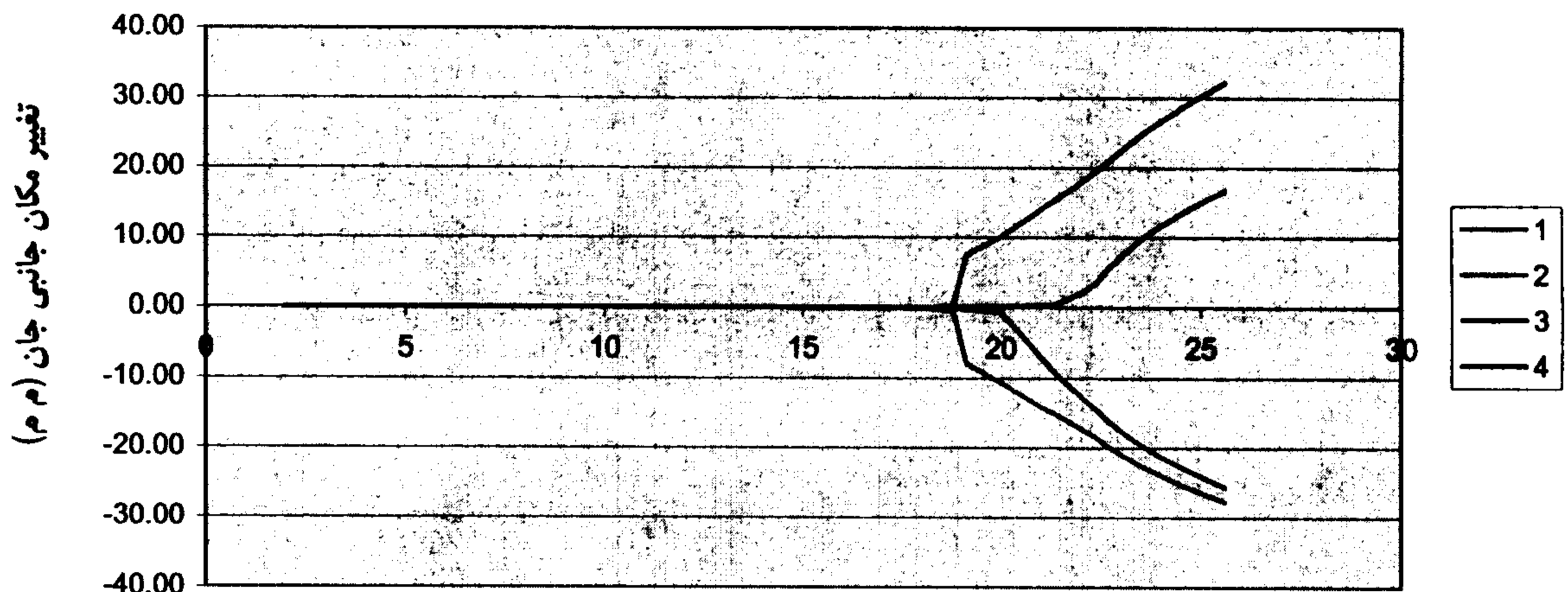
جدول ۳: نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های سری A.

نام تحلیل	شروع سیلان F(تن)	بار پلاستیسیته گسترده F(تن)	بار شروع کمانش F(تن)	بار نهایی F(تن)
A6_I	۵	۹/۱	۱۵	۲۱
A6_II	۵	۹/۱	۱۶/۲۵	۲۶
A8_I	۵/۲۵	۹/۶	۱۲/۸	۱۵/۶
A8_II	۵/۲۵	۹/۶	۱۴/۵	۱۷/۳۵
A10_I	۵/۵	۱۰	۱۲/۷	۱۵/۴
A10_II	۵/۵	۱۰	۱۴/۲	۱۷/۱
A12_I	۵/۷۵	۱۰/۵	۱۲/۶	۱۵/۱
A12_II	۵/۷۵	۱۰/۵	۱۴	۱۷

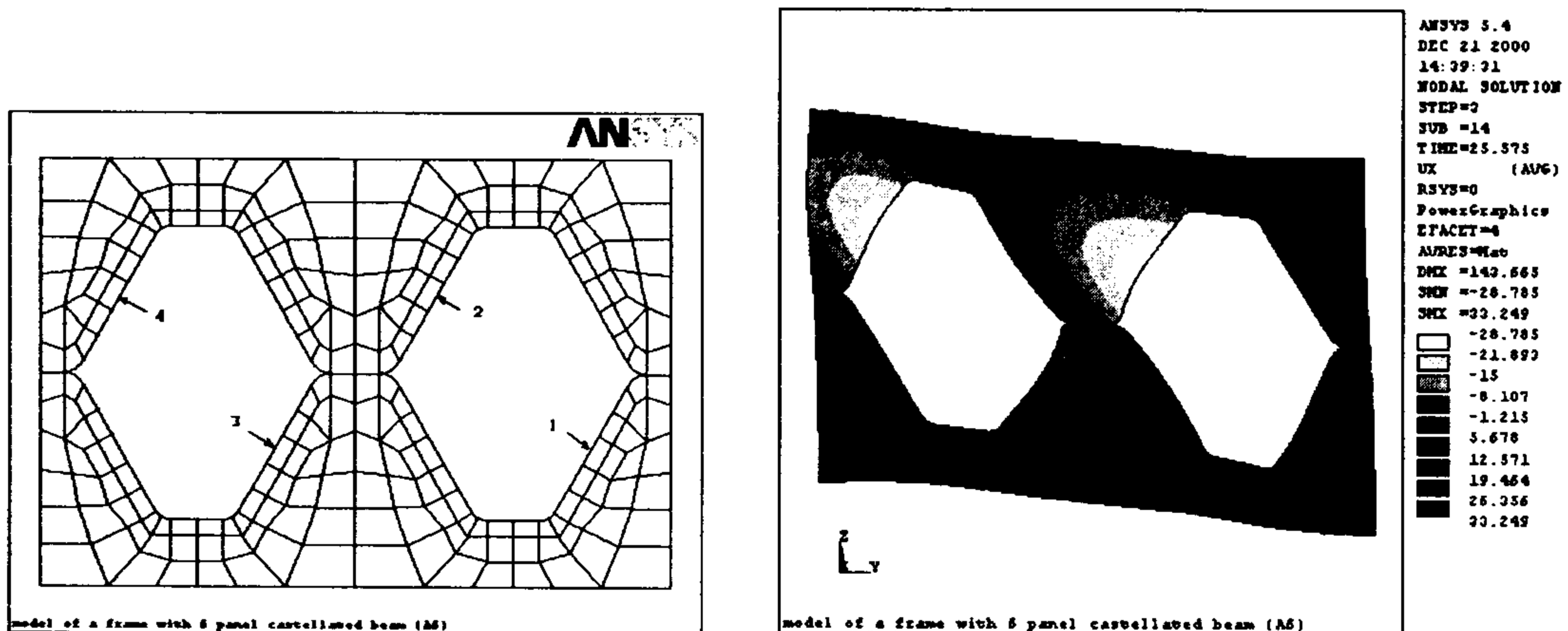
نتایج تحلیل مجموعه مدل‌های B

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نتایج منحنی های بار تغییر مکان خارج از صفحه جان را برای نقاط نشان داده شده در لبه سوراخ ها نشان می دهد. در همین اشکال، کانتور تغییر مکانهای جانبی تیر در جانهای کمانش کرده، در نیمه بحرانی تیر به نمایش گذاشته شده است.

جدول (۴) نتایج تحلیل این مجموعه را به صورت مقدار بار در مراحل شروع سیلان در موضع جوش جان، سیلان گسترده، شروع کمانش و همچنین بار نهایی حاصل از تحلیل ارائه می دهد.



بار (تن)



شکل ۱۲: نمودار بار - تغییر مکان جانبی جان برای نقاط شکل بالا (مدل تحلیل B6-II).

جدول (۵) نتایج حاصل از اجزاء محدود را با نتایج حاصل از آزمایش قبلی بر یک قاب متشکل از تیر لانه زنبوری انجام شده توسط مالک و وثوق [۵] ارائه می دهد که حاکی از تطابق قابل قبولی از نظر کمی و تطابق کامل رفتاری از نظر کیفی بین نتایج حاصل از اجزاء محدود و آزمایشهای انجام شده می باشد. به این ترتیب می توان به نحو قابل قبولی، از طریق مدلسازی تفصیلی اجزاء محدود، رفتار غیر خطی واقعی قابهای مورد مطالعه را تخمین زد.

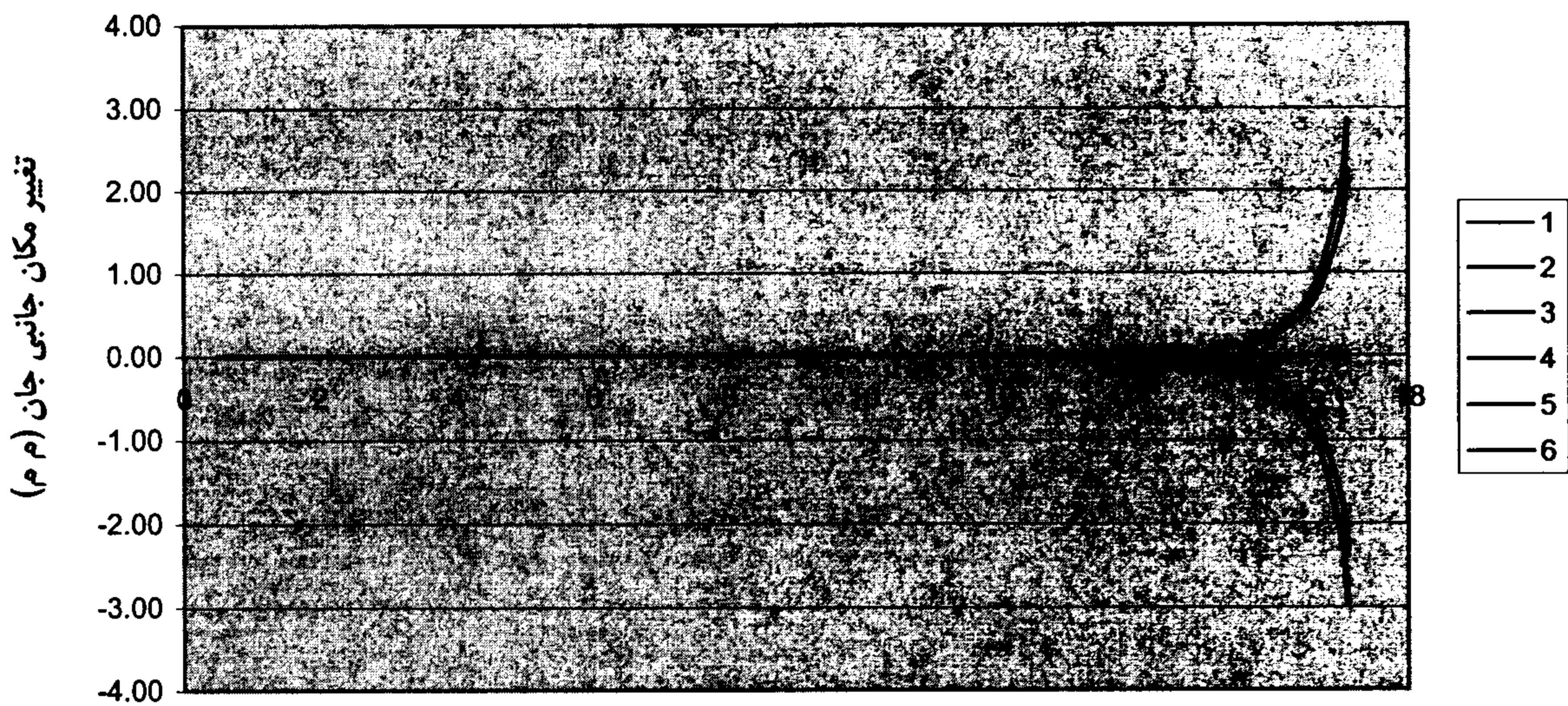
مقایسه نتایج حاصل از مجموعه مدل‌های A و مجموعه مدل‌های B

مقایسه نتایج حاصل از مجموعه مدل‌های A و مجموعه مدل‌های B نشان دهنده اثر تغییر شکل‌های موسوم به برشی در ستونهای تسمه دار خواهد بود. منحنی نمایش

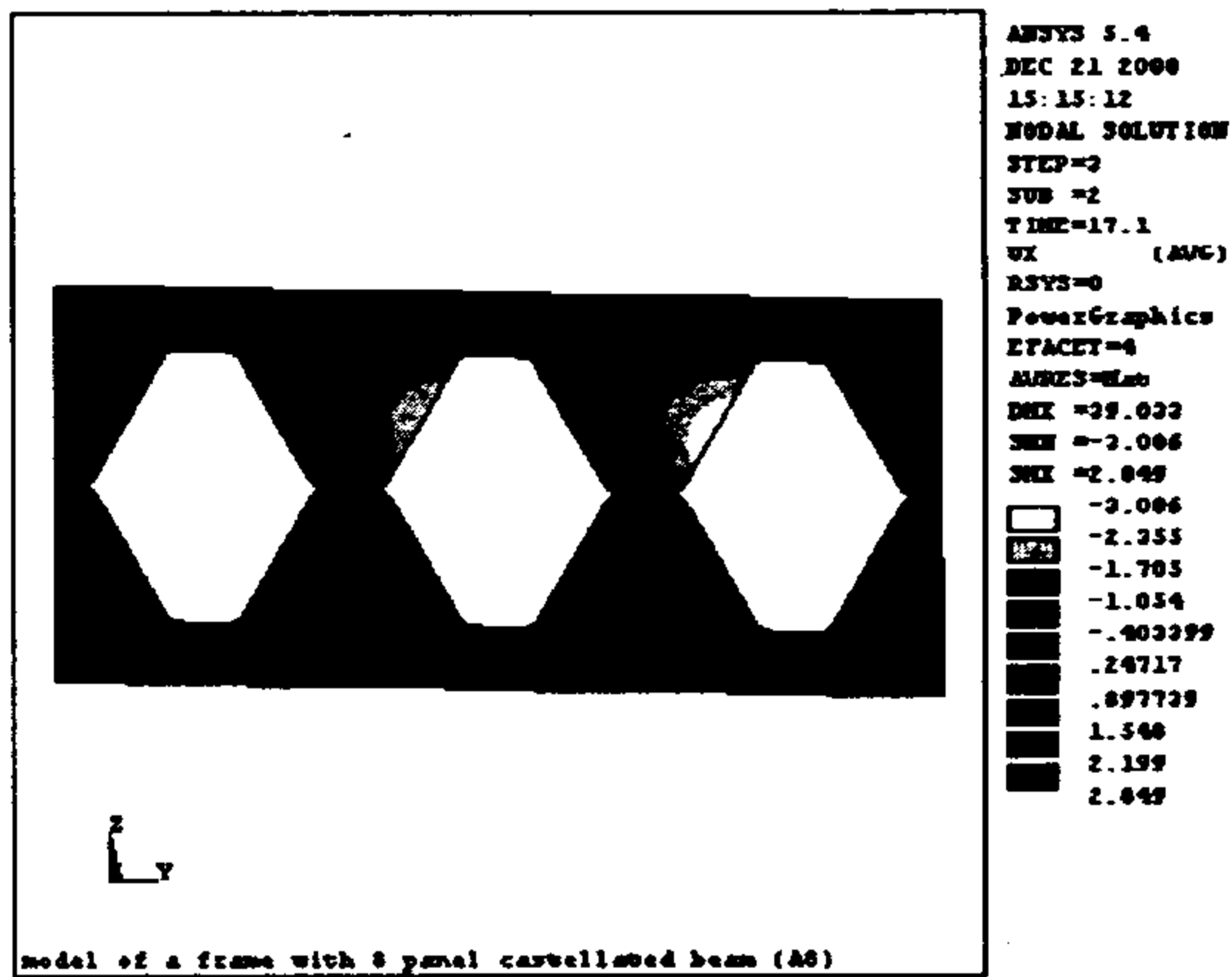
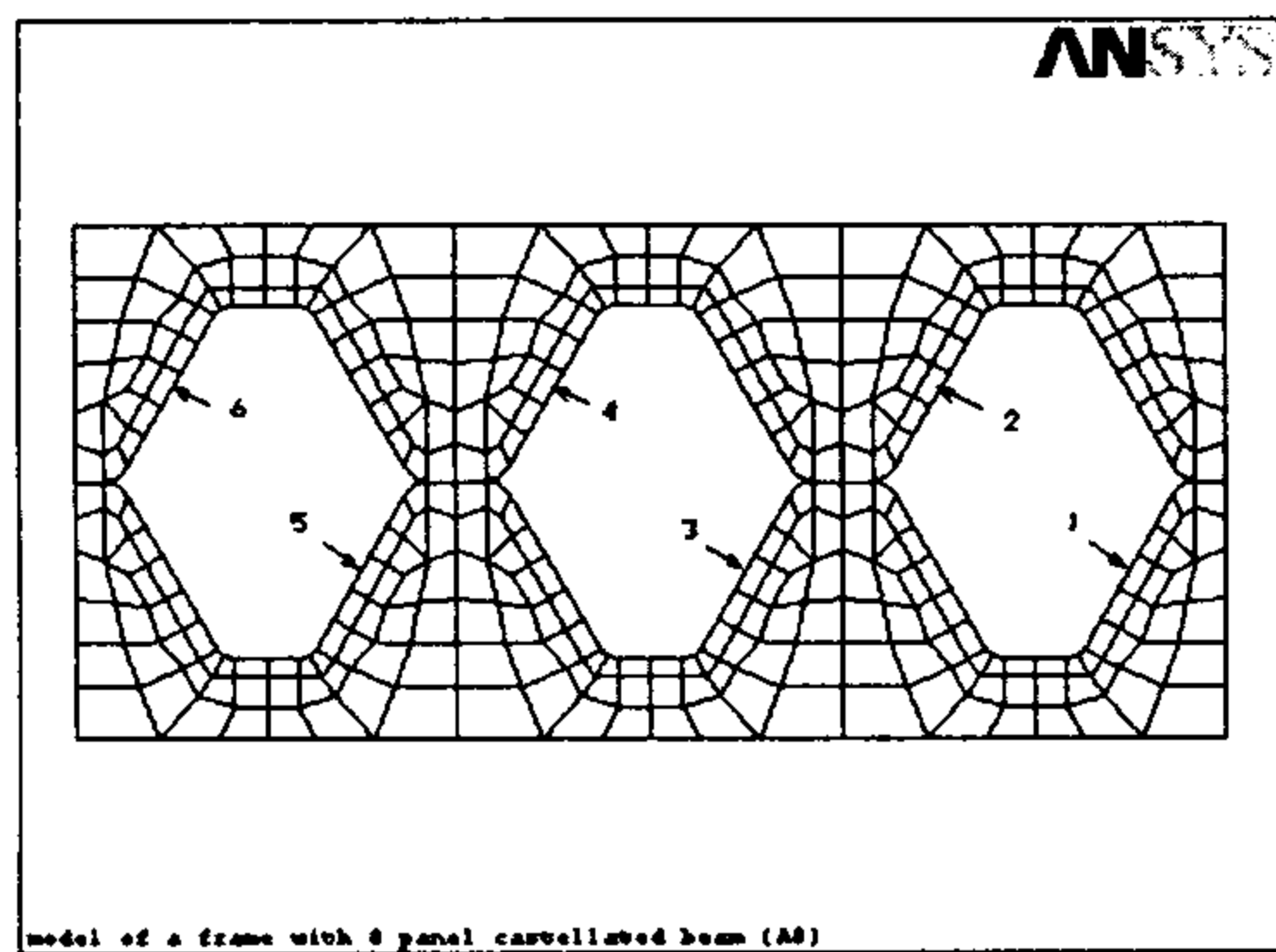
مطالعات حاکی از افزایش قابل ملاحظه ظرفیت باربری در صورت استفاده از جزئیات مربوط به مدل های C6-C میباشد که از یک سو قابلیت انتقال لنگر بین تیر و ستون را افزایش داده و نیز زاویه بین محور تیرو ستون را پس از اعمال بار به میزان قابل ملاحظه ای کاهش داده است و در عین حال، تکیه گاه پیچشی در انتهای تیر خرجینی ایجاد می نماید که با جلوگیری از بروز کمناش جانبی پیچشی کلی تیر، ظرفیت باربری سیستم را افزایش می دهد تا با بروز کمناش جانبی پیچشی جان تیر لانه زنبوری، بار نهایی با وقوع این پدیده کنترل گردد.

### مقایسه نتایج و جمع بندی

مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود با آزمایشهای قبلی



بار (تن)



شکل ۱۳: نمودار بار تغییر مکان جانبی جان برای نقاط شکل بالا (مدل تحلیل B8-II).

مقایسه برای قابهای مجموعه A با مصالح نوع II و مجموعه B با همین مصالح به عمل آمده است. در مورد قابهای مورد مطالعه، تفاوت تغییر مکان جانبی متناظر با بار نهایی برای مدل‌های مزبور در جدول (۶) خلاصه گردیده است.

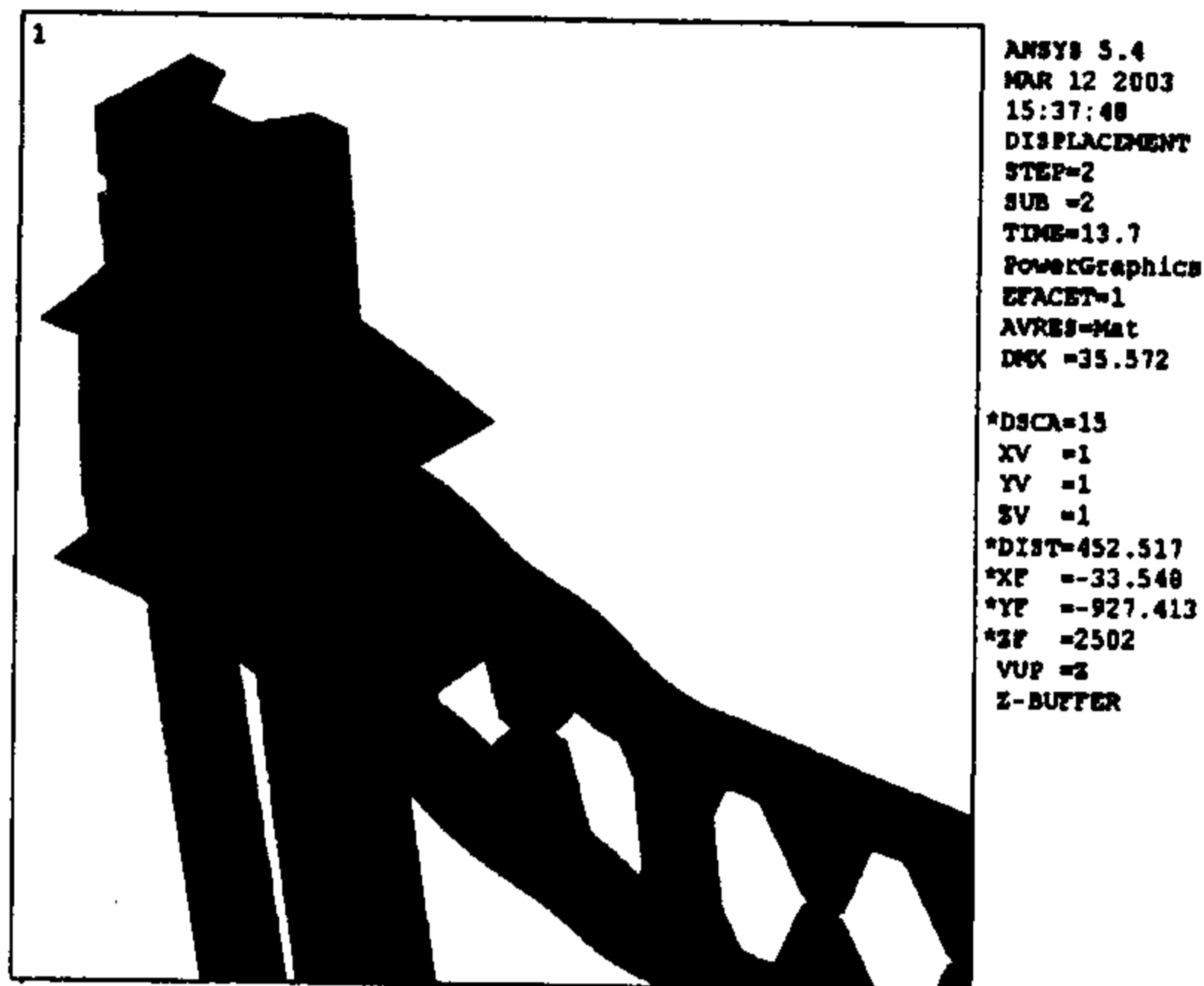
جدول ۶: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های سری A, B.

نسبت تفاوت تغییر مکان دو جفت مدل به تغییر مکان مدل مجموعه A (%)	جفت مدل‌های مقایسه شده
۱۸٪	B6-II, A6-II
۳۷٪	B8-II, A8-II
۴۲٪	B10-II, A10-II
۴۴٪	B12-II, A12-II

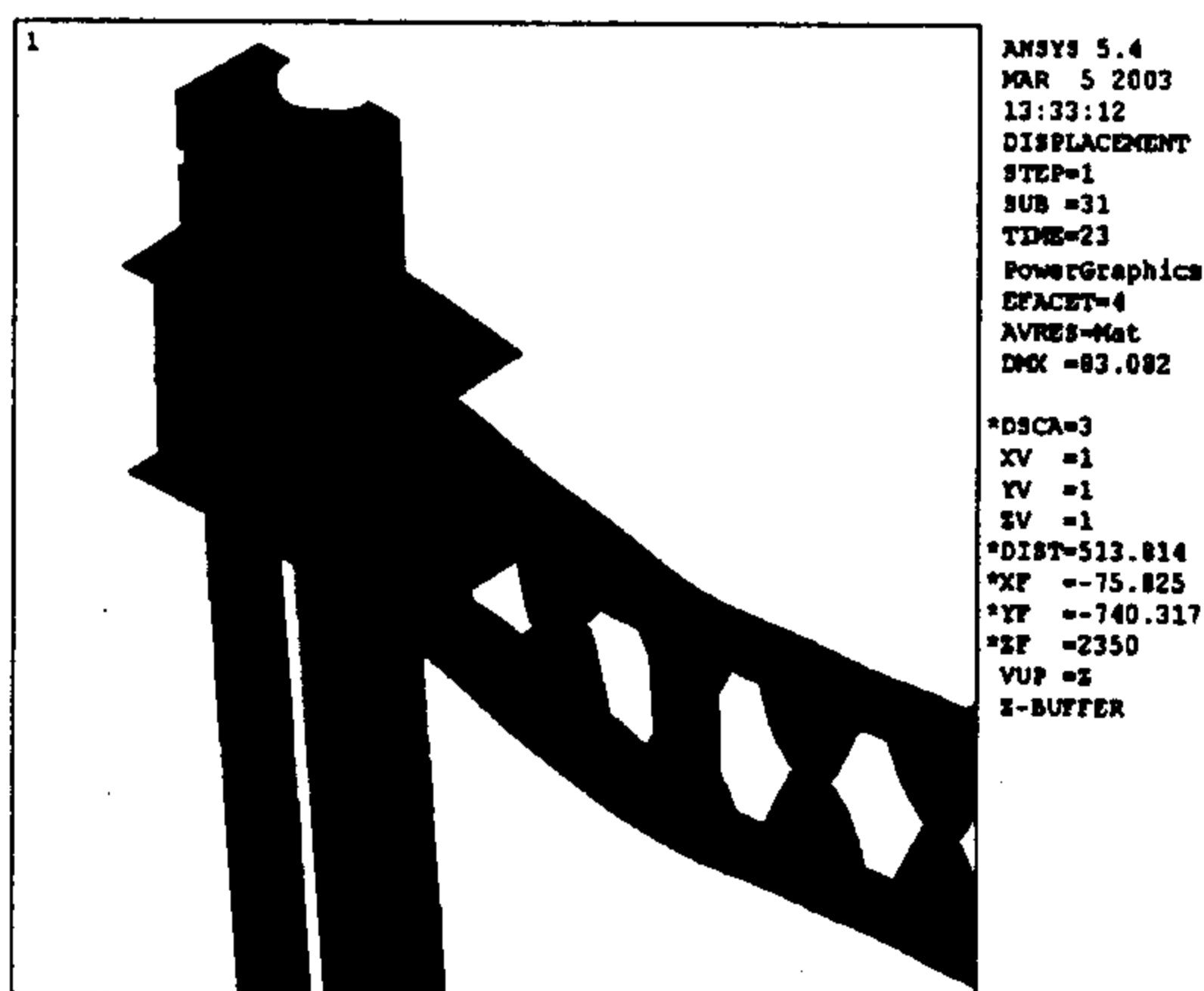
جدول ۵: مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل غیر خطی.

مدل	بار شروع کمانش (تن)		بار نهایی (تن)	
	نتایج آزمایش	نتایج تحلیل غیر خطی	نتایج آزمایش	نتایج تحلیل غیر خطی
A12-I	۱۲/۸	۱۲/۶	۱۴/۵	۱۵/۱

داده شده در شکل (۱۹) مربوط به قاب دارای تیر ۱۲ پانلی نشان دهنده آن است که تغییر مکان جانبی قاب در قابهای شامل ستونهای تسمه دار از قابهای دارای ستونهای با جان تو پر افزونتر بوده است که حاکی از اثرات تغییر شکلهای برشی در ستونهای تسمه دار می باشد. این



شکل ۱۷: حالت تغییر شکل یافته مدل تحلیل C6-b.



شکل ۱۸: حالت تغییر شکل یافته مدل تحلیل C6-c.

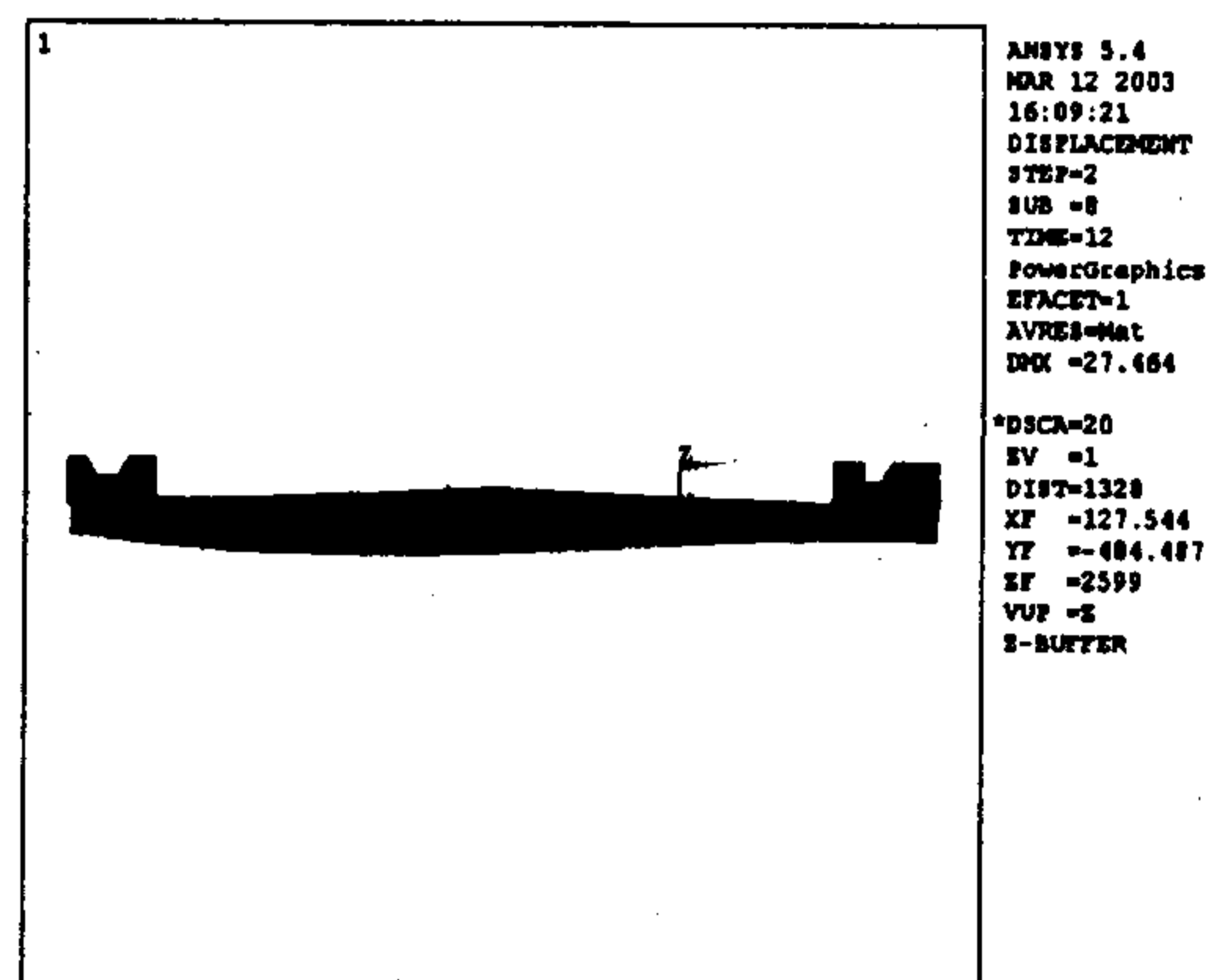
### نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های C6

نتایج این تحلیلها نشان دهنده رفتار ارتقاء یافته اتصال خرچینی تقویت شده به ویژه در حالتی است که ورقهای فوقانی و تحتانی به نبشی های فوقانی و تحتانی جوش شوند (مدلهای تحلیل C6-c, C10-c).

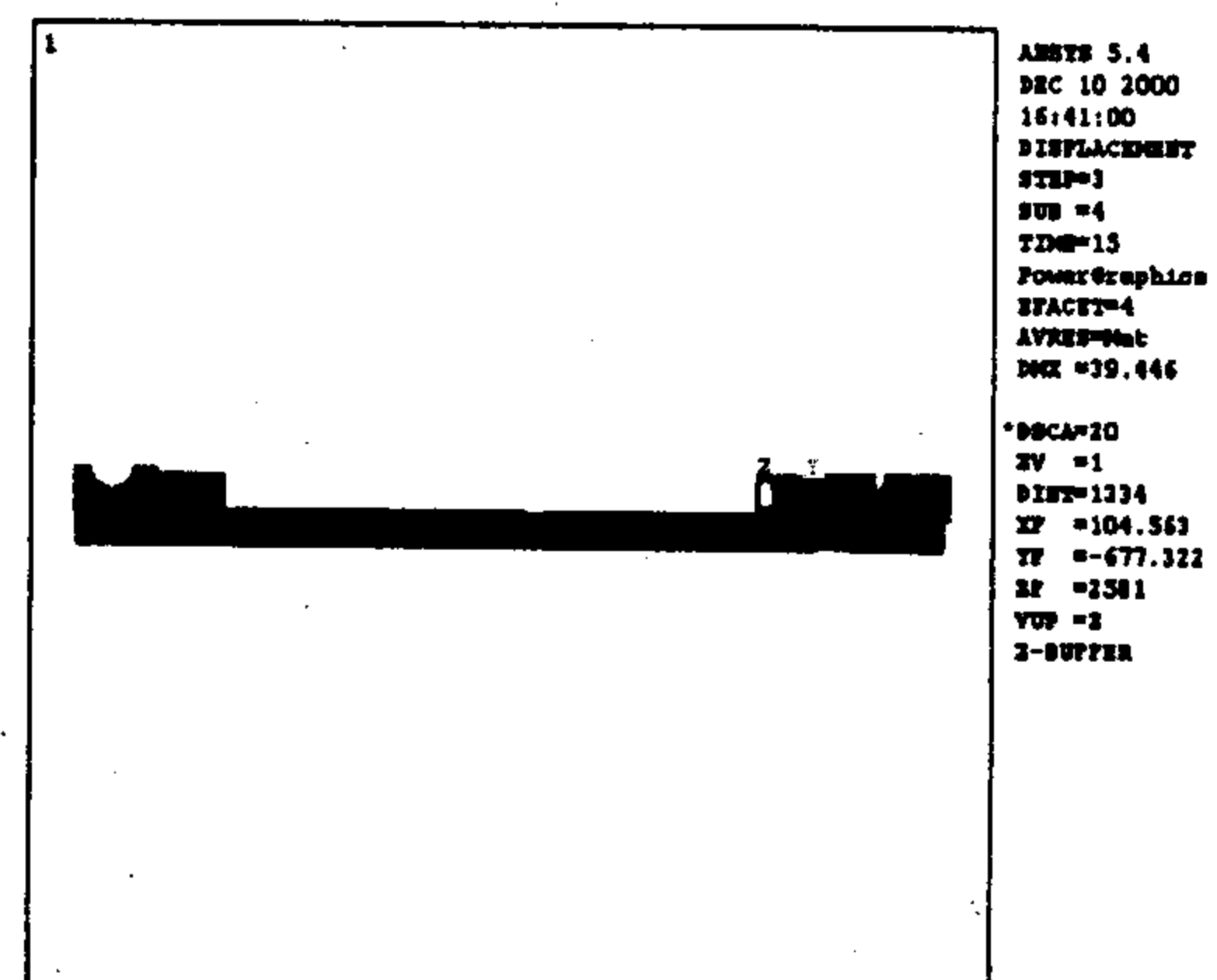
### اثرات میزان سخت شدگی تنجشی مصالح

مقایسه نتایج تحلیلهای تیرها با مدل مصالح دو خطی با سخت شدگی های تنجشی متفاوت و با حد جاری شدن یکسان، صرفنظر از مدل‌های دارای تیرهای ۶ پانلی که در آنها این اثر قابل توجه بوده است، نشان دهنده افزایش مقاومت نهایی قاب به میزان ۹٪ تا ۱۲٪ به دلیل افزایش سخت شدگی تنجشی به میزان در نظر گرفته شده در این مقاله بوده است.

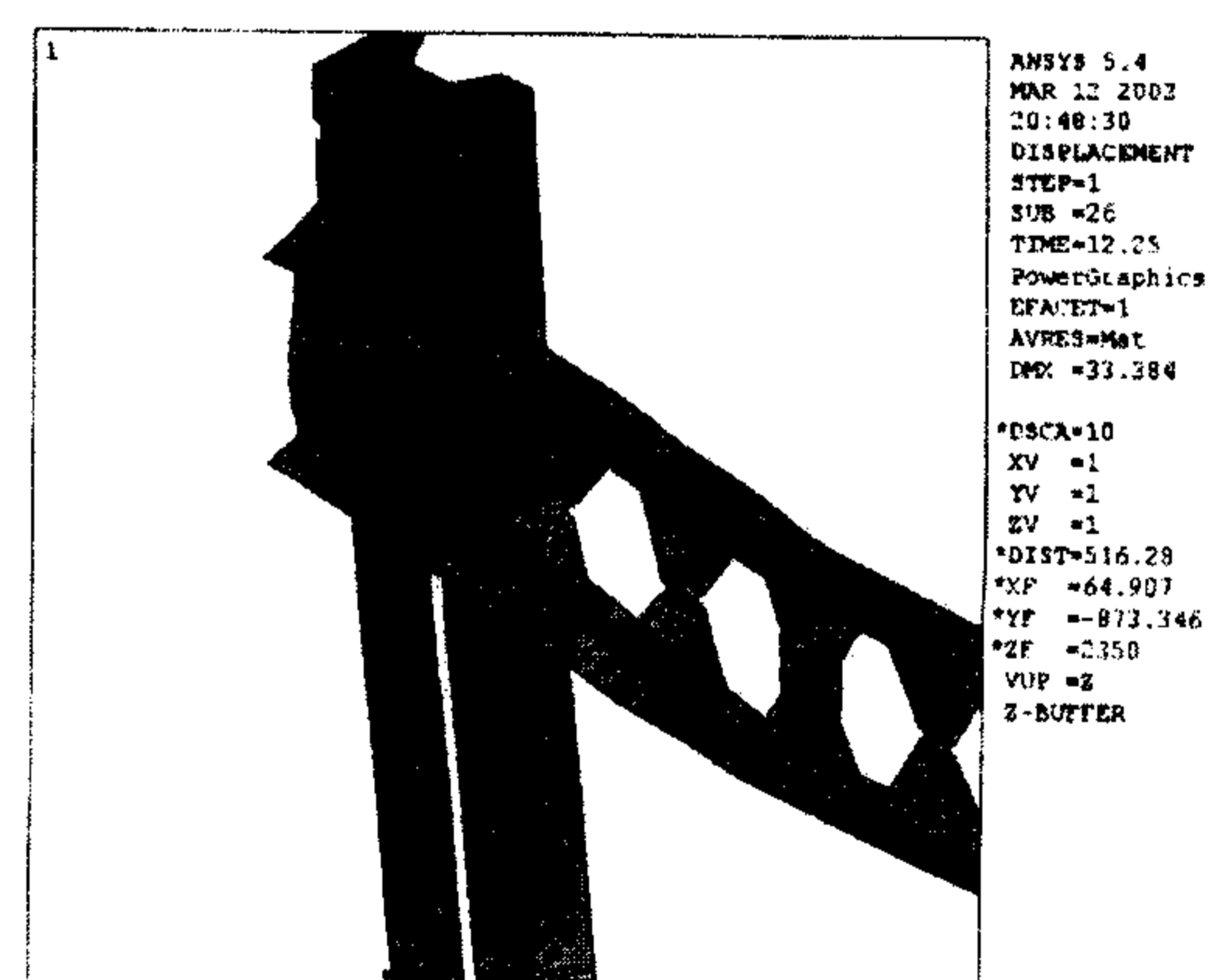
به این ترتیب نکاتی را که مالک در مرجع [۱۳ و ۱۵] و مالک و کریمی در مرجع [۶] در ارتباط با تغییر مکان افزونتر قابهای متشکل از ستونهای تسمه دار منجر به اثرات مزاید  $P-\Delta$  مورد تأکید قرار داده بودند، در مطالعه حاضر به صورت کمی در حیطه رفتار غیر خطی به وضوح تبیین گردیده است.



شکل ۱۴: حالت تغییر شکل یافته یکی از تیرهای خرچینی در تحلیل C6-a (نما از بالا).

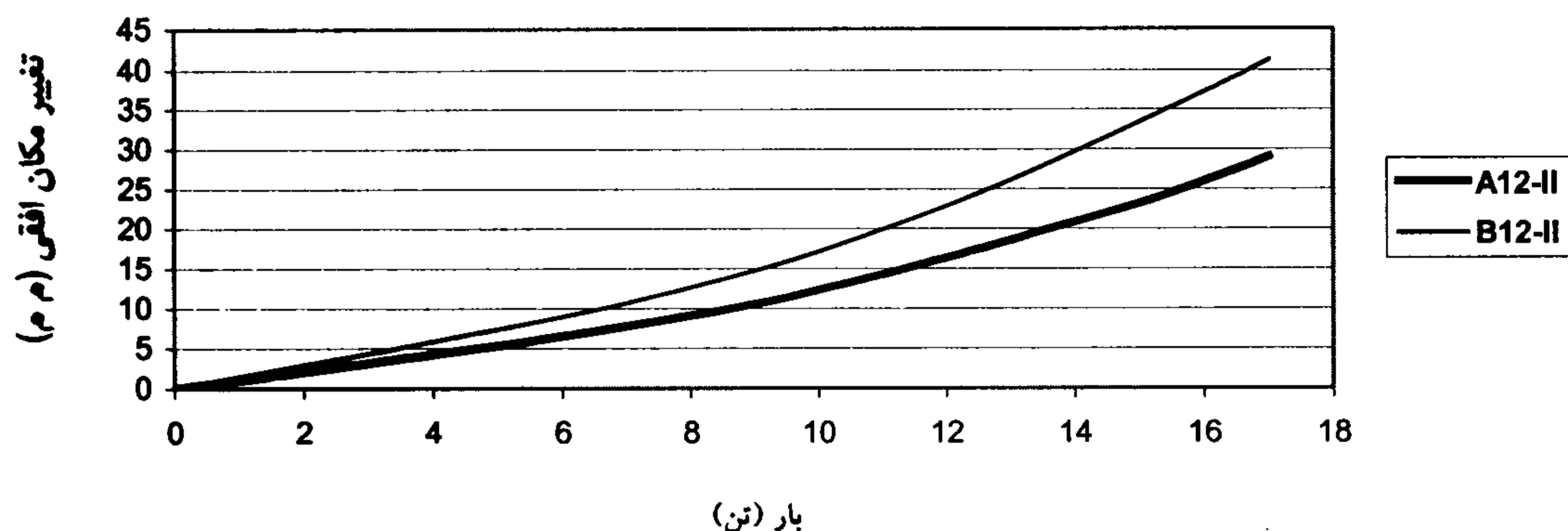


شکل ۱۵: حالت تغییر شکل یافته یکی از تیرهای خرچینی در تحلیل C6-c (نما از بالا).



شکل ۱۶: حالت تغییر شکل یافته مدل تحلیل C6-a.

## نمودار بار - تغییر مکان افقی دو قاب



شکل ۱۹: مقایسه منحنی های بار - تغییر مکان جانبی مدل های تحلیل A12-II و B12-II.

## مراجع

- 1 - Maalek, S. (1990) *Finite Element Analysis of Modular Structures and the Behaviour of Castellated Beams*, Ph.D. Thesis, University of Manchester, Institute of Science and Technology.
- ۲ - حداد کلور، ح. "مطالعه پدیده کمانش جانبی پیچشی جان تیر در قاب متشکل از تیر لانه زنبوری و ستون دابل ناودانی تسمه دار به روش اجزا محدود." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۳ - کامیاب مقدم، ک. "مطالعه پدیده کمانش جانبی پیچشی جان تیر در قاب متشکل از تیر لانه زنبوری و ستون توپر به روش اجزاء محدود." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۴ - پورافشاری، م.ر. "مطالعه پدیده کمانش جانبی پیچشی جان تیر لانه زنبوری در قاب با اتصال خرچینی به روش اجزا محدود." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۵ - مالک، ش. و وثوق، ا.ح. "مطالعه آزمایشگاهی قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." گزارش تحقیقات ملی، مرکز پژوهش سوانح طبیعی ایران، (۱۳۷۹).
- ۶ - مالک، ش. و کریمی، خ. "مطالعه اثرات برش در تغییر مکان جانبی قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." گزارش مرحله ای طرح تحقیقات ملی، مرکز پژوهش سوانح طبیعی ایران، (۱۳۷۸).
- ۷ - مالک، ش. و شفیع، غ. "مطالعه رفتار دینامیکی خطی قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." گزارش مرحله ای طرح تحقیقات ملی، مرکز پژوهش سوانح طبیعی ایران، (۱۳۷۸).
- ۸ - مالک، ش.، محمودیان، ب. و وثوق، ا.ح. "کمانش جانبی پیچشی جان در تیرهای لانه زنبوری." گزارش نهایی طرح پژوهشی کاربردی مشترک مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۹ - کریمی، خ. "تغییر شکلهای برشی در قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری و ستونهای تسمه دار." پایان کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۴).
- ۱۰ - محمودیان، ب. "کمانش جانبی پیچشی جان در تیرهای لانه زنبوری." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۴).
- ۱۱ - شفیع، غ. "رفتار دینامیکی تیرها و قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۵).

- ۱۲ - وثوق، ا. ح. "مطالعه پدیده کمانش جانبی پیچشی جان در تیرها و قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۶).
- ۱۳ - مالک، ش. "نکاتی چند در زمینه شکل پذیری تیرهای لانه زنبوری." مجموعه خلاصه مقالات نخستین کارگاه تجدید نظر در استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۷۳).
- ۱۴ - مالک، ش. "رفتار دینامیکی و شکل پذیری تیرها و قابهای متشکل از تیرهای لانه زنبوری." گزارش نهایی طرح تحقیقات ملی - مرکز پژوهش سوانح طبیعی ایران، (۱۳۷۹).
- ۱۵ - مالک، ش. "گستره معرفت زمان درباره تیرهای لانه زنبوری." مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد سوم، (۱۳۷۸).
- ۱۶ - مالک، ش. "ضوابط تحلیل، طراحی و اجرای تیرهای لانه زنبوری." ضمیمه الف - مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران، وزارت مسکن و شهرسازی، هشتمین تجدید چاپ، (۱۳۷۸).
- 17 - Okubo, T. and Nethercot, D. A. (1985). "Web post strength in castellated beams." *Proc. Instn. Civ. Eng., Part2, Vol. 79.*
- 18 - Aglan, A. A. and Redwood, R. G. (1974). "Web buckling in castellated beams." *Proc. Institution of Civ. Eng., Part2, Vol. 57.*
- ۱۹ - قنادی، ع. "رفتار غیر خطی تیرهای لانه زنبوری - عملکرد غیر خطی مصالح." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۲).
- 20 - Maalek, S. and Burdekin, F. M. (1991). "Weld quality requirements in castellated beams." *The Structural Engineer, Vol. 69, No. 13.*
- ۲۱ - مالک، ش. "تحلیل تفصیلی تنشها و تمرکز تنشها در تیرهای لانه زنبوری." مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد، جلد سوم، (۱۳۷۹).
- 22 - Maalek, S. (1989). "A formex formulation for a substructure finite element analysis of open web grids." *Int. J. of Space Structures, Vol. 4, No.1, PP. 43-64.*
- 23 - Maalek, S. (1993). "A formex approach to substructuring." *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Space Structures*, Ed. G. W. Parke, Thomas Telford, London.
- 24 - Sherbourne, A. N. (1965). "The plastic behaviour of castellated beams." *Proc. 2nd. Commonwealth Welding Conf., Instn. of Welding, No.C2, London, PP. 273-77.*