



## مدلسازی رفتار المانهای مهاربندی سکوی دریایی در کشش و فشار

مرجع اصلی:

### The post buckling Response of high D/t tubular members

Ken Skinner, Sirous Yasseri and David Styles

ترجمه:

نوید بلوآسی

نظارت و راهنمایی:

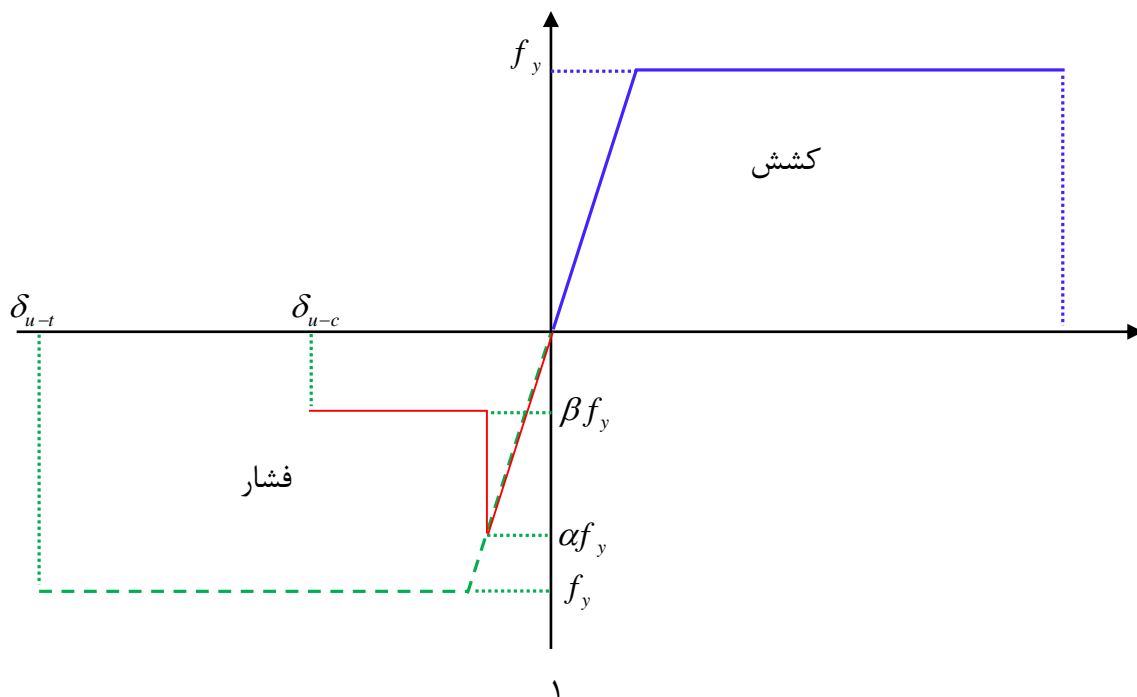
محمد رضا تابش پور

ویژگی کاربردی این کار:

استخراج منحنی‌هایی برای  $\alpha$  و  $\beta$  بر حسب  $D/t$  و  $L/r$  بر اساس نتایج مرجع اصلی

درس:

## طراحی سکوهای دریایی (اسفند ۹۵)



## ۱- خلاصه

هدف این مطالعه بررسی تأثیر

$$\text{الف) نسبت } \frac{D}{t}$$

$$\text{ب) نسبت لاغری } \frac{L}{r} \text{ (نسبت طول به شعاع ژیراسیون)}$$

بر پاسخ کمانشی اعضای لوله‌ای شکل و تعیین  $\alpha$  و  $\beta$  می‌باشد.

تداخل بین کمانش سراسری (Global buckling) و کمانش موضعی (Local buckling) به این معنی

است که هنگامی که نسبت  $\frac{D}{t}$  افزایش می‌یابد، کمانش موضعی مقطع می‌تواند باعث افت سختی قسمت‌های

بالا و پایین آن و همراه شدن این کمانش با کمانش سراسری شود. درک این رفتار، هنگامی ضروری است که

بعضی خرابی‌ها (Failed) برای بعضی از اعضای سازه‌ای (نه همه‌ی اعضا) قابل قبول باشد. به‌عنوان مثال در آنالیز

زلزله‌ی سطح شکل‌پذیری (Ductility level earthquake)، درک این موضوع اهمیت دارد. مطالعه نشان می‌دهد

که اعضای لوله‌ای با نسبت  $\frac{D}{t}$  حدود ۶۰ و بیشتر، مستعد کمانش محلی ناگهانی در دنباله‌ی اتفاق افتادن

کمانش سراسری هستند. پس در نظر گرفتن این تأثیرات در تحلیل‌ها، از اهمیت خاصی برخوردار است.

## ۲- معرفی

بارهای بحرانی کمانشی برای اعضای لوله‌ای را می‌توان به کمک معادلات تجربی منتشرشده محاسبه

نمود. این معادلات در کدها و استانداردهای طراحی مانند API RP2A، در محاسبات طراحی برای مشخص

کردن فاکتورهای بار (مقاومت) استفاده می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که به این بارهای کمانشی در حین

شرایط عملیاتی معمولی (Normal Operational Conditions) و بسیار شدید (Extreme Operational

Conditions) نرسیم. آنالیز تغییر شکل‌های بزرگ یا واژگونی سازه‌های جکت معمولاً به‌صورت مدل المان

محدود غیرخطی با اعضای تیر یک‌بعدی (1-D Beam Element) می‌باشد.

هنگامی که تغییر شکل‌های محلی قابل صرف‌نظر کردن باشد، به کمک این المان‌ها، با دقت بالایی

می‌توان پاسخ کمانشی کلی اعضا را پیش‌بینی کرد. به‌عنوان مثال زمانی که نسبت  $\frac{D}{t}$  مقدار کمی، باشد، این

فرض، منطقی است. با افزایش این نسبت، کمانش محلی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و تداخل بین این

کمانش با کمانش سراسری می‌تواند سبب افزایش بارهای پس-کمانشی شود؛ و ظرفیت بارهای پس-کمانشی

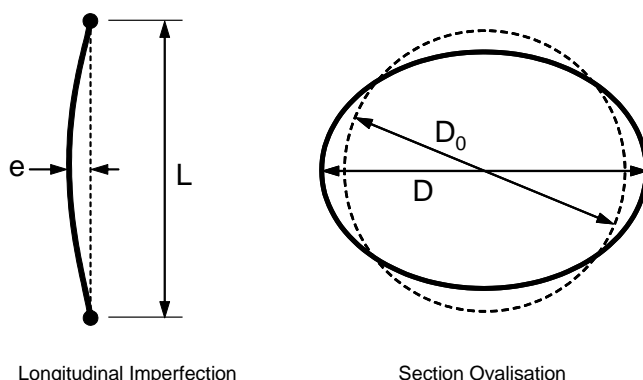
که توسط مدل المان محدود ذکرشده، به دست آمدند، از مقادیر واقعی بیشتر باشند.

با مدل کردن اعضای لوله‌ای جدارنازک، به‌وسیله تئوری پوسته‌های محدود (Shell Finite Element)،

قادر هستیم که هر دو کمانش محلی و کلی را در جداره لوله‌ها مشخص کنیم. در این مطالعه، برای مقایسه با مدل تئوری تیر، پاسخ کمانشی محدوده‌ی مختلفی از نسبت‌های  $\frac{D}{t}$  به کمک مدل پوسته‌ای، بررسی شده است. نسبت  $\frac{L}{r}$  در بررسی تأثیر خرابی اعضا نیز، اهمیت دارد. در این بررسی، نسبت  $\frac{D}{t}$  در محدوده ۶۰ تا ۹۰ و نسبت  $\frac{L}{r}$  در محدوده ۲۰ تا ۱۱۰، در نظر گرفته شده است.

### ۳- مدل‌های تحلیل

در پیکربندی مدل، جایی که تغییر شکل‌های محلی در پوسته لوله‌ها، قابل صرف‌نظر کردن باشد؛ المان تیر استفاده شده است؛ و برای بررسی رفتار کمانشی محلی نیز، از المان پوسته‌ای استفاده شده است. مدل‌ها در حالت ایده آل (بدون در نظر گرفتن خرابی) تولید شده‌اند. برای ایجاد کمانش سراسری تحت بار محوری، تغییر شکل ناچیزی به اندازه ۰٫۰۰۱٪ طول عضو، در هر مدل به وجود آورده شده است؛ و برای بررسی تأثیر بار محوری در تغییر شکل مقطع (Ovalisation)، مقطع مدل‌ها به صورت بیضی شکل (Squashed) با نسبت  $\frac{D-D_0}{D_0}$  (نسبت بیضی گون شدن) برابر ۰٫۰۰۱۵ مدل شده است.



شکل ۱: ایجاد جابه جایی از حالت قائم و بیضی گون کردن مقطع

### ۳-۱- بارگذاری محوری

برای ایجاد بارگذاری محوری مطلق، قسمت پایینی تیر به صورت تکیه‌گاه ساده (تمام درجات آزادی در صفحه، به جز گردش حول محور  $y$ ، مقید شده‌اند) و قسمت بالایی به صورت تکیه‌گاه غلتکی (در صفحه، فقط درجه آزادی حرکت در راستای  $x$  مقید شده است). مدل شده است. این شرایط مرزی، حالت تیر دوسر مفصل را شبیه‌سازی می‌کنند و با توجه به جهت اعمال بار محوری، عضو در صفحه  $x-z$ ، کمانش می‌کند. در واقعیت، شرایط مرزی دو انتهای یک عضو سازه‌های جکت، چیزی بین شرایط دوسر مفصل و دوسرگیردار است. شرایط مرزی دو سر مفصل در نظر گرفته شده در این مطالعه، باعث می‌شود که طول مؤثر

کمانش (منظور همان  $Le$  در فرمول مربوط به بار بحرانی کمانش است). برابر طول خود ستون باشد، در صورتی که در شرایط دو سر درگیر طول مؤثر برابر  $0,7$  طول ستون می‌باشد؛ و در شرایط واقعی اعضای جکت، شرایط مرزی چیزی بین این دو است. اگر شرایط مرزی دوسرگیردار در نظر گرفته شود، تیر تحت تسلیم خراب می‌شود.



شکل ۲: نحوه شرایط مرزی و اعمال بار، برای حالت بارگذاری محوری

### ۲-۳- مدل سازی مواد

در این بررسی، از متریکال با تنش تسلیم (Yield Stress)  $415$  مگا پاسکال و مقاومت نهایی (Ultimate Strength)  $625$  مگا پاسکال در کرنش پلاستیک (Plastic Strain)  $0,162$ ، استفاده شده است. تنش‌های واقعی، برای بررسی متریکال استفاده شده‌اند. معادلات زیر برای به دست آوردن تنش واقعی و کرنش لگاریتمی از تنش و کرنش مهندسی، استفاده شده‌اند.

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (1-3)$$

$$\epsilon_{\text{ln}}^{\text{pl}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E} \quad (2-3)$$

## ۴- نتایج

بارگذاری محوری اعضای نسبتاً بی نقص (Near-perfect Members) با درصد خروج از حالت قائم برابر ۰٫۰۱٪ طول. برای بررسی این حالت، نسبت  $\frac{D}{t}$  در محدوده ۲۰ تا ۹۰ تغییر داده شده؛ و این نوع پیکربندی برای نسبت‌های لاغری ( $\frac{L}{r}$ ) برابر ۲۰، ۷۰، ۱۱۰ و ۱۸۵ در نظر گرفته شده است.

مشاهده شده که در اعضا، در ضریب بارگذاری محوری مشابه (ضریب بارگذاری محوری، همان نسبت بارمحوری اعمال شده به نیروی تسلیم شدن مقطع، می باشد)، کماتش سراسری اتفاق می افتد و مستقل از نسبت  $\frac{D}{t}$  می باشند؛ و همچنین اعضای طویل (نسبت  $\frac{L}{r}$  بزرگتر از ۱۰۰) قبل از رسیدن به تنش تسلیم مواد، در اثر کماتش، دچار خرابی شدند. بار بحرانی کماتش را می توان به کمک فرمول اولر محاسبه کرد:

$$P_{cr.} = \frac{n\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (1-4)$$

که

$EI$ : صلبیت خمشی

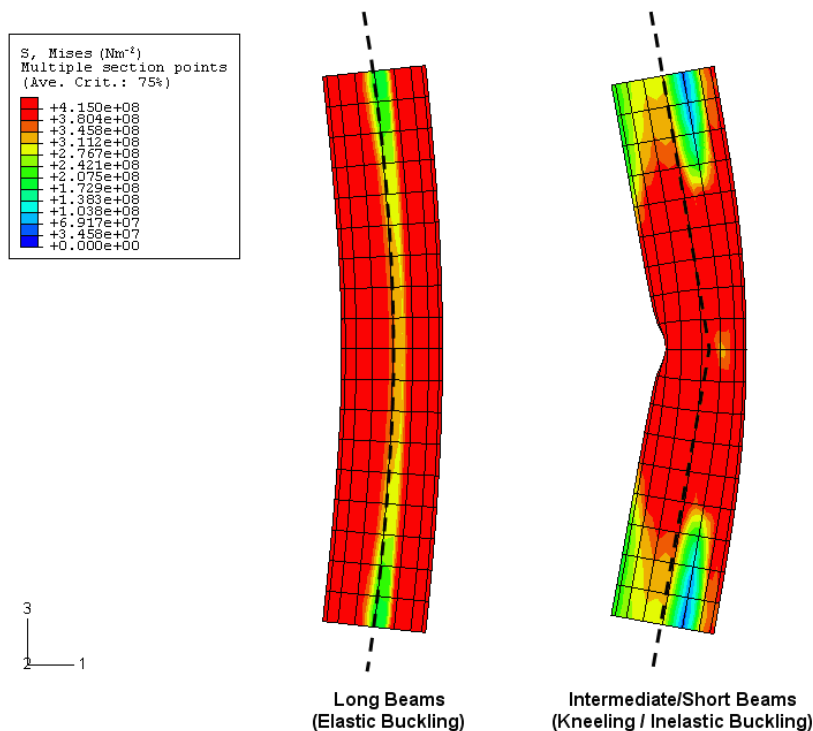
$L_e$ : طول مؤثر (شرایط مرزی دو سر مفصل، پس طول مؤثر برابر همان طول است)

$n$ : مود (به ازای  $n$  های مختلف مودهای مختلف کماتش و بار بحرانی آن مود، قابل محاسبه است).

معادله اولر برای ستون‌های طویل اعتبار داشته و برای ستون‌ها با طول میانه، (ضریب لاغری  $\frac{L}{r}$  بین ۴۰ تا ۱۰۰) یا ستون‌های طول کوتاه، مقادیر دست بالاتری نسبت به واقعیت، از این معادله به دست می آید. اعضای کوتاه (ضریب لاغری  $\frac{L}{r}$  کمتر از ۴۰) قادر هستند نیروها را تا لحظه شکست ماده تحمل کنند. در مواردی که ضریب لاغری ستون، مقدار کمی است (اعضای کوتاه یا همان اعضا با ضریب لاغری  $\frac{L}{r}$  کمتر از ۴۰)، می توان انتظار داشت خرابی ستون تحت اثر شکستن خود ماده باشد و ستون بارها را تا لحظه شکست خود ماده تحمل کند. چنین خرابی می تواند به شکل خرد شدن ماده (وقتی مصالح بتن باشد) یا در اثر تسلیم شدن ماده (مثلاً در مورد فولاد سازه‌ای)، صورت گیرد.

در ستون‌ها با ضریب لاغری متوسط ( $\frac{L}{r}$  بین ۴۰ تا ۱۰۰)، شکل کماتشی مشابه ستون‌های بلند می باشد؛ با این تفاوت که نواحی با سطوح تسلیم، در ناحیه کماتش ایجاد می شود. به عبارتی برای این گونه

اعضا، کمانش غیر ارتجاعی رخ می‌دهد. در شکل ۳، تفاوت کمانش ارتجاعی و غیر ارتجاعی نشان داده شده است.

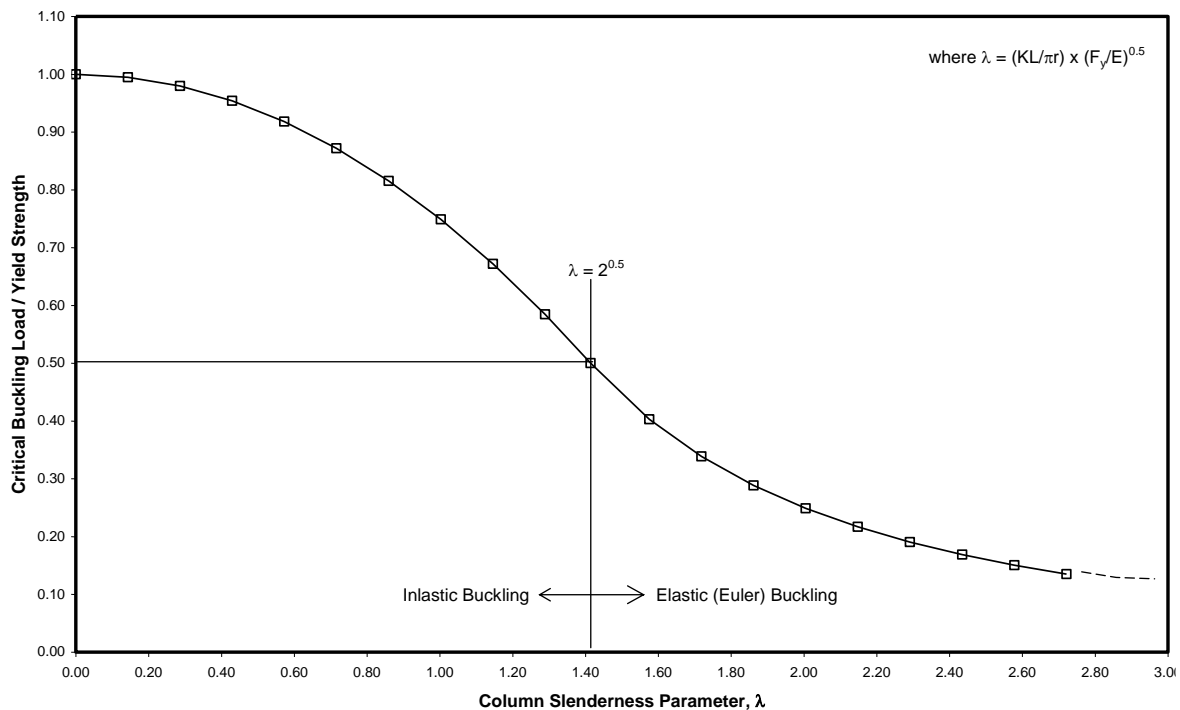


شکل ۳: مقایسه کمانش الاستیک و کمانش غیر ارتجاعی (غیر الاستیک)

در آیین‌نامه API (API RP2A LRFD/Section D.2.2.1) رابطه بین ضریب لاغری ستون با بار بحرانی کمانشی، در ستون با طول متوسط، به صورت زیر است:

$$\lambda = \frac{KL}{\pi r} \times \left( \frac{F_y}{E} \right)^{0.5} \quad (2-4)$$

شکل ۴، انتقال از ناحیه کمانش الاستیک به غیر الاستیک را درحالی که  $\frac{L}{r}$  افزایش می‌یابد نشان می‌دهد. کد API همچنین معادلاتی را برای تخمین باری که سبب زودتر رخ دادن کمانش موضعی و به سبب آن، رخ دادن کمانش غیر الاستیک (ارتجاعی) می‌شود را ارائه داده است.

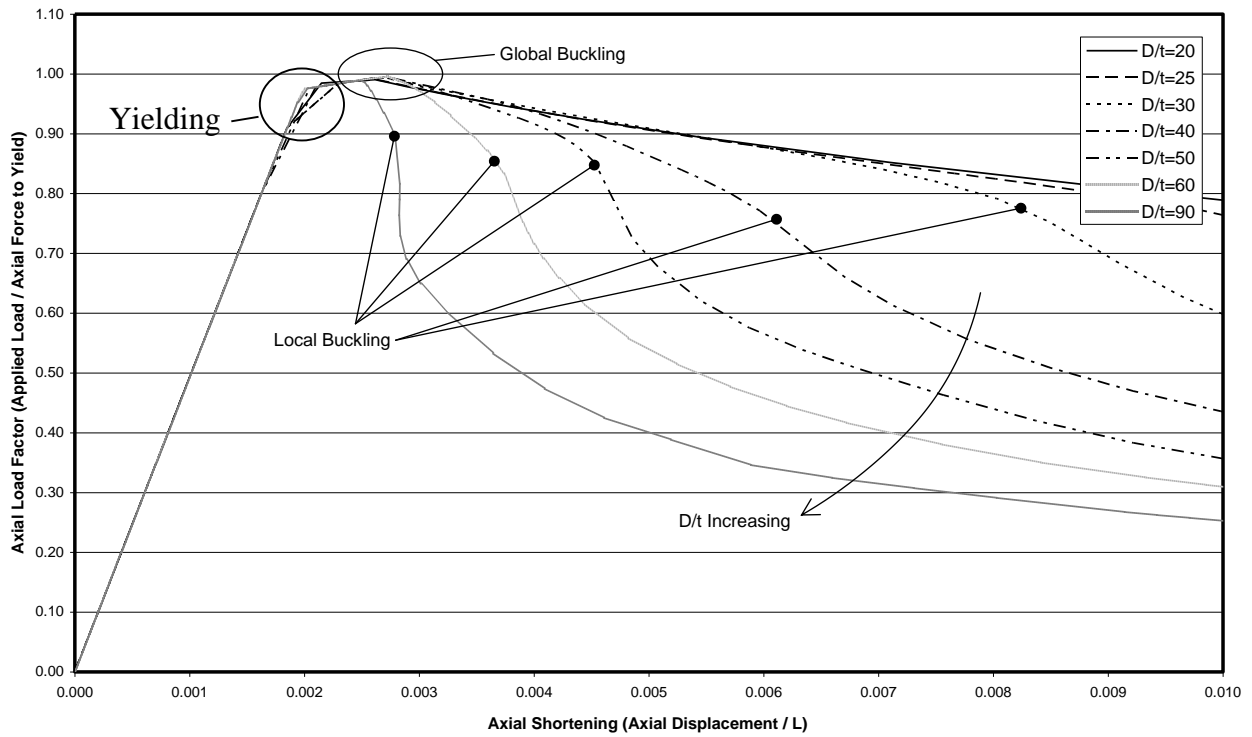


شکل ۴: تأثیر ضریب لاغری روی بار بحرانی کمانشی (طبق رابطه‌ی API)

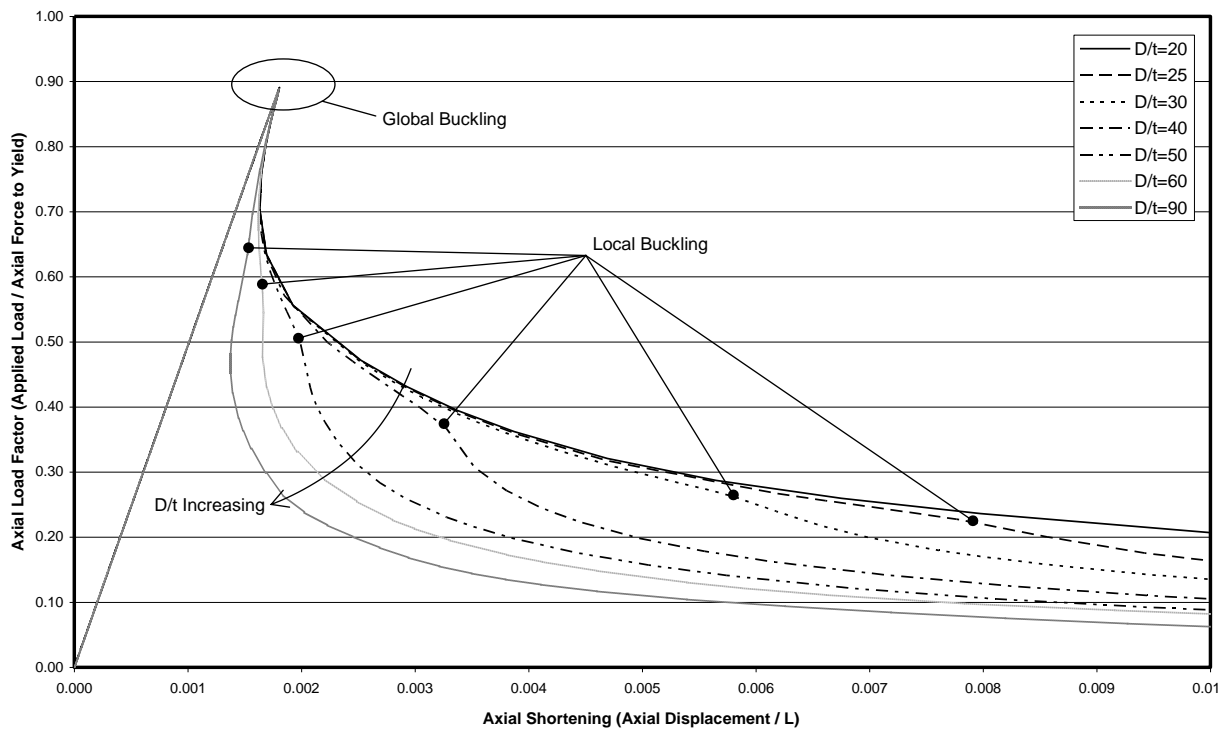
ولی برای محدوده  $\frac{D}{t}$  مورد بررسی در این مطالعه، کمانش ستون همواره قبل از کمانش محلی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین فقط بار کمانشی ستون، مرتبط خواهد بود.

با مقایسه رفتار پس کمانشی (Post buckling) یک عضو، در محدوده مقادیر  $\frac{D}{t}$  مورد مطالعه، نشان می‌دهد که با کم شدن این نسبت، کمانش موضعی پوسته دیواره، زودتر اتفاق می‌افتد تا جایی که کمانش موضعی بلافاصله بعد از کمانش سراسری اتفاق بیافتد. در حین کمانش موضعی، مقطع عضو ابتدا دچار فرورفتگی (Dimple) و سپس تحت بارهای وارده، تاب (Fold) می‌خورد.

برای نسبت‌های  $\frac{D}{t}$  بزرگ‌تر از ۶۰، تداخل بین کمانش موضعی و کلی باعث افت شدید ظرفیت باربری عضو بعد از کمانش می‌شود. این اثر در شکل‌های ۷ و ۸ و ۹، قابل مشاهده است.

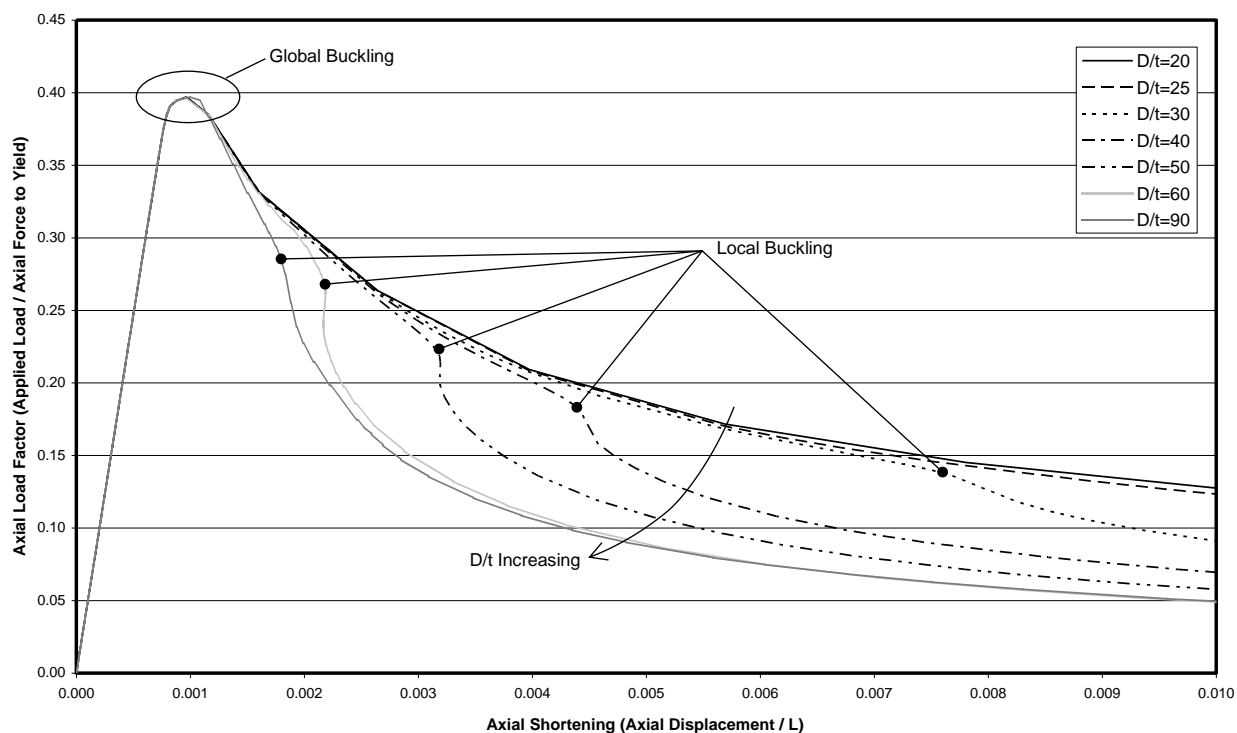


شکل ۵: مقایسه کمانش محوری در  $D/t$  متفاوت، برای  $L/r$  برابر ۲۰

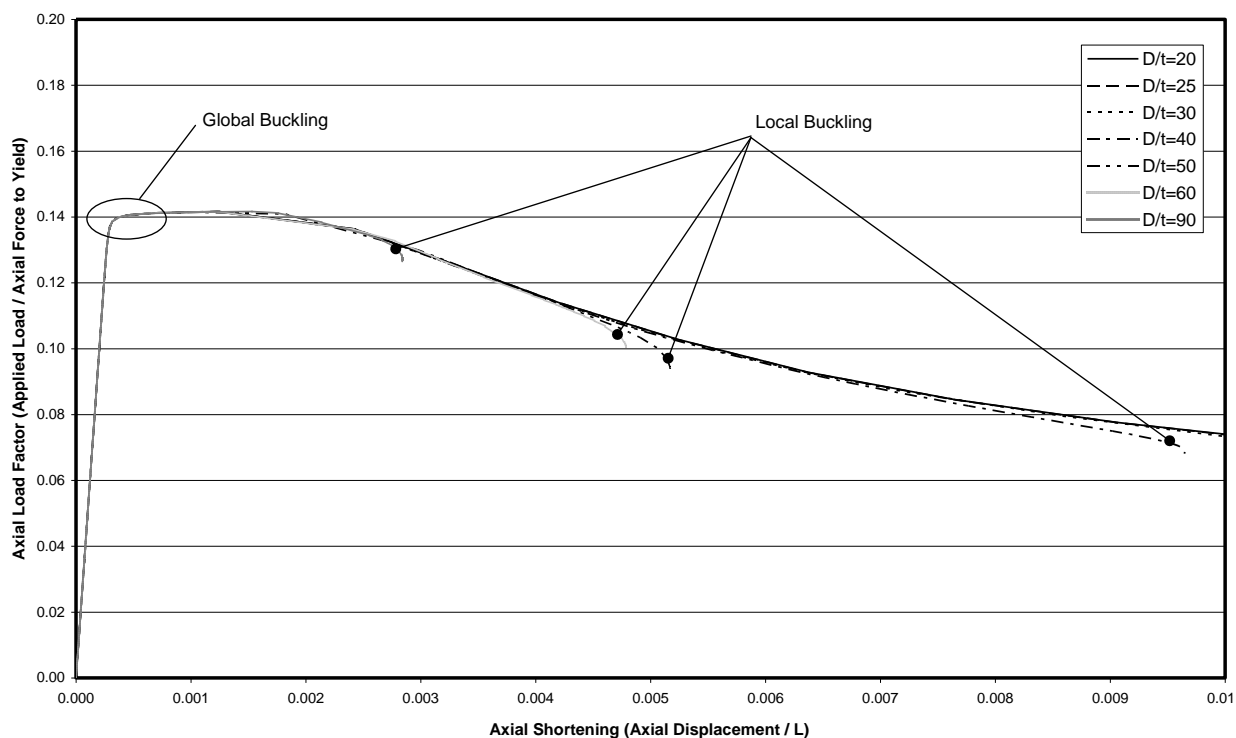


شکل ۶: مقایسه کمانش محوری در  $D/t$  متفاوت، برای  $L/r$  برابر ۷۰





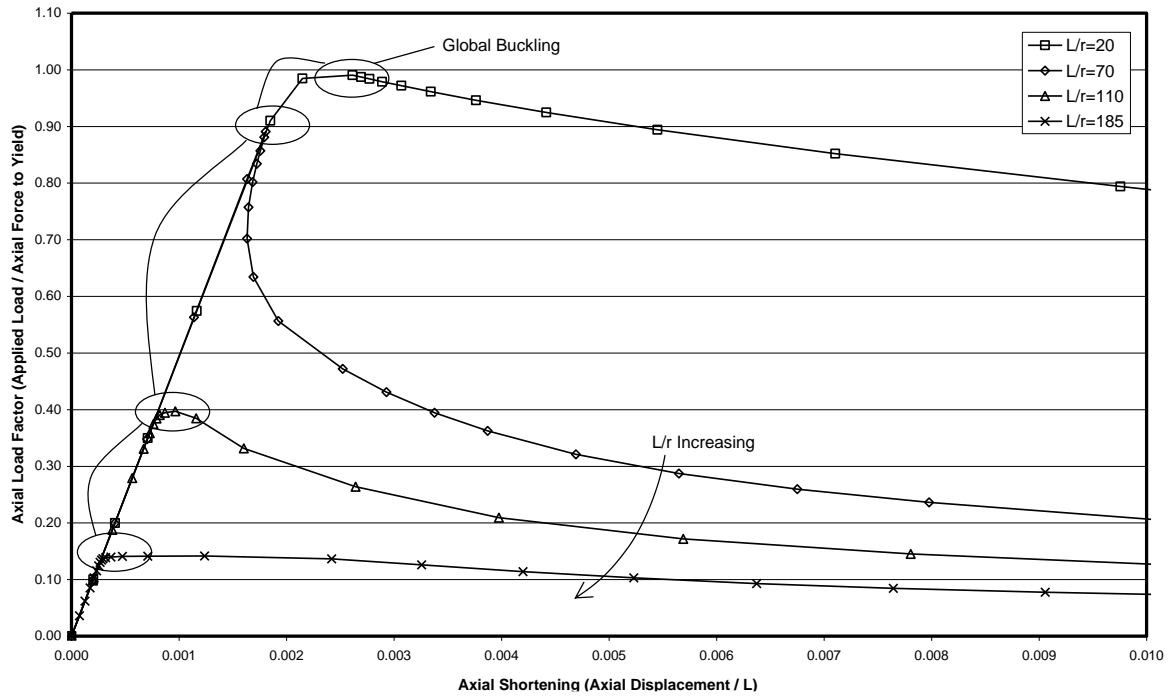
شکل ۷: مقایسه کمانش محوری در  $D/t$  متفاوت، برای  $L/r$  برابر ۱۱۰



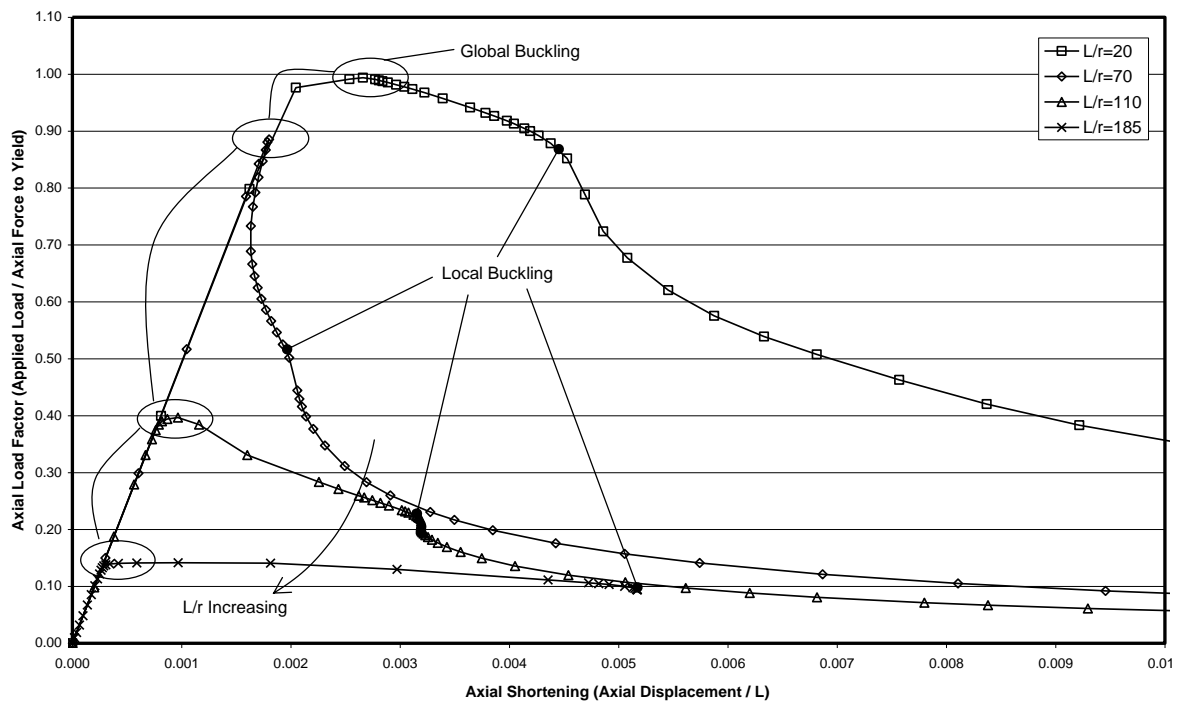
شکل ۸: مقایسه کمانش محوری در  $D/t$  متفاوت، برای  $L/r$  برابر ۱۸۵

اثر نسبت  $\frac{L}{r}$  برای اعضای تحت بار محوری نیز در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ و شکل ۱۱، رفتار پس-کمانشی عضو با افزایش نسبت  $\frac{L}{r}$  در  $\frac{D}{t}$  های مشخص، نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که

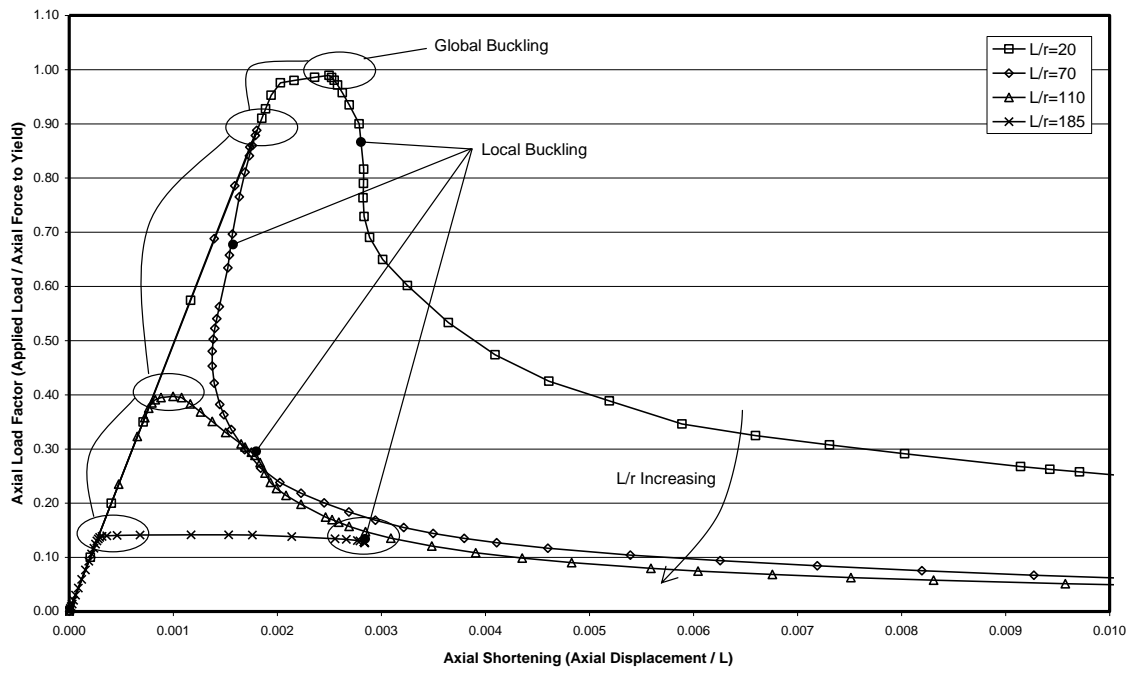
با افزایش  $\frac{L}{r}$ ، بار بحرانی کمانشی کاهش می‌یابد. (تحت نیروهای محوری با مقادیر کم، عضو دچار کمانش می‌شود). برای ضرایب لاغری بزرگ‌تر، ناحیه پلاستیک بزرگ‌تری شکل می‌گیرد و تغییر شکل پلاستیک بزرگ‌تری، قبل از به وجود آمدن گودی، خواهیم داشت.



شکل ۹: مقایسه کمانش محوری در  $L/r$  متفاوت، برای  $D/t$  برابر ۲۰

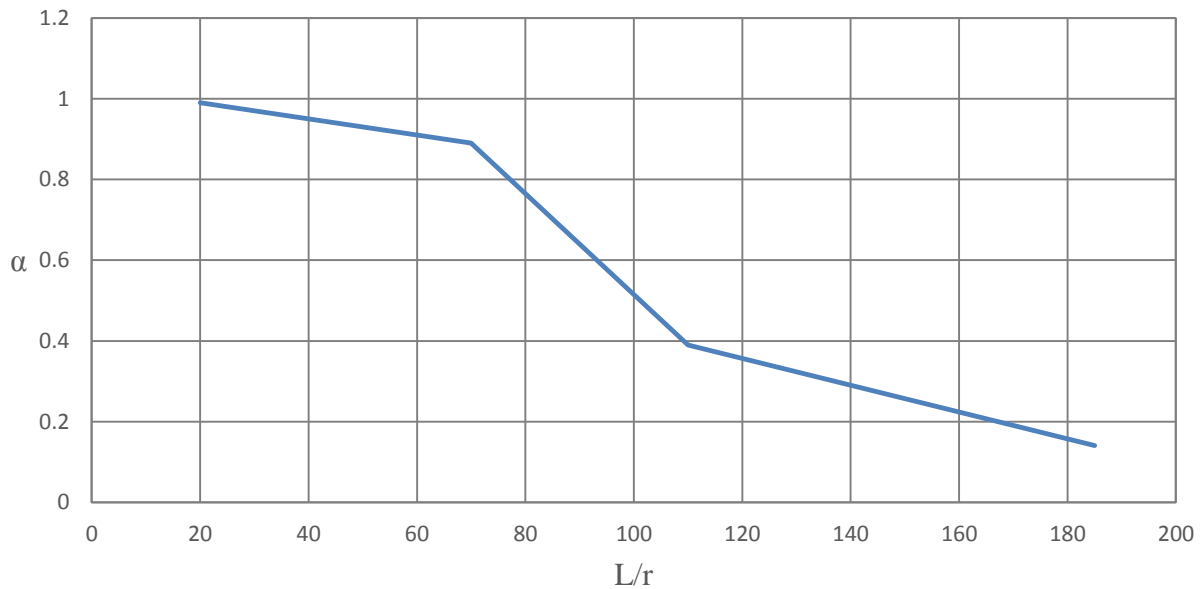


شکل ۱۰: مقایسه کمانش محوری در  $L/r$  متفاوت، برای  $D/t$  برابر ۵۰

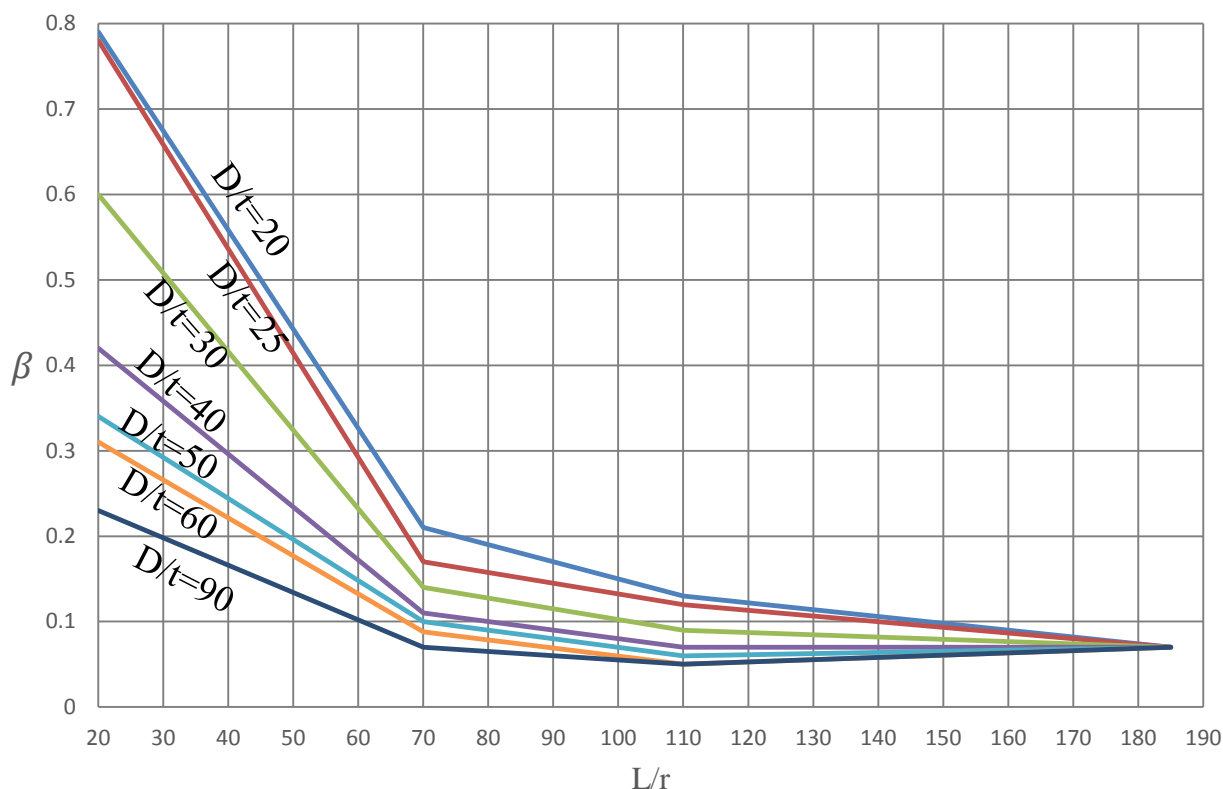


شکل ۱۱: مقایسه کمانش محوری در  $L/r$  متفاوت، برای  $D/t$  برابر ۹۰

در نهایت با توجه به مقادیر موجود، می توان نمودارهایی به شکل زیر برای به دست آوردن ضریب حد مقاومت فشاری  $\alpha$  و  $\beta$ ، ایجاد کرد:



شکل ۱۲: مقدار ضریب در نسبت های  $L/r$  مختلف



شکل ۱۳: مقدار ضریب  $\beta$  در  $L/r$  و  $D/t$  مختلف

## ۵- نتیجه گیری

نسبت  $\frac{D}{t}$  مقطع تأثیر قابل توجهی روی هم پاسخ محوری و هم پاسخ خمشی اعضای دایره‌ای دارد. تحت بارگذاری محوری در اعضای سالم، نسبت  $\frac{D}{t}$  مشخص می‌کند که کمانش موضعی اتفاق می‌افتد یا اینکه بار وارده، بر کمانش، بدون تأثیر است. با افزایش نسبت  $\frac{D}{t}$ ، (مقادیر ۶۰ به بالا)، کمانش موضعی بلافاصله بعد از کمانش سراسری اتفاق افتاده و سبب کاهش قابل توجه باربری ستون می‌شود. نقص طولی (به‌ویژه در ستون‌های کوتاه) باعث کمتر شدن بار بحرانی کمانشی می‌شوند. با کاهش ممان اینرسی مقطع، بیضی‌گون شدن مقطع زیادتر می‌شود. ولی مهم‌تر از آن، کاهش ممان اینرسی مقطع سبب زودتر اتفاق افتادن کمانش محلی در پی کمانش سراسری و کاهش سختی ستون به‌ویژه در مقادیر  $\frac{D}{t}$  بالا، می‌شود.

با افزایش نسبت  $\frac{D}{t}$ ، کمانش موضعی زودتر اتفاق می‌افتد و مقدار  $\frac{D}{t}$  برابر ۹۰ را می‌توان حد اتفاق افتادن کمانش، قبل از رسیدن به ظرفیت خمش پلاستیک عضو، دانست.

این مطالعه نشان داد که در نظر گرفتن کمانش موضعی در پاسخ پس-کمانشی اعضای سازه‌های لوله‌ای، با نسبت  $\frac{D}{t}$  بزرگ‌تر از ۶۰، بسیار مهم است. برای اعضای بسیار لاغر ( $\frac{D}{t}$  بزرگ‌تر از ۱۵۰)، بار بحرانی کمانشی از مقدار مقاومت تسلیم ماده ستون مستقل خواهد بود زیرا کمانش در ناحیه الاستیک اتفاق خواهد افتاد. با کاهش مقدار  $\frac{L}{r}$ ، از ناحیه کمانش الاستیک وارد ناحیه کمانش غیر ارتجاعی (غیر الاستیک) می‌شویم، به نحوی که تارهای بیرونی عضو، قبل از اتفاق افتادن کمانش سراسری، دچار تسلیم می‌شوند. برای اعضای کوتاه تسلیم شدن ستون، قبل از اتفاق افتادن کمانش خواهد بود.

از آقای نوید بلوایی در انجام ترجمه تشکر می‌کنم.

تابش پور