مقایسه و تشریح روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر در طراحی پایداری سازه‌های فولادی

بر اساس الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان

پایداری قاب‌های فولادی یکی از اساسی‌ترین موضوعات در طراحی سازه است. رفتار ستون‌ها و قاب‌ها تحت اثر نیروی محوری فشاری و بارهای جانبی می‌تواند منجر به تشدید تغییرمکان‌ها و در نهایت ناپایداری کلی سیستم شود. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در بخش ۱۰-۲-۱-۳ دو رویکرد اصلی را برای تحلیل و طراحی پایداری معرفی می‌کند: روش تحلیل مستقیم و روش طول مؤثر.

۱۰-۲-۱-۱ الزامات عمومی

تأمین پایداری کل سازه و تمامی اجزای آن از الزامات تحلیل و طراحی است. مطابق الزامات این بخش، پایداری کل سازه و تمامی اجزای آن در صورتی تأمین می‌شود که آثار ذکرشده در زیر به نحو مؤثری در تحلیل و طراحی آن‌ها لحاظ شده باشند.

(۱) تغییرشکل‌های محوری، خمشی و برشی اعضای سازه و تغییرشکل‌های سایر اجزاء (نظیر اتصالات) که در جابجایی سازه مؤثرند.

(۲) آثار مرتبه دوم (شامل آثار P-δ و P-Δ)

(۳) نواقص هندسی (شامل کجی و ناشاقولی)

(۴) کاهش سختی اعضا ناشی از رفتار غیرالاستیک و اثر تنش‌های پسماند

(۵) عدم قطعیت در برآورد سختی و مقاومت

روش تحلیل مورد استفاده باید تمامی آثار فوق را لحاظ نماید. به‌منظور حصول اطمینان از این اهداف، استفاده از دو روش "تحلیل مستقیم" و "طول مؤثر" در طراحی برای تأمین پایداری سازه‌های فولادی و مختلط مجاز است.

۱۰-۲-۱-۴ روش‌های تحلیل مرتبه دوم

در این مبحث استفاده از روش‌های تحلیلی زیر به‌عنوان روش‌های تحلیل مرتبه دوم مجاز دانسته شده است:

الف) تحلیل الاستیک مرتبهٔ دوم: تحلیل الاستیک مرتبهٔ دوم به تحلیل‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها روش تحلیل سیستم سازه‌ای الاستیک بوده، لیکن در حین انجام تحلیل، آثار مرتبهٔ دوم (شامل آثار $P\text{-}\delta$ و $P\text{-}\Delta$) در آن لحاظ می‌گردد.

ب) تحلیل مرتبه دوم از طریق تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول تشدیدیافته: در این مبحث استفاده از روش تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول تشدیدیافته به‌عنوان یک روش تحلیل مرتبه دوم مجاز دانسته شده است. الزامات این نوع روش تحلیل مرتبه دوم در پیوست ۳ این مبحث ارائه شده است.

تبصره ۲: در روش تحلیل الاستیک مرتبهٔ دوم (ذکرشده در بند ۱۰-۲-۱-۴-الف)، با ارضاء محدودیت‌های زیر می‌توان از آثار $P\text{-}\delta$ صرف‌نظر نمود، مشروط بر اینکه لنگرهای خمشی به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی مذکور در اعضای تحت اثر توأم نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی با ضریب B_1 (مطابق پیوست ۳) تشدید شده باشند:

(۱) بارهای ثقلی عمدتاً توسط ستون‌ها، دیوارها یا قاب‌های قائم تحمل شوند.

(۲) نسبت تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر تحلیل مرتبهٔ دوم به تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر تحلیل مرتبهٔ اول یا به‌طور تقریبی مقدار ضریب B_2 در تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول تشدیدیافته، در تمام طبقات و در راستای موردنظر کوچک‌تر یا مساوی 1.7 باشد.

(۳) حداکثر یک‌سوم بارهای ثقلی کل سازه توسط ستون‌های قاب‌های خمشی تحمل گردد.

TAVAT

بخش اول: روش تحلیل مستقیم (بند ۱۰-۲-۱-۳ الف)

۱۰-۲-۱-۳ روش‌های تحلیل و طراحی برای تأمین پایداری

الف) روش تحلیل مستقیم

در روش تحلیل مستقیم تمامی آثار ذکرشده در بخش ۱۰-۲-۱-۱ به‌صورت مستقیم در تحلیل سازه لحاظ می‌گردند. در این روش، مقاومت‌های موردنیاز براساس الزامات و محدودیت‌های بخش ۱۰-۲-۱-۵-۱ و مقاومت‌های موجود اعضا مطابق با بخش‌های ۱۰-۲-۲ تا ۱۰-۲-۹ تعیین می‌شوند. استفاده از این روش برای تمامی سازه‌های فولادی و مختلط مجاز است.

ب) روش طول مؤثر

استفاده از روش سنتی طول مؤثر به‌عنوان روش دیگر طراحی مطابق با الزامات و محدودیت‌های بند ۱۰-۲-۱-۵-۲ مجاز است. در این روش نیز مقاومت‌های موجود اعضا مطابق با بخش‌های ۱۰-۲-۲ تا ۱۰-۲-۹ تعیین می‌شوند.

فلسفه روش

در روش تحلیل مستقیم، ناپایداری سیستم مستقیماً در مدل تحلیلی لحاظ می‌شود. به جای استفاده از ضریب طول مؤثر **K** برای انتقال اثر ناپایداری به عضو، رفتار واقعی قاب با در نظر گرفتن اثرات مرتبه دوم، نواقص اولیه هندسی و کاهش سختی اعضا تحلیل می‌گردد.

الزامات آیین‌نامه‌ای (بند ۱۰-۲-۱-۵-۱)

۱۰-۲-۱-۵-۱ محدودیت‌ها و الزامات روش تحلیل مستقیم

برای تعیین مقاومت‌های موردنیاز اعضا و طراحی آن‌ها و تحلیل و طراحی به روش تحلیل مستقیم، باید محدودیت‌ها و الزامات زیر تأمین شوند:

الف- محدودیت‌ها

در تحلیل و طراحی به روش تحلیل مستقیم هیچ‌گونه محدودیتی وجود ندارد.

ب- الزامات

(۱) تحلیل سازه مطابق بند ۱۰-۲-۱-۴ براساس یکی از روش‌های تحلیلی مرتبه دوم باشد.

(۲) مطابق الزامات بند ۱۰-۲-۱-۵-۱-۱ آثار نواقص هندسی اولیه (شامل کجی و ناشاقولی) در تحلیل مرتبه دوم منظور شود.

(۳) مطابق الزامات بند ۱۰-۲-۱-۵-۱-۲ تحلیل مرتبه دوم براساس سختی کاهش‌یافته اعضا صورت گیرد.

(۴) مقاومت موجود کلیهٔ اعضای دارای بار محوری فشاری با ضریب طول مؤثر یک (K=1) تعیین شود.

1- انجام تحلیل مرتبه دوم

تحلیل ســازه باید مطابق بند ۱۰-۲-۱-۴ به صــورت مرتبه دوم انجام شــود و اثرات **P-Δ** و **P-δ** در تحلیل منظور گردد.

2- لحاظ کردن نواقص اولیه هندسی

مطابق بند ۱۰-۲-۱-۵-۱-۲ اثر کجی اولیه و ناشاقولی اعضا باید در تحلیل وارد شود. این کار می‌تواند با مدل‌سازی مستقیم یا اعمال بار جانبی فرضی انجام گیرد.

۱۰-۲-۱-۵-۱-۲ کاهش سختی اعضا

در تحلیل و طراحی به روش تحلیل مستقیم برای تعیین مقاومت‌های موردنیاز در تحلیل مرتبه دوم، باید به شرح زیر از ضرایب کاهش سختی استفاده شود:

(۱) ضریب کاهش 0.8 برای کلیهٔ سختی‌هایی که در پایداری سازه مؤثرند. اعمال این ضریب کاهش برای کلیهٔ سختی‌های تمامی اعضا، حتی اگر در پایداری سازه نقشی نداشته باشند، نیز مجاز است.

(۲) علاوه بر ضریب کاهش 0.8 یک ضریب کاهش اضافی τ_b نیز به شرح زیر در سختی خمشی اعضایی که در پایداری سازه مؤثر هستند:

$$(EI)^* = 0.8\,\tau_b EI \qquad (۲-۱-۲-۱۰)$$

$(EI)^*$ = صلبیت خمشی کاهش‌یافتهٔ عضو

E = مدول الاستیسیتهٔ فولاد

I = ممان اینرسی مقطع عضو حول محور خمش

τ_b = ضریب کاهش اضافی سختی خمشی مطابق رابطهٔ زیر:

$$(EI)^* = 0.8\,\tau_b EI$$

$$\tau_b = \begin{cases} 1.0 & \alpha\dfrac{P_r}{P_y} \le 0.5 \\ 4\alpha\dfrac{P_r}{P_y}\left(1-\dfrac{\alpha P_r}{P_y}\right) & \alpha\dfrac{P_r}{P_y} > 0.5 \end{cases} \qquad (۳\text{-}۱\text{-}۲\text{-}۱۰)$$

$$\alpha = 1.0 \text{ (LRFD)} \quad \text{و} \quad \alpha = 1.6 \text{ (ASD)}$$

در رابطهٔ ۳-۱-۲-۱۰، P_r مقاومت محوری فشاری موردنیاز و P_y مقاومت تسلیم محوری عضو ($P_y=A_gF_y$) است. درصورتی‌که عضو فشاری لاغر باشد، در تعیین مقاومت تسلیم محوری باید از مساحت مؤثر مقطع (A_e) استفاده شود.

استثناء: در اعضای با مقطع مختلط پرشده با بتن یا محاط در بتن، مقدار τ_b باید برابر 0.8 در نظر گرفته شود.

(۳) وقتی از روش بار جانبی فرضی برای مدل‌سازی نواقص هندسی اولیه استفاده شده است، به‌جای استفاده از τ_b متغیر در رابطهٔ ۱۰-۲-۱-۳ به منظور کاهش اضافی سختی خمشی اعضا، می‌توان مقدار τ_b را برای کلیهٔ نسبت‌های $\frac{P_r}{P_y}$ برابر یک فرض کرد، مشروط بر اینکه یک بار جانبی فرضی اضافی برابر $0.001\,Y_i$ به کلیهٔ طبقات ساختمان اعمال شود. این بار جانبی فرضی اضافی باید در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری به همراه بارهای جانبی و بارهای جانبی فرضی در اثر نواقص هندسی اولیه در نظر گرفته شود. مورد ۲ از بند ۱۰-۲-۱-۵-۱-۱ شامل این بار جانبی اضافی نمی‌شود.

(۴) چنانچه در یک سیستم سازه‌ای برای تأمین پایداری آن از اعضایی با مصالح دیگری به جزء فولاد استفاده شده باشد و مقررات سازه‌ای مربوط به نوع مصالح ضریب کاهش سختی کوچک‌تری (کاهش سختی بیشتری) را الزام کرده باشد، برای آن نوع اعضا باید ضریب کاهش سختی کوچک‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

3- کاهش سختی اعضا

طبق بند ۱۰-۲-۱-۵-۱-۲ سختی اعضا باید کاهش یابد:

EI* = 0.8 τb EI

EA* = 0.8 EA

تعریف ضریب **τb**:

اگر **αPr/Py ≤ 0.5** باشد، **τb = 1**

اگر **αPr/Py > 0.5** باشد:

τ b = 4α(Pr/Py)(1 - αPr/Py)

در طراحی **LRFD** مقدار **α** برابر ۱ و در **ASD** برابر ۱.۶ است.

تبصره: در روش تحلیل مستقیم کاربرد سختی کاهش‌یافته فقط در تحلیل مرتبه دوم و برای تعیین مقاومت‌های موردنیاز اعضا محدود می‌گردد و برای سایر مقاصد طراحی (نظیر کنترل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، کنترل خیز تیرها، کنترل ارتعاش اعضا و کف‌ها و محاسبهٔ زمان تناوب اصلی ساختمان) نباید از ضرایب کاهش سختی استفاده شود.

4- تعیین ضریب طول مؤثر

مطابق بند ۱۰-۲-۱-۵-۱ برای تعیین مقاومت اسمی فشاری، مقدار **K=1** در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت کاربرد

روش تحلیل مستقیم مطابق جدول ۱۰-۲-۱-۱ فاقد محدودیت نسبت دریفت بوده و برای تمامی سیستم‌های سازه‌ای مجاز است.

بخش دوم: روش طول مؤثر (بند ۱۰-۲-۱-۳ ب)

فلسفه روش

در این روش اثر ناپایداری سیستم از طریق ضریب طول مؤثر **K** به عضو منتقل می‌شود. ستون‌ها با طول مؤثر **KL** طراحی می‌شوند.

۱۰-۲-۱-۵-۲ محدودیت‌ها و الزامات روش طول مؤثر

برای تعیین مقاومت‌های موردنیاز اعضا و طراحی آن‌ها در تحلیل و طراحی به روش طول مؤثر محدودیت‌ها و الزامات زیر باید تأمین شوند:

الف- محدودیت‌ها

(۱) بارهای ثقلی عمدتاً توسط ستون‌ها، دیوارها یا قاب‌های قائم تحمل شوند.

(۲) نسبت تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر مرتبه دوم به تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر مرتبه اول یا به‌طور تقریبی مقدار ضریب تشدید B_2 در تحلیل الاستیک مرتبه اول تشدیدیافته، در کلیهٔ طبقات کوچک‌تر یا مساوی 1.5 باشد.

محدودیت‌های استفاده (بند ۱۰-۲-۱-۵-۲)

1- بارهای ثقلی عمدتاً باید توسط سیستم قائم تحمل شوند.

2- شرط پایداری قاب:

$\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.5$ برای تمامی طبقات

در صورت تجاوز از این مقدار، استفاده از روش طول مؤثر مجاز نیست.

الزامات تحلیلی

ب- الزامات

(۱) تحلیل سازه مطابق بند ۱۰-۲-۱-۴ براساس یکی از روش‌های تحلیلی مرتبه دوم و بدون در نظر گرفتن هرگونه کاهش سختی باشد.

(۲) آثار نواقص هندسی اولیه (شامل کجی و ناشاقولی اعضا) مطابق ملاحظات بند ۱۰-۲-۱-۵-۱ در تحلیل مرتبه دوم منظور گردد.

(۳) مقاومت موجود کلیهٔ اعضای دارای بار محوری فشاری براساس ضریب طول مؤثر (K) تعیین شود. ضریب طول مؤثر اعضا (K) متناسب با نوع سیستم باربر باید براساس پیوست ۲ تعیین شود.

1- انجام تحلیل مرتبه دوم بدون کاهش سختی اعضا

2- تعیین ضریب طول مؤثر **K ≥ 1** مطابق نوع سیستم باربر

در تحلیل مرتبه اول تشدیدی:

برای تعیین **B1: K1 = 1**

برای تعیین **B2: K2 ≥ 1**

مقایسه بنیادی دو روش

در روش تحلیل مستقیم کاهش سختی اعمال می‌شود و **K** برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و محدودیت دریفت وجود ندارد.

در روش طول مؤثر کاهش سختی وجود ندارد، **K** محاسبه می‌شود و شرط دریفت **Δ2nd/Δ1st ≤ 1.5** باید برقرار باشد.

۱۰-۲-۱-۶ جدول خلاصه‌شده از روش‌های تحلیل و طراحی

خلاصهٔ روش‌های تحلیل و طراحی موردبحث فوق در جدول ۱۰-۲-۱-۱ برای سهولت استفادهٔ کاربران ارائه شده است.

جدول ۱۰-۲-۱-۱: الزامات و محدودیت‌های روش‌های طراحی

الف- روش تحلیل مستقیم

نوع تحلیل	کاهش سختی	محدودیت	الزامات
تحلیل الاستیک مرتبه دوم	کاهش سختی با ضریب τ متغیر	بدون محدودیت	انجام تحلیل مرتبه دوم اعمال کاهش سختی $EI^* = 0.8\tau_b EI$ $EA^* = 0.8EA$ $\tau_b = \begin{cases} 1.0 & \alpha\frac{P_r}{P_y} \le 0.5 \\ 4\alpha\frac{P_r}{P_y}\left(1-\frac{\alpha P_r}{P_y}\right) & \alpha\frac{P_r}{P_y} > 0.5 \end{cases}$ $\alpha = 1.0$ (LRFD) و $\alpha = 1.6$ (ASD) ضرایب B_1 و B_2 استفاده نمی‌شود. K=1 (برای تعیین P_n) اعمال بارهای جانبی فرضی در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری. اگر $\Delta_{2nd}/\Delta_{1st} \le 1.7$ باشد، بارهای جانبی فرضی فقط در ترکیبات بارهای ثقلی وارد می‌گردند.
	کاهش سختی با ضریب τ ثابت	بدون محدودیت	انجام تحلیل مرتبه دوم اعمال کاهش سختی $EI^* = 0.8\tau_b EI$ $EA^* = 0.8EA$ $\tau_b = 1$ ضرایب B_1 و B_2 استفاده نمی‌شود. K=1 (برای تعیین P_n) اعمال بارهای جانبی فرضی در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری. اگر $\Delta_{2nd}/\Delta_{1st} \le 1.7$ باشد، بخش 0.002 بارهای جانبی فرضی، فقط در ترکیبات بارهای ثقلی وارد می‌شود، ولی بخش 0.001 ناشی از τ_b ثابت، در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری وارد می‌گردد.

ادامهٔ جدول ۱۰-۲-۱-۱: الزامات و محدودیت‌های روش‌های طراحی

ب- روش تحلیل مستقیم

نوع تحلیل	کاهش سختی	محدودیت	الزامات
تحلیل الاستیک مرتبه اول تشدیدیافته	کاهش سختی با ضریب τ متغیر	بدون محدودیت	انجام تحلیل مرتبه اول اعمال کاهش سختی $EI^* = 0.8\tau_b EI$ $EA^* = 0.8EA$ $\tau_b = \begin{cases} 1.0 & \alpha\frac{P_r}{P_y} \le 0.5 \\ 4\alpha\frac{P_r}{P_y}\left(1-\frac{\alpha P_r}{P_y}\right) & \alpha\frac{P_r}{P_y} > 0.5 \end{cases}$ $\alpha = 1.0$ (LRFD) و $\alpha = 1.6$ (ASD) K_1=1 (برای تعیین B_1) K_2=1 (برای تعیین P_n و B_2) اعمال بارهای جانبی فرضی در تمامی ترکیبات بارگذاری. اگر $B_2 \le 1.7$ باشد، بارهای جانبی فرضی فقط در ترکیبات بارهای ثقلی وارد می‌شوند.
	کاهش سختی با ضریب τ ثابت	بدون محدودیت	انجام تحلیل مرتبه اول اعمال کاهش سختی $EI^* = 0.8\tau_b EI$ $EA^* = 0.8EA$ $\tau_b = 1$ K_2=1 (برای تعیین P_n) اعمال بارهای فرضی در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری. اگر $B_2 \le 1.7$ باشد، بخش 0.002 بارهای جانبی فرضی، فقط در ترکیبات بارگذاری ثقلی وارد می‌شود، ولی بخش 0.001 ناشی از τ_b ثابت، در کلیهٔ ترکیبات بارگذاری وارد می‌گردد.

TAVAT

ادامهٔ جدول ۱۰-۲-۱-۱: الزامات و محدودیت‌های روش‌های طراحی

پ- روش طول مؤثر

نوع تحلیل	محدودیت	الزامات
تحلیل الاستیک مرتبه دوم	$\Delta_{2nd}/\Delta_{1st} \leq 1.5$ (برای تمامی طبقات)	انجام تحلیل مرتبه دوم عدم اعمال کاهش سختی $K= K_2 \geq 1$ (برای تعیین P_n) اعمال بارهای جانبی فرضی در تمامی ترکیبات بارگذاری. اگر $\Delta_{2nd}/\Delta_{1st} \leq 1.7$ باشد، بارهای جانبی فرضی فقط در ترکیبات بارگذاری ثقلی وارد می‌شوند.
تحلیل الاستیک مرتبه اول تشدیدیافته	$\Delta_{2nd}/\Delta_{1st} \leq 1.5$ (برای تمامی طبقات)	انجام تحلیل مرتبه اول عدم اعمال کاهش سختی محاسبهٔ B_1 برای $K_1=1$ محاسبهٔ B_2 برای $K_2 \geq 1$ $K= K_2 \geq 1$ (برای تعیین P_n) اعمال بارهای جانبی فرضی در تمامی ترکیبات بارگذاری. اگر $B_2 \leq 1.7$ باشد، بارهای جانبی فرضی فقط در ترکیبات بارگذاری ثقلی وارد می‌شوند.

جمع‌بندی

روش تحلیل مستقیم یک رویکرد سیستم‌محور و دقیق‌تر است که رفتار واقعی قاب را مدل می‌کند. روش طول مؤثر یک روش کلاسیک و عضومحور است که اثر ناپایداری را به عضو منتقل می‌کند. انتخاب بین این دو روش باید بر اساس میزان پایداری سیستم، ارتفاع سازه، حساسیت به دریفت و پیچیدگی سیستم باربر انجام گیرد.