



# ارزیابی روش تحلیل مستقیم توسط تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه‌های سنگین نفتی

محسنعلی شایانفر<sup>۱</sup>، علیرضا رضائیان<sup>۲</sup>، پارسا جلوخانی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۰۱)

## چکیده

روش تحلیل مستقیم رویکردی جدید در طراحی پایداری سازه‌های فولادی به حساب می‌آید. این روش برخلاف روش طول مؤثر اثرات مرتبه دوم را با افزایش طول ستون در نظر نگرفته و در مقابل این اثرات با اعمال بار جانبی و کاهش سختی در محاسبات لحاظ می‌کند. در روش تحلیل مستقیم ضریب طول مؤثر برابر یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین عیوب اولیه که به صورت جابه‌جایی گرهی در مورد گره و ناصافی و ناشاقولی در مورد عضو مطرح هستند، با مدل‌سازی مستقیم نقص و یا در صورت عدم امکان با اعمال بار فرضی در فرضیات طراحی لحاظ می‌شوند. همچنین بررسی رفتار غیرالاستیک و غیرخطی شدن‌های هندسی عضو با کاهش سختی عضو در ملاحظات طراحی در نظر گرفته می‌شود. در سازه‌های نفتی سنگین، به دلیل وجود بارهای ثقیل سنگین و همچنین طول زیاد ستون‌ها، اثرات مرتبه دوم در مقایسه با سازه‌های معمولی نمود بیشتری دارد. این مقاله با هدف بررسی و مقایسه پاسخ‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های نفتی سنگین طراحی شده به روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر با رویکرد ضوابط ANSI/AISC 360-10 انجام می‌شود.

## کلمات کلیدی

روش تحلیل مستقیم، ضریب طول مؤثر، اثرات مرتبه دوم، سازه‌های نفتی، تحلیل دینامیکی افزایشی

## Evaluation of Direct Analysis Method on Heavy Oil Structures by Incremental Dynamic Analysis

M.A. Shayanfar, A.R. Rezaeian, P. Jelokhany

### ABSTRACT

Direct analysis method is a new approach on stability design of steel structures. This method consider second order effects by applying lateral force and reducing stiffnesses, however the effective length method consider these effects by increasing column length. The direct analysis method takes the effective length factor unity for all members. Joints displacement, out of straightness and out of plumbness as initial imperfections can be modeled directly or alternatively by applying notional loads in design considerations. Inelasticity and geometric nonlinearities calculated by reducing member stiffness in design considerations. In heavy oil structures, significant gravity loads and column length lead to more second order effects in compare to typical structures. This study evaluates and compares nonlinear dynamic analysis responses of designed heavy oil structures in both direct analysis method and effective length method based on ANSI/AISC 360-10 provisions.

### KEYWORDS

Direct analysis method (DAM), Effective length method (ELM), Second order effects, Heavy oil structures, Incremental Dynamic Analysis (IDM)

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، shayanfar@iust.ac.ir

۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، alireza.rezaeian@kiau.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران، parsajelokhany@civileng.iust.ac.ir (نویسنده مسئول)



استاندارد ANSI/AISC 360 در ویرایش سیزدهم خود در سال ۲۰۰۵ روش تحلیل مستقیم را به عنوان روش جایگزین روش طول مؤثر و روش تحلیل مرتبه اول در پیوست خود ارائه داد. در سال ۲۰۱۰ روش تحلیل مستقیم به عنوان روش اصلی طراحی در استاندارد AISC معرفی شد و در مقابل دو روش دیگر به پیوست منتقل شدند [۱ و ۲]. در ادبیات فنی آیین‌نامه سه روش مذکور به عنوان روش‌های طراحی برای پایداری بیان شده‌اند. آنچه به عنوان پایداری مورد بحث است تعادل سازه و هر جزء آن در اثر شرایط تغییرشکلی است.

روش تحلیل مستقیم برخلاف روش طول مؤثر اثرات مرتبه دوم را با افزایش طول ستون در نظر نمی‌گیرد و در مقابل این اثرات را با اعمال بار جانبی و کاهش سختی در محاسبات خود لحاظ می‌کند. عیوب اولیه که در مورد گره و عضو مطرح می‌شود (جابه‌جایی گرهی در مورد گره و ناصافی و ناشاقولی در مورد عضو) با مدل‌سازی مستقیم نقص و یا در صورت عدم امکان، با اعمال بار فرضی در فرضیات طراحی لحاظ می‌شوند. همچنین در خصوص رفتار غیرالاستیک عضو با اعمال کاهش سختی در ملاحظات طراحی در نظر گرفته می‌شود [۱].

در اواخر سال ۱۹۹۹، AISC-SSRC Task Committee تصمیم به ارائه روشی در خصوص تحلیل پایداری برای طراحی سازه‌های فولادی با رویکرد استفاده از روش‌های کامپیوتری گرفت. همچنین در نظر موارد زیر نیز در روش جدید لحاظ شود:

- عدم نیاز به محاسبه ضریب طول مؤثر ستون،  $K$ ، در فرآیند طراحی که خود منشأ خطا و اشتباه مهندسان در طراحی سازه‌های پیچیده است،
- گسترش یک روش طراحی با همان رویکرد منطقی و سازگار برای تمامی سازه‌ها شامل قاب‌های مهاربندی، قاب‌های خمشی و سیستم قاب‌های مرکب.

روش تحلیل مستقیم با توجه به در نظر گرفتن اثرات ناشاقولی در روابط طراحی خود گستره بیشتری در طراحی

سازه‌ها را در برداشته و نتایج خود را به صورت دقیق و به دور از تقریبات موجود در دو روش طول مؤثر و روش تحلیل مرتبه اول بیان می‌دارد. همچنین این روش عدم قطعیت از مقاومت اعضاء را با اصلاح سختی اعمال نموده و از این‌رو شیوه‌ای جدید را از ابتدای فرآیند تحلیل بر سازه حاکم می‌کند [۲].

در سازه‌های نفتی سنگین تشدید اثرات مرتبه دوم به دلیل وجود ناشاقولی هندسی عضو در روند تحلیل و پایداری سازه دارای اهمیت است. روش‌های طول مؤثر و تحلیل مرتبه اول ناشاقولی عضو را در محاسبات خود در نظر نمی‌گیرند و این در حالی است که روش تحلیل مستقیم فرضیات خود را بر مبنای ناشاقولی و عدم قطعیت از مقاومت عضو بنا نموده و از این‌رو نتایج دقیق‌تری را در مقایسه با دو روش دیگر بیان می‌دارد [۲].

در این مقاله یک سازه نفتی نگهدارنده مجاری هوایی که به طور جاگانه توسط روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر طراحی شده است، به صورت تحلیل غیرخطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش تحلیل به صورت دینامیکی افزایشی (IDA) خواهد بود.

## ۲- روش تحقیق

مقایسه دو روش با طراحی سازه‌های نفتی که در یک جهت قاب مهاربندی و در جهت دیگر قاب خمشی هستند انجام می‌شود. در انتخاب المان‌های سازه دقت شده جابه‌جایی نسبی مرتبه دوم به جابه‌جایی نسبی مرتبه اول کوچکتر از مقدار ۱/۵ بوده تا استفاده از روش طول مؤثر امکان پذیر باشد. مقایسه حالت حدی دو روش در جدولی شامل وزن المان‌های به کار رفته در هر قاب به همراه میزان تغییر ارائه شده است. در انتها کنترل جابه‌جایی نسبی مطابق با ضوابط حالات حدی بهره‌برداری بیان می‌شود.

## ۳- روش طول مؤثر

در الزامات عمومی طراحی AISC و تفسیر آن در ویرایش سال ۲۰۰۵ روش طول مؤثر<sup>۱</sup> مستقیماً با نام خود عنوان

<sup>۱</sup> Effective Length Method (ELM)



نشده است. در بخش C1.1 تفسیر، از این روش به عنوان رویکردی سنتی اشاره شده است. ضوابط روش طول مؤثر در بخش C2.2a از الزامات عمومی طراحی AISC ارائه شده است. این روش اساساً برای قاب‌های خمشی به کار می‌رود که در آن باید ضریبی به نام ضریب طول مؤثر،  $K$ ، (یا به طور معادل تنش کمانشی الاستیک،  $F_e$ ) به منظور محاسبه مقاومت فشاری موجود در عضو تعیین شود. روش طول مؤثر برای قاب‌های مهارنشده و مهارشده قابل استفاده است. با این حال بخش C2.2a(4) (بخش ۳.۲.۷ از پیوست ۷ الزامات عمومی طراحی AISC ویرایش سال ۲۰۱۰) در قاب‌های مهاربندی مقدار ضریب طول مؤثر را برابر  $K=1/0$  توصیه می‌کند. استفاده از روش طول مؤثر برای سیستم‌های ترکیبی قدری دشوار می‌شود زیرا تعیین  $K$  باید بر اساس تحلیل کمانشی برخی از انواع سیستم‌های کلی‌تر انجام شود در حالی‌که روش سنتی ضریب طول مؤثر را به کمک جداول و فرمول‌ها به دست می‌دهد [۱].

روش طول مؤثر با نام خود در ویرایش سال ۲۰۱۰ از الزامات عمومی طراحی AISC معرفی گردید. الزامات روش طول مؤثر در بخش ۲.۷ از پیوست ۷ با عنوان روش‌های جایگزین برای طراحی پایداری ارائه شد [۱].

در هر تراز از قاب بررسی شود که اثرات مرتبه دوم حرکت جانبی که توسط نسبت جابه‌جایی نسبی مرتبه دوم به جابه‌جایی نسبی مرتبه اول ( $\Delta_{2nd}/\Delta_{1st}$  یا  $B_2$ ) اندازه‌گیری می‌شود، کوچکتر یا مساوی  $1/5$  باشد (بر مبنای یک مدل با مشخصات اسمی عضو). در صورتی‌که نیاز به اطمینان از این شرط باشد، سخت نمودن سازه یا استفاده از روش تحلیل مستقیم کارگشا خواهد بود.

روش حاضر طول مؤثر دارای تغییرات جدیدی است که حوزه کاری کمتری را در اختیار قرار داده و همچنین به دلیل استفاده از بارهای فرضی که به منظور محاسبه اثرات عیوب هندسی ناشاقولی عمل می‌کنند دقت بالاتری در پی خواهد داشت. بارهای فرضی با توجه به رابطه (۱) تعیین و تنها در ترکیب بارهای ثقلی روش طول مؤثر اعمال شوند.

$$N_i = 0.002\alpha Y_i \quad (1)$$

که در این رابطه:

$N_i$  = بار فرضی اعمال شده در تراز  $i$  ام،  
 $Y_i$  = بار ثقلی اعمال شده در تراز  $i$  ام که از ترکیب بارهای LRFD یا ترکیب بارهای ASD به دست می‌آید،  
 $\alpha = 1/0$  (LRFD) [۱].

مزایای روش روش طول مؤثر به شرح زیر است:

- ۱- روش طول مؤثر نسبت به روش تحلیل مستقیم حساسیت کمتری به دقت تحلیل مرتبه دوم دارد.
- ۲- در حالات ساده‌ای که محاسبه ضریب طول مؤثر آسان است، روش طول مؤثر نیاز به کار کمتری نسبت به روش تحلیل مستقیم دارد.

معایب روش روش طول مؤثر به قرار زیر است:

- ۱- روش طول مؤثر نیروهای داخلی را با دقت روش تحلیل مستقیم محاسبه نمی‌کند. با این حال، طراحی‌های بر مبنای روش طول مؤثر حدود قابل قبول مشخص شده توسط الزامات عمومی طراحی AISC را به دست می‌دهد.
- ۲- روش طول مؤثر نیاز به محاسبه ضریب طول مؤثر،  $K$ ، یا بار کمانشی نظیر ستون،  $P_e$ ، داشته که در بسیاری از قاب‌های خمشی می‌تواند دشوار و در معرض خطا باشد.
- ۳- کاربرد این روش به منظور جلوگیری از بروز خطاهای اساسی در تعیین نیروهای داخلی، محدود به اثرات کوچک مرتبه دوم ( $\Delta_{2nd}/\Delta_{1st}$  یا  $B_2 \leq 1/5$ ) بر مبنای مشخصات اسمی عضو است.  $B_2$  از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_{nt}}{\sum P_{e2}}} \geq 1 \quad (2)$$

که در این رابطه:

$P_{nt}$  = نیروی محوری مرتبه اول بر اساس ترکیب بارهای LRFD یا ASD با فرض عدم جابه‌جایی جانبی قاب

$\sum P_{e2}$  = مقاومت کمانش بحرانی حالت الاستیک طبقه که توسط تحلیل کمانشی جانبی به دست می‌آید.

۴- استفاده از این روش برای انجام و نیازهای اساسی قضاوت مهندسی در بسیار از انواع قاب‌ها، بسیار دشوار است. برخی از این قاب‌ها عبارت‌اند از:



اعضای با صلیبت خمشی، باید از ضریب  $0.8\tau_b$  استفاده نمود.

هنگامی که:

$$\begin{aligned} \tau_b &= 1 & : \alpha P_t / P_y \leq 0.5 \\ \tau_b &= 4(\alpha P_t / P_y) [1 - (\alpha P_t / P_y)] & : \alpha P_t / P_y > 0.5 \end{aligned} \quad (3)$$

استفاده از بارهای فرضی برای در نظر گرفتن اثرات ناشاقولی اعضاء یکی از فرضیات اساسی روش تحلیل مستقیم بوده که این کار همانند رابطه (۱) انجام می‌شود.

مطابق فرضیات روش تحلیل مستقیم، کنترل جابه‌جایی جانبی باد با استفاده از مشخصات اسمی عضو برای بارهای باد سطح سرویس (یعنی دوره بازگشت برای باد انتخاب شده) انجام می‌شود. توجه شود این بررسی در حوزه سرویس‌پذیری انجام می‌شود و الزام آیین‌نامه‌ای نمی‌باشد. در کنترل نرم‌افزاری، نتایج تحلیل بر اساس سختی‌های کاهش نیافته بررسی می‌شود. برای این منظور معکوس ضریب  $0.8$  که برابر  $1/25$  است به عنوان سطح مقطع مؤثر، ممان اینرسی مؤثر و ممان پیچشی مؤثر به برنامه معرفی می‌شود [۱].

مزایای روش تحلیل مستقیم به شرح زیر است:

۱- روش تحلیل مستقیم برای انواع قاب‌ها اعم از

مهاربندی، خمشی و ترکیبی قابل استفاده است.

۲- با توجه به این روش می‌توان تمامی ستون‌ها را با ضریب طول مؤثر  $K=1.0$  طراحی نمود. بنابراین بروز بسیاری از پیچیدگی‌های و عدم قطعیت‌ها در محاسبه صحیح این ضریب منتفی خواهد بود. این ویژگی بزرگترین مزیت برای طراح است.

۳- در این روش برای کل سیستم سازه سختی انتخاب می‌شود.

۴- همانند روش طول مؤثر این روش نیز اثرات ناپایدارکننده ناشاقولی قاب‌ها را توسط اعمال بارهای جانبی فرضی یا اعمال صریح ناشاقولی در نظر می‌گیرد.

۵- این روش با الزام به کاهش مشخصات عضو، توجه ویژه‌ای به «نرم‌شدگی» قاب مقاوم در برابر بار جانبی در حالت حدی نهایی دارد. همچنین وجود  $\tau_b$  در

قاب‌های مرکب مهاربندی و خمشی، قاب‌های پرتال با نیروهای فشاری زیاد در تیرها و رفته‌ها، قاب‌هایی که برخی از ستون‌های آن به دلیل نیروی بالابرنده دارای نیروی کششی است و ساختمان‌هایی که در آن‌ها بخش بزرگی از قاب مشارکت اندکی در کماتش یک بخش بحرانی از سازه دارد.

نتایج این روش در خطاهای ماکسیمم و متوسط بزرگتری نسبت به معیار پلاستیسیته توزیع شده در روش تحلیل مستقیم دارد [۲].

#### ۴- روش تحلیل مستقیم

روش تحلیل مستقیم<sup>۱</sup> برخلاف روش طول مؤثر اثرات مرتبه دوم را با افزایش طول ستون در نظر نمی‌گیرد و در مقابل این اثرات با اعمال بار جانبی و کاهش سختی در محاسبات خود لحاظ می‌کند. عیوب اولیه که در مورد گره و عضو مطرح هستند (جابه‌جایی گرهی در مورد گره و ناصافی و ناشاقولی در مورد عضو) با اعمال بار فرضی و یا مدل‌سازی مستقیم نقص در فرضیات طراحی لحاظ می‌شوند. همچنین رفتار غیرالاستیک عضو با کاهش سختی در عضو در ملاحظات طراحی اعمال می‌شود.

مطابق گفته استاندارد AISC روش تحلیل مستقیم را می‌توان برای تمامی انواع قاب، شامل قاب‌های خمشی، قاب‌های مهاربندی، قاب‌های ترکیبی و دیگر سیستم‌های دوگانه و مرکب نظیر دیوارهای برشی قاب‌های خمشی به کار برد. جزئیات این روش در فصل C از استاندارد AISC بیان شده است. این روش قادر است تمامی اثرات مرتبه دوم را بدون محدودیت اعمال کند. مطابق فصل C، انجام یک تحلیل دقیق مرتبه دوم ضروری است.

در ساخت مدل برای طراحی مشخصات اعضایی که در پایداری قاب مشارکت دارند به صورت  $EI^* = 0.8\tau_b EI$  و  $EA^* = 0.8EA$  کاهش داده می‌شود. پیشنهاد می‌شود مشخصات تمامی اعضایی که در سختی الاستیک مشارکت دارند در مقدار  $0.8$  ضرب شود که البته در خصوص

<sup>1</sup> Direct Analysis Method (DAM)



فرآیند تحلیل، اثرات غیرالاستیسیته ستون و قاب را به طور مستقیم پررنگ تر می‌کند.

۶- روش تحلیل مستقیم برآوردهایی دقیق تر از نیروهای داخلی موجود در سازه را ارائه می‌کند. در محاسبه نیروهای داخلی تیرها، تیر ستون‌ها و اتصالات، تأثیر عیوب هندسی و اثرات پایداری لحاظ می‌شود و این در حالی است که روش طول مؤثر چنین قابلیت‌هایی ندارد. این موضوع در تیرها و اتصالات با بارهای ثقلی نسبتاً کوچک که برای انتهای ستون‌ها قید دورانی ایجاد می‌کند اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. همچنین این برآوردهای دقیق می‌تواند در بررسی مقاومت تیر ستون‌هایی زیر اثر خمش تک‌محوری به طوری که در راستای خارج از صفحه خمش ضعیف هستند، به طور ویژه‌ای اهمیت پیدا نمایند. با این وجود، با تمام محدودیت‌ها، روش طول مؤثر روشی قابل قبول است. ۷- از این روش می‌توان در تحلیل و طراحی غیرالاستیک به خوبی تحلیل و طراحی الاستیک استفاده نمود (پیوست ۱ از استاندارد AISC و White و همکاران (۲۰۰۶)). همچنین استفاده از این روش در سیستم‌های ترکیبی نیز امکان‌پذیر است [۳].

معایب روش تحلیل مستقیم به شرح زیر است:

۱- روش تحلیل مستقیم الزام به اصلاح اضافی مشخصات عضو ( $EI^*$  و  $EA^*$ ) در ورودی مدل کامپیوتری دارد. همواره باید در استفاده صحیح از مشخصات اسمی در کنترل‌های مربوط به سرویس‌پذیری یا در کنترل ابعاد عضو با توجه به معیارهای آیین‌نامه دقت نمود.

۲- به کارگیری  $\tau_b$  گامی تکراری در فرآیند طراحی است؛ اگرچه می‌توان با اضافه نمودن بارهای فرضی به میزان  $0.001Y_i$  که در همه ترکیبات بارگذاری لحاظ می‌شود، این گام را حذف نمود. وجود این بار اضافی جانبی فرضی به تمامی اجزای موجود در سیستم مقاوم در برابر بار جانبی (و نه فقط به اعضای بار زیاد) تأثیری می‌گذارد.

۳- به کارگیری بارهای جانبی فرضی یک گام اضافی بوده که طراحان به آن عادت ندارند. البته برای بسیاری از قاب‌های ساختمانی، بارهای فرضی به عنوان یک بار جانبی حداقل بوده که تنها در ترکیب بارهای ثقلی لحاظ می‌شوند.

۴- روش تحلیل مستقیم حساسیت بیشتری به دقت تحلیل مرتبه دوم نسبت به روش طول مؤثر دارد. در سازه‌هایی که به طور کامل یا حدوداً توسط کماتش جانبی کنترل می‌شوند، تغییرات غیرخطی نیروها و لنگرهای داخلی که به عنوان حد پایداری هستند، موجب سریع‌تر نزدیک شدن مقادیر کنترل ظرفیت عضو (نظیر  $M_r/M_c$  برای اعضای خمشی و  $P_r/P_c$  برای اعضای فشاری) به مقدار واحد می‌شوند. در نتیجه ممکن است طراح به دلیل محاسبه کوچک یک مقدار برای کنترل‌های ظرفیتی، به اشتباه تصور کند اعضاء دارای ظرفیت کافی هستند، در حالی که در واقعیت برای اعضای بحرانی با اندک افزایشی در بارهای وارده بر سازه، ممکن است این کنترل‌ها به  $1/0$  بسیار نزدیک و یا از آن تجاوز نمایند [۴].

روش تحلیل مستقیم براساس مقادیری فرضی برای ناشاقولی بنا شده که با توجه به تکنولوژی ساخت و نصب امروزه، تا حد زیادی نامطمئن هستند (در قاب‌های فولادی معمول اغلب انتظار می‌رود ناشاقولی کوچکتر باشد). با این وجود بسیاری از قاب‌ها به مقادیر ناشاقولی مورد استفاده حساس نیستند. همچنین ناشاقولی اسمی  $0.002$  که براساس رواداری نصب ستون در استاندارد AISC<sup>1</sup> است، نتایجی سازگار با محاسبه عیوب هندسی ایجاد می‌کند که به تازگی به صورت غیرصریح در روش طول مؤثر گنجانده شده است [۵ و ۶].

با توجه به مبانی روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر، سازه‌های تحلیل شده در برابر یک دسته شتاب نگاشت تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) می‌شوند. رکوردهای زلزله از سایت peer مربوط به دانشگاه برکلی دریافت شده است. ضریب وارد به هر شتاب نگاشت از  $0.2$  شروع و با

<sup>1</sup> AISC code of standard practice



۲۰ مرحله افزایش به ضریب ۲/۳۵ ختم می‌شود. روند افزایش ضریب در مراحل ابتدایی با گام‌هایی ۰/۱ بوده و از گام دهم به انتها به ازای هر گام ۰/۰۵ افزایش می‌یابد [۶].

## ۵- تحلیل دینامیکی افزایشی

برای این تحلیل ۲۰ شتاب نگاشت متعلق به ۱۰ زلزله از سایت PEER انتخاب شد [۷]. فرآیند عملکرد این تحلیل با نوشتن حلقه برای رکوردهای تاریخچه زمانی، که شدت شتاب را در هر مرحله برای هر رکورد افزایش می‌دهد انجام شد. دستورالعمل FEMA p695 ارزیابی فروریزش را توسط تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) و تحلیل دینامیکی غیرخطی (Response History Analysis) تعریف می‌کند. تحلیل استاتیکی غیرخطی به اعتبار بخشیدن رفتار غیرخطی مدل و تحلیل دینامیکی غیرخطی تشخیص میانه ظرفیت فروریزش (Collapse Capacity) و حاشیه ایمنی فروریزش (CMR) می‌پردازد. میانه فروریزش شدتی از زمین‌لرزه است که در آن نیمی از رکوردهای یک سری، سازه دچار فروریختن نوعی از الگوها<sup>۱</sup> گردد. برای ارزیابی فروریزش لازم است که شدت رکوردهای زلزله به صورت پیوسته و مرحله‌ای افزایش یابد. به چنین فرآیندی از تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی افزایشی یا IDA<sup>۲</sup> گفته می‌شود. ایده روش IDA در ابتدا توسط Vamvatsikos و Cornell در سال ۲۰۰۲ مطرح شد [۸]. تا آن زمان ارزیابی عملکردی سازه‌ها تنها توسط روش پوش‌اور انجام می‌شد. آن‌ها اعلام داشتند ارزیابی خسارت سازه را می‌توان توسط یک یا چند رکورد مقیاس شده زلزله به دست آورد. با توجه به عدم وجود اثر میانقابی به دلیل نبود دیوار و همچنین صلب نبودن دیافراگم سقف‌ها، میرایی ذاتی قاب برابر ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود. تحلیل توسط برنامه تحلیلی OpenSees و به صورت سه بعدی انجام شده است. المان‌های تعریف شده از نوع المان غیرخطی تیر ستون با مقطع فایبر و ۵ نقطه بررسی هستند.

<sup>۱</sup> Archetype

<sup>۲</sup> Incremental Dynamic Analysis

برای آنکه بتوان از روند کار انجام شده معیاری در دست داشت دو فاکتور پیروید سازه و برش‌پایه حالت خطی، به عنوان مرجع در نظر گرفته شدند. برای این منظور پس از تحلیل خطی سازه مقدار پیروید مود اول ارتعاش و همچنین مقدار برش‌پایه از نرم‌افزار SAP2000 خوانده شد و با مقادیر هر تحلیل و نمودار IDA کنترل گردید. جدول (۱) مقدار پیروید و برش‌پایه سازه را در حالت خطی نشان می‌دهد. مقدار پیروید و برش‌پایه در نرم‌افزار OpenSees تا مرز دریافت کوچکتر مساوی ۰/۰۰۵ برداشت شده است.

برای ترسیم نمودارها، از طیف پاسخ مربوط به هر شتاب نگاشت برای به دست آوردن شتاب وارد بر سازه استفاده شده است. بدین ترتیب نمودار دریافت بر حسب شتاب طیفی نظیر مود اول سازه ترسیم شده است. شکل (۱) و (۲) به ترتیب نمودار IDA برای روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های (۳) تا (۵) مقایسه‌ای از نمودار IDA برای سه رکورد ارائه شده است.

جدول (۱): نتایج بررسی اولیه صحت مدل غیرخطی

| برش پایه<br>ton |       | پیروید<br>s |      |          |
|-----------------|-------|-------------|------|----------|
| ۶۵/۸۳           | ۶۹/۱۱ | ۱/۲۲        | ۱/۱۲ | SAP2000  |
| ۷۰/۰۰           | ۷۳/۰۰ | ۱/۲۴        | ۱/۱۳ | OpenSees |

## ۶- نتیجه گیری

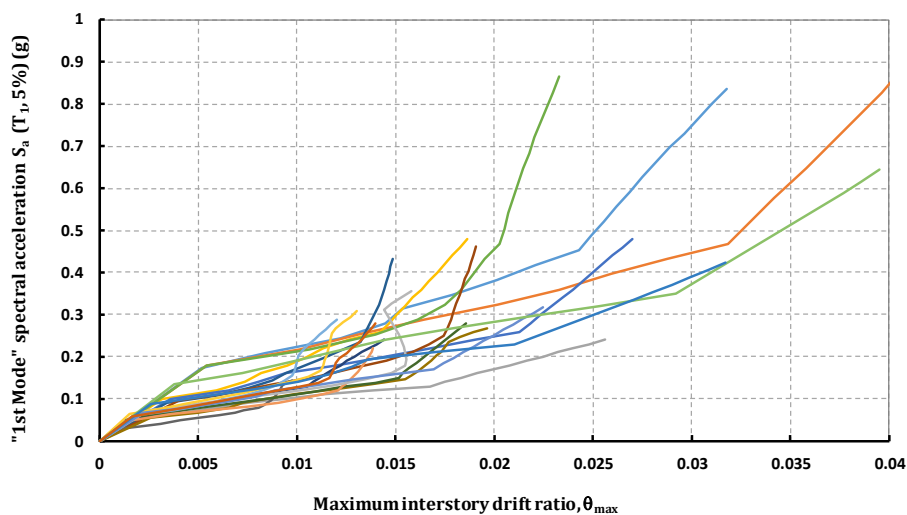
با توجه به تحلیل غیرخطی انجام شده برای سازه فولادی نفتی طراحی شده به دو روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر نتایج زیر حاصل می‌شود:

- تقریباً در تمامی نمودارها دریافت حالت خطی (شکستگی اول نمودار) روش طول مؤثر بیشتر از روش تحلیل مستقیم است.
- در بیشتر شتاب‌نگاشت‌ها فروریزش (شکستگی دوم نمودار) در روش طول مؤثر در آستانه پایین‌تری از شتاب طیفی نسبت به روش تحلیل مستقیم رخ می‌دهد.

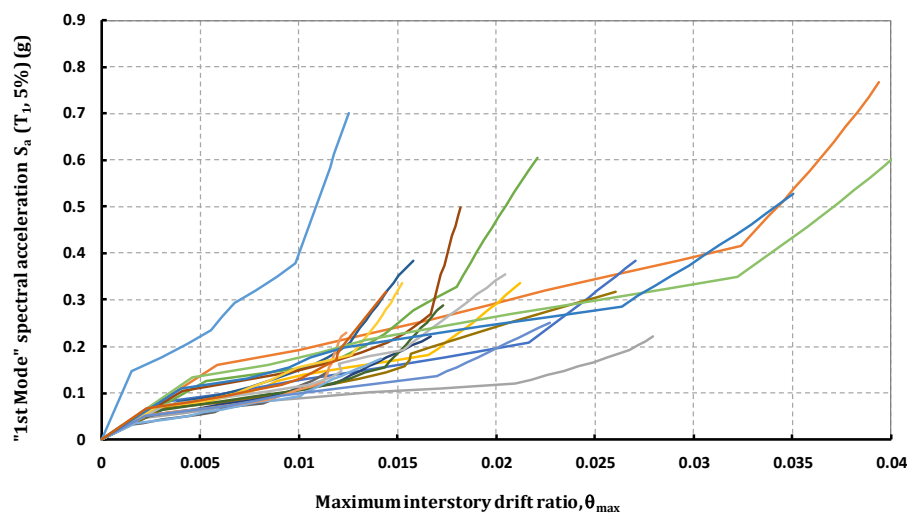


■ با توجه به یکسان بودن شیب در بخش میانی نمودار IDA، روند رفتار غیر خطی برای هر دو روش یکسان است.

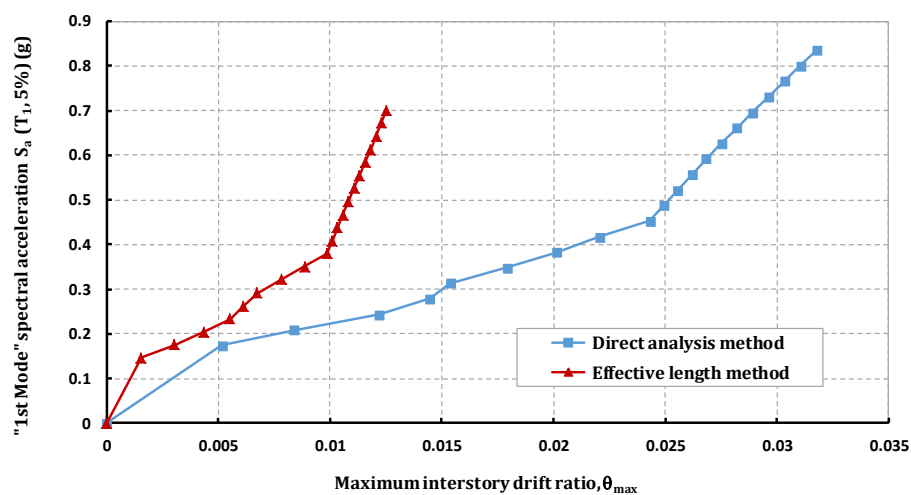
■ دریافت در لحظه فروریزش روش طول مؤثر برای بیشتر ۶۰٪ از نمودارها بیشتر از روش تحلیل مستقیم است.



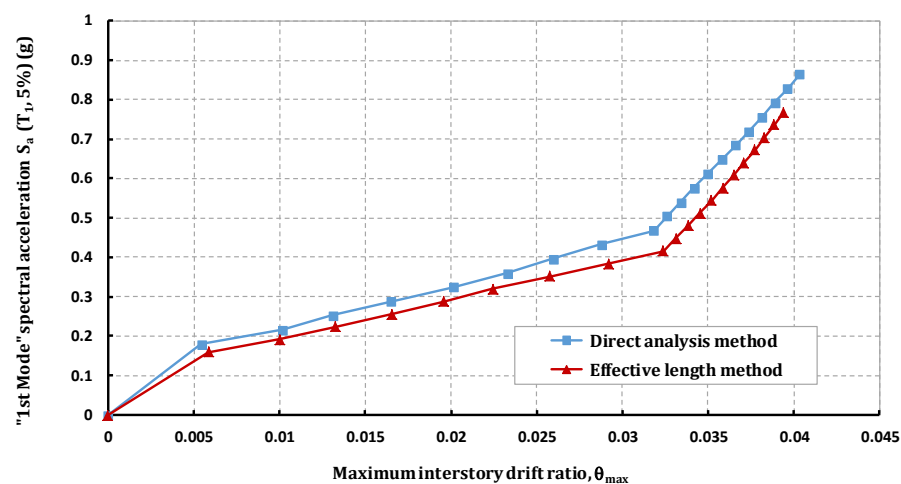
شکل (۱): نمودار IDA برای سازه به روش تحلیل مستقیم



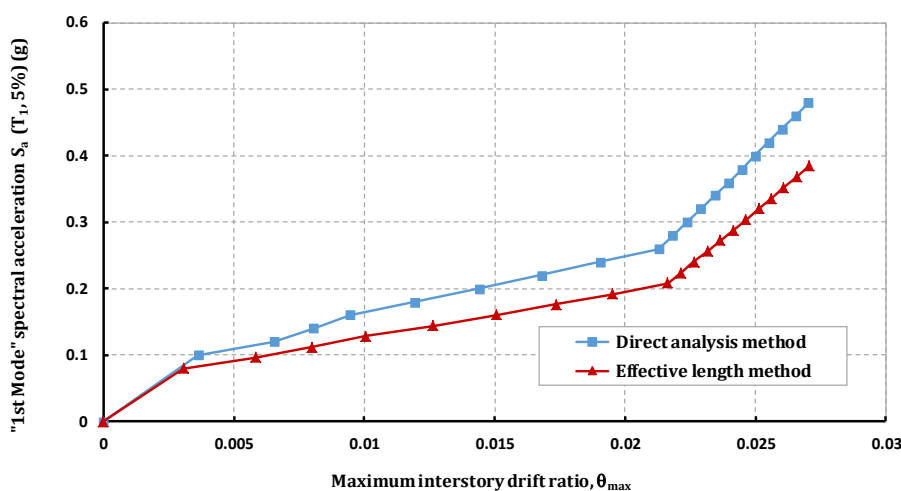
شکل (۲): نمودار IDA برای سازه به روش طول مؤثر



شکل (۳): نمودار IDA مقایسه‌ای برای رکورد شماره ۱



شکل (۴): نمودار IDA مقایسه‌ای برای رکورد شماره ۲



شکل (۵): نمودار IDA مقایسه‌ای برای رکورد شماره ۵





- [1] AISC (2010), "Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction.
- [2] Griffis, L.G. and White, D.W. (2013), "Stability Design of Steel buildings", American Institute of Steel Construction.
- [3] Nair, R.S. (2005), "Stability and Analysis, the 2005 AISC Specification offers new options for rational Stability design", Modern Steel Construction.
- [4] Louis, E. and Geschwindner, F. (2005), "Design Steel Your Way II: Efficient Analysis for Steel Design Using the 2005 AISC Specification", American Institute of Steel Construction.
- [5] White, D., Surovek, A. and Kim, A.C. (2007), "Direct Analysis and Design Using Amplified First-Order Analysis Part 1: Combined Braced and Gravity Framing Systems", Engineering Journal, pp. 305-322.
- [6] AISC (2010), "AISC Live Webinars", American Institute of Steel Construction.
- [7] PEER NGA-West2 Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [8] Vamvatsikos, D. and Cornell, A.C. (2002), "Incremental Dynamic Analysis", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.

