

پیشگفتار

ایده مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های رسمی منتشر شده برای استفاده از تحلیل غیرخطی مرتبه دوم (SOA)^۱ یا «پیشرفته» در کارگروه ۲۹ شورای تحقیقات پایداری سازه (SSRC)^۲، تحلیل غیرخطی مرتبه دوم برای طراحی قاب، به ریاست Donald W. White آغاز شد. کارگروه گزارش «روش‌های مبتنی بر مفصل پلاستیکی برای تحلیل و طراحی پیشرفته قاب‌های فولادی» را در سال ۱۹۹۳ منتشر کرد. تلاش فعلی این است که دانش به‌دست‌آمده از گزارش قبلی و تلاش‌های تحقیقاتی بعدی در یک مجموعه منسجم از دستورالعمل‌ها که تحلیل پیشرفته را در چارچوب مشخصات AISC فعلی قرار می‌دهد درحالی‌که به‌اندازه کافی برای انطباق با سایر استانداردها و ویرایش‌های آینده AISC سازگار باشد. این دستورالعمل‌ها برای ارائه یک روش برای تحلیل پیشرفته طراحی شده‌اند که به طراح توصیه‌های خاصی در مورد دقت تحلیل، حداقل الزامات مدل‌سازی، در نظر گرفتن حالت‌های حدی، قابلیت سرویس‌دهی و کاهش بار زنده ارائه می‌دهد، درحالی‌که آزادی عمل را برای عقیده مهندس طراح فراهم می‌کند.

اعضای کمیته دخیل در تدوین دستورالعمل‌ها عبارت‌اند از:

- | | | |
|------------------|----------------|--|
| • اندریا سورووک | Andrea Surovek | - ریاست دانشکده معادن و فناوری داکوتای جنوبی |
| • بولنت آلمدار | Bulent Alemdar | - شرکت بنتلی سیستمز (Bentley Systems) |
| • دینار کاموتیم | Dinar Camotim | - دانشگاه فنی لیسبون |
| • جروم هاجار | Jerome Hajjar | - دانشگاه نورث‌ایسترن |
| • لیپ ته | Lip Teh | - دانشگاه ولونگونگ |
| • دونالد وایت | Donald White | - مؤسسه فناوری جورجیا |
| • رونالد زیمنیان | Ronald Ziemian | - دانشگاه بوکنل |

سپاسگزاری‌ها

توسعه این گزارش توسط کمک مالی پروژه ویژه مؤسسه مهندسين سازه ASCE حمایت شد و تحت هدایت کمیته فنی فلزات SEI در مورد اعضای سازه (سابقاً کمیته اعضای فشاری و خمشی) تکمیل شد. مشارکت‌های تحقیقاتی اعضای گذشته و فعلی کارگروه سابق 29 SSRC و کارگروه فعلی ۴ در تهیه این گزارش بسیار مؤثر بود.

1 - second-order inelastic analysis

2 - Structural Stability Research Council (SSRC)

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمات	۷
۱- مقدمه	۹
۱-۱ تحلیل پیشرفته چیست؟	۹
۲-۱ انگیزه و دامنه کاربرد	۱۲
۳-۱ الزامات اساسی برای دستورالعمل‌ها	۱۳
۴-۱ محدودیت‌های دستورالعمل	۱۴
فصل دوم : قواعد طراحی	۱۷
۲- قواعد طراحی	۱۹
۱-۲ الزامات تحلیل	۱۹
۱-۱-۲ دقت تحلیل موردنیاز	۱۹
۲-۱-۲ رویکردهای قابل قبول تحلیل	۲۰
۲-۲ مدل سازی	۲۰
۱-۲-۲ غیرار تجاعی	۲۰
۱-۲-۲-۱ تنش‌های پسماند	۲۰
۲-۲-۲ نواقص هندسی	۲۰
۱-۲-۲-۲ خروج از شاقولیات	۲۱
۲-۲-۲-۲ غیرمستقیم بودن	۲۱
۳-۲-۲ اتصالات تیر به ستون	۲۲
۳-۲ حالت‌های حدی	۲۲
۴-۲ ضریب مقاومت	۲۲
۲-۵ قابلیت سرویس دهی	۲۳
۱-۵-۲ سطوح بار مناسب	۲۳
۲-۵-۲ محدودیت در غیر الاستیسیته و دوران پلاستیک	۲۳
۶-۲ کاهش بار زنده	۲۳
فصل سوم : پیشینه و تفسیر	۲۷
۳- پیشینه و تفسیر	۲۹
۱-۳ پیشینه روش‌های تحلیل	۲۹
۱-۱-۳ روش‌های پلاستیسیته توزیع شده	۲۹
۲-۱-۳ روش‌های مفصل پلاستیک خلاصه شده	۳۲
۱-۲-۱-۳ رویکرد مدول مماسی اصلاح شده	۳۲
۲-۲-۱-۳ رویکرد مستقیم مفصل الاستیک - پلاستیک	۳۳

۳-۲	پیشینه در مورد غیرارتجاعی ات.....	۳۶
۳-۲-۱	غیرارتجاعی ات در مدل های پلاستیسیته توزیع شده.....	۳۶
۳-۲-۲	غیرارتجاعی ات در مدل های پلاستیسیته متمرکز (مفصل پلاستیک).....	۳۷
۳-۳	پیشینه نقایص.....	۳۸
۳-۴	پیشینه مدل سازی اتصال.....	۴۰
۳-۵	پیشینه حالت های حدی AISC.....	۴۱
۳-۶	پیشینه ضرایب مقاومت.....	۴۲
۳-۷	پیشینه قابلیت سرویس دهی.....	۴۳
۳-۸	پیشینه کاهش بار زنده.....	۴۳
۴۵	فصل چهارم : معیارها.....	
۴-۴	معیارها.....	۴۷
۴-۱	ستون های معیار.....	۴۸
۴-۲	قاب های معیار: اسمی.....	۵۲
۴-۲-۱	قاب صنعتی Maleck.....	۵۲
۴-۲-۲	قاب Vogel.....	۵۴
۴-۳	قاب های معیار: ضریب دار.....	۵۵
۴-۳-۱	قاب Ziemian.....	۵۵
۴-۳-۲	قاب خمشی نامتقارن.....	۵۷
۴-۳-۳	قاب مهاربندی شده نامتقارن.....	۶۰
۶۳	فصل پنجم : منابع.....	
۶۵	منابع.....	

۱- مقدمه

این سند توصیه‌هایی را برای استفاده از تحلیل غیرخطی^۳ مرتبه دوم در طراحی و ارزیابی سیستم‌های قاب فولادی ارائه می‌کند. این دستورالعمل‌ها می‌توانند به مهندسان، توسعه‌دهندگان خاص و توسعه‌دهندگان نرم‌افزار تحلیل سازه در درک الزامات پایه برای بدست آوردن مستقیم مقاومت اعضا و سیستم در حالت حدی در هنگام استفاده از تحلیل غیرخطی مرتبه دوم کمک کنند. در طراحی مرسوم، ظرفیت بار سیستم به صورت عضو به عضو ارزیابی می‌شود و ظرفیت باربری سیستم را به مقاومت ضعیف‌ترین عضو محدود می‌کند. روش دیگر، یک روش "تحلیل پیشرفته" به جای محدود کردن مقاومت سیستم سازه‌ای در سطوح بار طراحی توسط اولین شکست عضو، بر مقاومت سیستم سازه تمرکز دارد. این دستورالعمل‌ها شامل الزامات تحلیل و مدل‌سازی و همچنین ملاحظات طراحی (به عنوان مثال، ضریب مقاومت پیشنهادی) می‌شود، به گونه‌ای که رفتار و مقاومت سیستم کلی و حالت‌های حدی تک‌تک اعضا بدون نیاز به بررسی‌های جداگانه مقاومت عضو با مشخصات درون صفحه بررسی می‌شوند.

۱-۱ تحلیل پیشرفته چیست؟

طراحی سیستم‌های اسکلت فلزی در اکثر استانداردهای طراحی بین‌المللی مستلزم استفاده از نیروهای مرتبه دوم در هنگام بررسی مقاومت است. این نیروها معمولاً مستقیماً از یکی از انواع تحلیل‌های خطی زیر به دست می‌آیند:

- تحلیل مرتبه دوم که بهصراحت شامل اثرات مرتبه دوم در الگوریتم تحلیل است و به یک راه حل تکرارشونده افزایشی نیاز دارد.
- یک تحلیل تقریبی مرتبه دوم که در آن اثرات مرتبه دوم با برخی روش ها در چارچوب یک تحلیل خطی تقریب می شوند (به عنوان مثال رویکردهای تحلیل $P-\Delta$)؛ یا
- یک تحلیل خطی مرتبه اول که در آن نیروهای به دست آمده از تحلیل در ضرایب مقاومت ضرب می شوند تا نتایج تقریبی مرتبه دوم به دست آید.

سپس نیروها و گشتاورهای مرتبه دوم در بررسی های مقاومت اعضا استفاده می شوند. توجه به این نکته ضروری است که ظرفیت سیستم هرگز مستقیماً در این رویکرد بررسی نمی شود، بلکه هر عضو به طور جداگانه بررسی می شود تا مشخص شود که آیا ظرفیت آن عضو بیش از حد بوده است یا خیر. به عبارت دیگر، ظرفیت سیستم سازه ای اساساً توسط اولین عضوی محدود می شود تا به حداکثر ظرفیت خود برسد یا در بررسی مقاومت آن شکست رخ دهد. از آنجا که مقاومت سیستم به عنوان یک کل هرگز به طور مستقیم ارزیابی نمی شود، توانایی سیستم برای توزیع مجدد غیرخطی بارها در حداکثر سطوح بار طراحی به طور کلی در نظر گرفته نمی شود. علاوه بر این، عملکرد کلی سازه به طور مستقیم، در روش هایی که بر مقاومت اجزای منفرد متمرکز هستند به جای تمرکز بر رفتار سیستم ارزیابی نمی شود. درحالی که برخی از رویکردهای تقریبی مبتنی بر سیستم ممکن است در طراحی سازه های کوچک تر، مانند بررسی مکانیسم های پلاستیکی استفاده شوند، اثرات پایداری بر مقاومت غیرالاستیک کامل سازه های بزرگ را تنها می توان با استفاده از روش تحلیل غیرخطی و غیرارتجاعی به دقت ارزیابی کرد. درحالی که مشخصات کنونی عمدتاً بر نتایج تحلیل مرتبه دوم الاستیک که در بالا توضیح داده شد متکی است، در ۲۵ سال گذشته مقالات زیادی در مورد ثبت رفتار سیستم های قاب فولادی از طریق استفاده از تحلیل غیرخطی و غیرارتجاعی قدرتمند تولید شده است.

استفاده از تحلیل غیرخطی و غیرارتجاعی برای تعیین مستقیم مقاومت و پایداری کلی سیستم قاب فولادی معمولاً در مقالات به عنوان "تحلیل پیشرفته" نامیده می شود و به عنوان "هر تحلیلی که به طور دقیق اثرات رفتاری مرتبط با وضعیت های حد اولیه اعضا و سیستم را نشان می دهد تا جایی که بررسی های مشخصات مربوطه جایگزین شوند." تعریف می شود (White و Chen ۱۹۹۳). این کار با ترکیب ویژگی های بنیادی و رفتار مرتبط با اکثر حالت های حدی اعضا به طور مستقیم در تحلیل انجام می شود. هنگامی که این اثرات مستقیماً در تحلیل گرفته می شود، بررسی اعضای جداگانه برای آن حالت های حدی لازم نیست. هر حالت حدی که مستقیماً مدل سازی نمی شود، همچنان باید از طریق بررسی های مقاومت اعضا یا اجزاء جداگانه محاسبه شود. بسته به پیچیدگی عناصر عضو مورد استفاده در تحلیل، این حالت های حدی ممکن

است شامل اثرات کمانش خارج از صفحه، پیچشی یا موضعی باشد. علاوه بر این، حالت‌های حدی مربوط به گسیختگی مستقیماً بدست نمی‌آیند.

دهه‌ها تحقیق، پیشرفت‌های قابل توجهی در قابلیت‌ها برای به‌دست‌آوردن پاسخ قاب کارآمد با استفاده از تحلیل غیرارتجاعی مرتبه دوم ایجاد کرده است. علاوه بر این، الزامات مدل‌سازی، ملاحظات قابلیت سرویس‌دهی و رویه‌های طراحی زمانی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که مقاومت سازه‌ها به‌صراحت در تحلیل ارزیابی شود. مقالات و گزارش‌های مربوط به این موضوعات شامل موارد زیر است، اما به‌هیچ‌وجه محدود به موارد زیر نیست:

Clarke, Ziemian 1990 و همکاران ۱۹۹۲، White, White 1993 و Chen, Chen 1993 و Maleck, Toma 1994 و همکاران ۱۹۹۵، Chen, McGuire a & b 1995 و White, Kim 1997 و Nukala 1997 و Alemdar 2001 Maleck, Deierlein 2001 و همکاران ۲۰۰۲، Trahair و Chan 2003، Alemdar، White 2005 و Surovek و Ziemian 2005 و Martinez-Garcia و Ziemian 2006 و White و همکاران ۲۰۰۶.

این گزارش به ترکیب این تلاش‌ها در یک روش طراحی عملی برای ارزیابی مقاومت و رفتار سیستم‌های قاب فولادی با استفاده از روش‌های تحلیل پیشرفته می‌پردازد. مشخصات AISC 2005 حرکت روبه‌جلو را در امکان ارزیابی مستقیم بیشتر سیستم‌های اسکلت فولادی با گنجاندن ضمیمه‌های ۱ و ۷، طراحی با تحلیل غیرارتجاعی و روش تحلیل مستقیم (DM) نشان داد. در جدیدترین مشخصات (DM, AISC (2010 به‌عنوان روش ارجح ارزیابی پایداری قاب به فصل C منتقل شده است و رویکرد طول مؤثر به‌طور سنتی به‌ضمیمه ۷ منتقل شد. یکی از مؤلفه‌های کلیدی DM و طراحی توسط مقررات تحلیل غیرارتجاعی این است که آنها بر به‌دست‌آوردن نتایج تحلیل واقعی‌تر تمرکز می‌کنند. با ترکیب یک خروج از شاقولیات و کاهش سختی اسمی در تحلیل سازه، DM اجازه می‌دهد تا محاسبه مقاومت قاب فولادی را به‌صراحت برای پدیده‌های کلیدی که بر روی سیستم و نقاط قوت اعضا تأثیر می‌گذارد (Maleck 2001، Deierlein 2003، Surovek-Maleck و White 2003، White و Griffis، Griffis 2007 و Kaehler، White 2007 و همکاران ۲۰۰۷) بررسی کند.

مزایای عمده DM عبارت‌اند از: (۱) نیاز به عوامل طول مؤثر را از بین می‌برد، (۲) یک بازنمایی بهبودیافته از نیروهای داخلی در سراسر سازه در حالت حد نهایی مقاومت را فراهم می‌کند و (۳) به شیوه‌ای منطقی و ثابت برای همه انواع قاب‌ها از جمله قاب‌های مهاربندی شده، قاب‌های خمشی و سیستم‌های قاب‌بندی ترکیبی اعمال می‌شود (White و Griffis ۲۰۰۷).

در DM، اثرات عدم ارتجاعی و عیوب قاب در نیروهای محاسبه شده مورد نیاز برای طراحی تمام اجزای سازه محاسبه می‌شود. یکی از مزایای این رویکرد این است که یک مسیر مستقیم از تحلیل و طراحی الاستیک به تحلیل و طراحی پیشرفته ارائه می‌دهد. (Surovek و Ziemian ۲۰۰۵؛ White و White ۲۰۰۶). ضمیمه ۱

از مشخصات ۲۰۱۰ بیان می‌کند که "حالت‌های حد مقاومت شناسایی شده توسط تحلیل غیرارتجاعی که [موارد زیر] را در بر می‌گیرد، زمانی که سطح قابل اطمینان قابل مقایسه یا بالاتری در تحلیل ارائه شده باشد، مشمول مقررات مربوط به مشخصات نمی‌شوند."

ویژگی‌های زیر در تحلیل مورد نیاز است: " (۱) تغییر شکل‌های خمشی، برشی و اعضای محوری و سایر تغییر شکل‌های اجزا و اتصالات که به جابه‌جایی سازه کمک می‌کنند؛ (۲) اثرات مرتبه دوم (از جمله اثرات $P-\delta$ و $P-\Delta$)؛ (۳) عیوب هندسی؛ (۴) کاهش سختی به دلیل عدم ارتجاعی‌ات، از جمله اثر تنش‌های پسماند و تسلیم جزئی مقطع؛ و (۵) عدم قطعیت در سیستم، مقاومت و سختی اعضا و اتصالات. " (AISC 2010).
ضمیمه ۱ در مورد نحوه گنجاندن این ویژگی‌ها در تحلیل غیرارتجاعی تجویز نمی‌کند. یکی از اهداف این سند ارائه رهنمودهایی برای چگونگی برآورده شدن الزامات ضمیمه ۱ و همچنین ارائه پیش‌زمینه لازم برای درک منطق توصیه‌ها و پیشنهادها است.

۲-۱ انگیزه و دامنه کاربرد

به طور خلاصه، تحلیل‌های پیشرفته، ارزیابی مقاومت سازه‌ای را تسهیل نموده و انعطاف‌پذیری طراحی بیشتری را به مهندسین می‌دهد. قابلیت‌های تحلیل پیشرفته، اگر به درستی اجرا و اعمال شود، بررسی مقاومت حالت‌های حدی را ساده می‌کند. اگر یک تحلیل پیشرفته نشان دهد که سازه قادر به تحمل بارهای ضریب دار مورد نیاز است، معادلات مقاومتی اعضای اولیه مبتنی بر مشخصات ذاتاً برآورده می‌شوند. در واقع، بررسی جداگانه معادلات مقاومت ستون، تیر و تیر - ستون مربوطه، در بیشتر موارد، دیگر ضروری نیست. در حالی که پیچیدگی بیشتری در تحلیل ارائه می‌شود، کاهش قابل توجهی در تلاش در ارزیابی طراحی حاصل می‌شود. دانش قراردادی نشان می‌دهد که طراحی بسیاری از انواع سازه‌ها به جای مقاومت، بر اساس قابلیت سرویس‌دهی است. تحلیل پیشرفته به‌ویژه در این موارد مفید است زیرا هدف اصلی تأیید مقاومت کلی است. این ممکن است از طریق یک بررسی نهایی کارآمد از هر دو حالت حدی عضو و سیستم برای سازه‌ای که در آن اندازه اولیه اعضا بر اساس الزامات سرویس‌دهی است، انجام شود.

باین حال، شاید بزرگ‌ترین مزیت تحلیل پیشرفته این است که یک رویکرد جامع را برای طراحی سیستم‌های قاب‌بندی تسهیل می‌کند که می‌تواند به عنوان ابزاری برای برآورده کردن واضح اهداف طراحی مبتنی بر عملکرد استفاده شود. از آنجایی که ممکن است مقاومت اعضا و سیستم به طور مستقیم مورد ارزیابی قرار گیرد، از جمله مقاومت ذخیره غیرارتجاعی، به طراح آزادی بیشتری در تنظیم طرح سازه برای دستیابی به اهداف طراحی داده می‌شود. برای برخی از انواع سازه‌ها، این مسئله می‌تواند از مشکلاتی مانند آن‌هایی که ممکن است هنگام استفاده از روش طول مؤثر رخ دهند اجتناب کند که در آن تغییرات طراحی، طول مؤثر

را افزایش می‌دهد و این فرآیند منجر به کنترل یکپارچگی مقاومت عضو بیشتر در زمانی می‌شود که اندازه اعضا افزایش می‌یابد. (به‌عنوان مثال، Rex و Goverdhan ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲ را ببینید). دلیل قوی دیگر برای تحلیل پیشرفته این است که مقادیر واقعی تری برای گشتاور و نیروهای داخلی ارائه می‌دهد. حالت‌های حد قابلیت سرویس‌دهی مانند محدودیت‌های تغییر شکل‌های دائمی (غیرارتجاعی) یا انحرافات کل در سطوح بار سرویس موردنظر نیز ممکن است با استفاده از تحلیل پیشرفته به طور منطقی بررسی شوند، زیرا این نوع تحلیل رفتار واقعی سیستم را با دقت بیشتری نسبت به روش‌های تحلیل ارتجاعی مشخص می‌کند. تحلیل پیشرفته برای مهندسانی است که رفتار سیستم را درک می‌کند و مایل است که هم بررسی‌های طراحی را تسریع کند و هم در طراحی انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشد. این گزارش معیارهای مختلفی را ارائه می‌کند که باید هنگام استفاده از این ابزارهای تحلیل، همراه با راه‌های پیشنهادی برای برآورده کردن این معیارها رعایت شوند. به طور خاص، حداقل استانداردهایی ارائه شده است که باید رعایت شود تا یک رویکرد تحلیل به‌عنوان یک تحلیل "پیشرفته" در نظر گرفته شود.

۳-۱ الزامات اساسی برای دستورالعمل‌ها

این دستورالعمل‌ها عمدتاً بر اساس یادداشت (۱۹۹۸ Galambos) SSRC 5 "اصول کلی برای طراحی پایداری سازه‌های فلزی" است که موارد زیر را با توجه به ارزیابی مقاومت سیستم‌های قاب بیان می‌کند:

- ۱) در صورت امکان، رویه تعیین ظرفیت باربری قاب‌ها، اعضا یا عناصر بر اساس حداکثر مقاومت باید بر اساس یک مدل ریاضی باشد که شامل موارد زیر باشد:
- ۲) خصوصیات فیزیکی تعیین شده تجربی، مانند تنش‌های پسماند، غیرارتجاعی بودن مصالح، و تغییرات مقطعی در مقاومت تسلیم، تاحدی که مناسب باشد، منطقی شود.
- ۳) ترکیبی مناسب از نظر آماری از ویژگی‌های قابل قبولی که در استانداردهای عرضه، ساخت و نصب مشخص شده‌اند، مانند غیرمستقیم بودن، کاهش سطح مقطع، تغییرات ابعاد مقطع، خواص مواد و رواداری‌های نصب.
- ۴) تأثیر شرایط مرزی، مانند محدودیت اعمال شده در انتهای اعضا.

این اصول در الزامات کلی که بخش C1.1 از مشخصات AISC 2005 بر تمام روش‌های تحلیل و طراحی و همچنین الزامات پیوست ۱ تحمیل می‌کند، گنجانده شده‌اند. سه ملاحظات عمده برای برآوردن الزامات یادداشت SSRC 5 و همچنین AISC (۲۰۱۰) ضروری است.

این موارد عبارت‌اند از:

- ۱) سطح تحلیل (سطح دقت موردنیاز)
- ۲) جنبه‌هایی که باید در مدل‌سازی فیزیکی قاب‌ها گنجانده شوند
- ۳) ملاحظات طراحی