تحليل پيشرفتة قاب‌هاي فولادي دو بعدي با عضوهاي داراي نقص انحناي نخستين

محمد رضايي پژند*[1] و احسان محتشمي[2]

[1]استاد گروه عمران- دانشكدة مهندسي- دانشگاه فردوسي مشهد

[2] دانش آموخته كارشناسي ارشد سازه- دانشكدة مهندسي- دانشگاه فردوسي مشهد

(تاريخ دريافت ٨٦/٨/١٢ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ٨٩/٢/٢٥ ، تاريخ تصويب ٨٩/٤/١٤)

چكيده

شكم‌دادگي عضو هاى سازه يا انحناي نخستين يكي از رايج‌ترين نقص ها در فرآيند ساخت و نصب سازه ها است. شيوه ى پيشنهادي اين مقاله، شكم‌دادگي را به طور صريح الگوسازي مي‌كند و اثر آن را در ماتريس سختي جزء وارد مي‌سازد. ماتريس سختي مماسي ناكشسان جزء تير- ستون داراي انحناي نخستين، زير اثر نيروي محوري، لنگرهاي گرهي و بار گسترده ى مياني حساب مي‌شود. بر پايه ى اين ماتريس، تحليل پيشرفته ى قاب‌هاي فولادي دو بعدي انجام مي‌پذيرد. در اين روش، مى توان هر عضو را تنها با يك جزء الگوسازي كرد و براي عضوهاي فشاري و كششي، رابطه‌اي يكسان را به كار برد. نمودار بار- تغييرمكان فن پيشنهادي با تحليل‌هاي دقيق ناحيه ى خميري مقايسه مي‌شود و در بيشتر نمونه‌هاي عددي، هم‌خواني خوبي وجود دارد. نتيجه‌ها نشان مي‌دهند كه جزء پيشنهادي، مسير ايستايي را به گونه‌اي مناسبى مى پيمايد و به خوبى ظرفيت باربري ناكشسان مرتبه ى دوم قاب‌هاي فولادي را برآورد مى كند.

واژه هاي كليدي: قاب‌هاي فولادي دو بعدي، تحليل پيشرفته، نقص انحناي نخستين(نقص شكم‌دادگي عضو)، مفصل خميري، بار گستردة مياني

مقدمه

در دو دهة گذشته، پژوهش‌هاي گسترده‌اي براي يافتن روش‌هاي پيشرفتة تحليل انجام پذيرفت و راهكارهاي گوناگونی به دست آمد. تفاوت اين شيوه‌ها در نشان دادن و در بر گرفتن اثرهايي است كه سبب خميري شدن يا ناپايداري سازه مي‌گردند. تحليل پيشرفته، مقاومت حدی سازه را با وارد كردن ويژگی‌های گوناگون رفتاری به خوبی برآورد مي‌نمايد و بر پاية آن، یک روش طراحی مناسب در دسترس قرار مي‌دهد. هدف اصلي تحليل‌هاي پيشرفته، پيش‌بيني مناسب رفتار سازه است و اين توانايي را به طراح مي‌دهند كه از ضابطه‌هاي آيين‌نامه‌ها فراتر رود. به طور معمول، رابطه‌هاي آيين‌نامه‌اي تقريبي هستند و در بخش‌هاي گوناگون، دقت‌هاي متفاوتي در دسترس قرار مي‌دهند. در برابر آن، تحليل پيشرفته توانايي رفتارشناسي دقيق‌تر و دست‌يابي به نتيجه‌هاي مطمئن‌تر را دارد. مهم‌ترين ويژگی تحليل پيشرفتة یک قاب فولادی، وارد كردن اثرهای غيرخطی مانند جاری شدن مواد، تنش‌های پس‌ماند، نقص‌های هندسی و اثرهای مرتبه دوم می‌باشد.

تحليل پيشرفته به دو گونة کلی تقسيم می‌شود. يکی، روش ناحية خميری و ديگری، روش مفصل خميری نام دارد. در شيوة ناحية خميري، اثر جاري شدن در سطح مقطع و طول عضو به طور هم‌زمان وارد تحليل مي‌شود. به سخن ديگر، گسترش خميري شدن در حجم سازه به طور مستقيم و صريح الگوسازي مي‌گردد. بسياري از پژوهشگران آن را براي بررسي رفتار سازه‌ها به كار برده‌اند. از ميان آنها مي‌توان به كانچانالاي در سال ١٩٧٧، وگل در سال ١٩٨٥، توما و چن در سال‌هاي ١٩٩٢ و ١٩٩٥و آوری در سال ١٩٩٨ اشاره كرد[١]. در تحليل ناحية خميري سازه‌هاي رشته‌اي، هر عضو به چند جزء تير- ستون و سطح مقطع آن به چند جزء رشته‌اي تقسيم مي‌شود و تنش در هر رشته و تغييرمكان در هر گره، با تابع- اوليه‌گيري عددي به دست مي‌آيد. اگر چه روش ناحية خميري پاسخ دقيق سازه را به دست مي‌دهد؛ ولي در استفاده از آن بايد قدري درنگ كرد. حتي با بهره‌گيري از رايانه‌هاي پيشرفته، حجم و زمان محاسبه به قدري زياد است كه براي تحليل‌هاي رايج و روزمره مناسب نمي‌باشد. بنابراين، كاربردهاي اين راهكار، به استفاده در تحليل و طراحي سازه‌هاي پيچيده و ويژه، گسترش جدول‌ها و نمودارهاي طراحي و ايجاد مسأله‌هاي محك براي ارزيابي دقت روش‌هاي ساده شده محدود گشته است[٢].

* نويسنده مسئول : تلفن / فاكس : ٠٥١١-٨٤١٢٩١٢ , Email: mrpajand@yahoo.com

در شيوة مفصل خميري، جاري شدن عضوها را تنها در بخش‌هايي به طول صفر و در دو سر جزءها مي‌پندارند. به سخن ديگر، خميري شدن فقط در ناحية بسيار كوچكي از عضو به وجود مي‌آيد. به اين ناحيه، مفصل خميري مي‌گويند. به طور معمول، از رابطه‌هاي بار- تغييرمكان يا نمودارهاي تنش-كرنش ساده شده در راهكارهاي مفصل خميري بهره مي‌گيرند. همچنين، اثرهاي غيرخطي را به صورت بارهاي معادل يا الگوهايي تقريبي وارد مي‌نمايند. در بيشتر اين راهكارها، هر عضو را فقط با يك جزء الگوسازي مي‌كنند و برخلاف تحليل‌هاي ناحية خميري، نيازي به تابع‌اوليه‌گيري‌هاي پيچيده ندارند. افزون بر آن، سرعت تحليل بيشتر است و براي هدف‌هاي كاربردي، پر بازده مي‌باشد.

پژوهشگران بسياري اين روش را براى تحليل پيشرفتة قاب‌هاي فولادي به كار برده‌اند. از ميان آن‌ها مي‌توان كينگ و همكاران در سال ١٩٩٢، ليو و همكاران درسال‌هاي ١٩٩٢ و ١٩٩٣، چن و چن در سال ١٩٩٥، كيم و چن در سال ١٩٩٦، چن و چوي در سال ١٩٩٧، زايمن و ميلر در همين سال، كيم و همكاران در سال ٢٠٠٤ و چن و ژو در سال ٢٠٠٤ را نام برد[١].

روش پيشنهادي

هر الگوی تحليلی، نياز به ساده‌سازی دارد. در اين مقاله، فرض‌های زير همواره به كار خواهد رفت:

١- قاب‌های فولادی دو بعدی با اتصال‌های سخت (صلب) بررسی می‌شوند. اين قاب‌ها می‌توانند مهاربندی شده يا مهاربندی نشده باشند.

٢- رفتار مصالح، كشسان- خميري‌كامل است. به سخن ديگر، از اثر سخت شوندگي چشم‌پوشی می‌شود.

٣- كرنش‌ها كوچكند اما تغييرمكان‌ها می‌توانند بزرگ باشند.

٤- از تغييرشكل‌های برشی و تابيدگی مقطع چشم‌پوشی می‌گردد.

٥- مقطع‌ها، I شكل نورد شده و فشرده می‌باشند. ويژگی فشردگی سبب می‌گردد، مقطع به ظرفيت خميری خود برسد. به سخن ديگر، از كمانش موضعی جلوگيری می‌شود.

٦- تنها خمش گرد محور قوی مقطع وجود دارد.

تابع تغييرمكان

جزء تير- ستون پيشنهادي و بارهاي وارد به آن در شكل (١) مي‌آيند. مي‌توان تابع تغييرمكان كشسان را همانند زير، چند جمله‌اي درجة پنج پنداشت. چن و ژو چنين تابعي را پيش از اين به كار برده‌اند[٣]:

$$v(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+a_4x^4+a_5x^5 \quad , \ -L/2\le x\le L/2 \qquad (١)$$

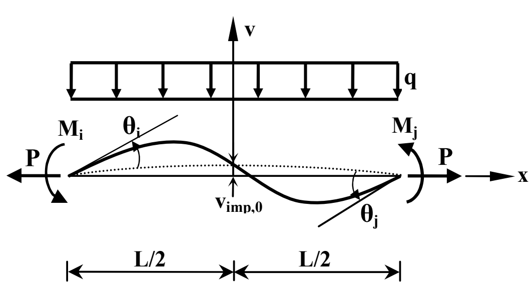
در اين رابطه، عامل‌هاي a_0 تا a_5 بر اساس شرايط مرزي نيرويي و هندسي تعيين مي‌شوند.

در حالت كلي، انتخاب شكل تابع نقص انحناي نخستين يا شكم‌دادگي عضو اختياري است. براي نمونه، چن و ژو در سال ١٩٩٥، تابع سهمي درجة دو را با الهام گرفتن از دايره و چن و گو در سال ٢٠٠٠، تابع نيم سينوسي را بر پاية شكل كمانشي پيشنهاد كردند[٤]. در اينجا، با الهام گرفتن از تغييرشكل ناشي از وزن عضو، تابع چند جمله‌اي درجة چهار به صورت زير پيشنهاد مي‌شود:

$$v_{imp}(\xi)=\frac{1}{8}v_{imp,0}(\xi^2-1)(\xi^2-8) \quad , \quad \xi=\frac{2x}{L} \quad , \ -L/2\le x\le L/2 \qquad (٢)$$

در اين رابطه، $v_{imp,0}$ مقدار تابع نقص انحناي نخستين در وسط دهانه است و در آغاز تحليل، به رايانه داده مي‌شود. عامل ξ فاصلة بي بعد و L طول جزء مي‌باشد. لازم به يادآوري است، نقص هندسي جزء پيش از وارد شدن هر گونه بار به وجود آمده است.

در دستگاه محورهاي عضوي پايه، تغييرمكان‌هاي جانبي نسبت به وتر وصل كنندة دو سر جزء سنجيده مي‌شوند. از اين رو، در رابطه‌سازي جزء پيشنهادي، شرط‌هاي مرزي به صورت زير مي‌باشند:



شكل ١: جزء پيشنهادي و نيروهاي وارد به آن.

$$v|_{x=-L/2}=0 \qquad (٣)$$

$$v|_{x=L/2}=0 \qquad (٤)$$

$$\left.\frac{dv}{dx}\right|_{x=-L/2}=\theta_i \qquad (۵)$$

$$\left.\frac{dv}{dx}\right|_{x=L/2}=\theta_j \qquad (٦)$$

در ادامه، شرط تعادل لنگر در مقطع وسط دهانه برقرار مي‌گردد:

$$EI\left(\frac{d^2v}{dx^2}\right)_0=\frac{1}{2}\left(M_j-M_i\right)+\frac{qL^2}{8}+Pv_{imp,0} \qquad (۷)$$

شرط تعادل برش در مقطع وسط دهانه نيز به صورت زير قابل دست‌يابي است:

$$EI\left(\frac{d^3v}{dx^3}\right)_0=\frac{1}{2}\left(M_i+M_j\right)+P\left(\frac{dv}{dx}\right)_0 \qquad (۸)$$

در رابطه‌هاي كنوني، M_i و M_j لنگر در گره‌هاي i و j هستند. P نيروي محوري، q شدت بار گسترده در يكة طول جزء و EI "صلبيت (سفتي) خمشي" مي‌باشد. زيرنويس 0 نشان دهندة مقطع وسط دهانه است. بايد آگاه بود، تابع نقص هندسي نسبت به وسط دهانه متقارن مي‌باشد و شيب آن در اين مقطع، صفر است. مي‌توان ضريب‌هاي به كار رفته در تابع تغييرمكان كشسان را با وارد كردن شرط‌هاي مرزي (۳) تا (٦) و رابطه‌هاي تعادل (۷) و (۸) به دست آورد.

ماتريس سختي مماسي كشسان

در ادامه، ماتريس سختي مماسي جزء پيشنهادي به كمك روش كارمايه برپا مي‌شود. اين ماتريس، رابطة بين نموّ بار وارد بر سازه و نموّ تغييرشكل ناشي از آن را نشان مي‌دهد. براي اين كار، نخست درايه‌ها در حالت كشسان نوشته مي‌شوند و سپس اثر رفتار غيرخطي مواد در آن وارد مي‌گردد. در آغاز بايد كارماية نهفتة كل سازه را نوشت:

$$\Pi=U+V \qquad (۹)$$

$$U=\int_V\int_\varepsilon \sigma\, d\varepsilon\, dV \qquad (۱۰)$$

$$V=-\left(\sum_{i=1}^{n}P_iD_i+\int_L q(x)v(x)\,dx\right) \qquad (۱۱)$$

در اين رابطه‌ها، Π كارماية نهفتة كل سازه، U كارماية كرنشي و V كار انجام شدة بارهاي خارجي مي‌باشد. با كشسان فرض كردن مصالح، مي‌توان نوشت:

$$U=\frac{EA}{2}\int_L\left(\frac{du}{dx}\right)^2dx+\frac{EI}{2}\int_L\left(\frac{d^2v}{dx^2}\right)^2dx+\frac{P}{2}\int_L\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 dx \qquad (۱۲)$$

به سبب وجود نقص انحناي نخستين و كار نيروي محوري بر روي آن، تابع v در جملة سوم رابطة (۱۲) با $v+v_{imp}$ جايگزين مي‌گردد. با چشم‌پوشي از توان دوم dv_{imp}/dx در برابر ديگر جمله‌ها، تابع كارماية كرنشي جزء پيشنهادي به صورت زير در مي‌آيد:

$$U=\frac{EA}{2}\int_L\left(\frac{du}{dx}\right)^2dx+\frac{EI}{2}\int_L\left(\frac{d^2v}{dx^2}\right)^2dx+\frac{P}{2}\int_L\left[\left(\frac{dv}{dx}\right)^2+2\left(\frac{dv}{dx}\right)\left(\frac{dv_{imp}}{dx}\right)\right]dx \qquad (۱۳)$$

با جايگذاري تابع تغييرمكان پيشنهادي در رابطة (۱۳)، تابع كارماية كرنشي بر حسب تغييرشكل‌هاي ناشي از نيروهاي گرهي، بار گستردة مياني و نقص انحناي نخستين قابل دست‌يابي است. كار بارهاي گستردة مياني، بر پاية شكل (۱)، به صورت زير حساب مي‌شود:

$$W_q=\int_L(-q)\,v(x)\,dx \qquad (۱۴)$$

بايد دانست، علامت منفي q، به سبب وارد شدن بار گستردة مياني در جهت منفي محور تغييرمكان جانبي است. اينك، درايه‌هاي ماتريس سختي مماسي كشسان با دو بار مشتق‌گيري از تابع كارماية نهفتة كل به دست مي‌آيند و شكل كلي زير را دارند:

$$k_{ij}=\frac{\partial^2\Pi}{\partial\delta i\,\partial\delta j}\quad,\quad \delta=\{e\quad \theta_i\quad \theta_j\}^T\quad,\quad i,j=1,2,3 \qquad (۱۵)$$

در اين رابطه، e تغييرشكل محوري جزء مي‌باشد. به اين ترتيب، ماتريس سختي مماسي كشسان جزء پيشنهادي در دستگاه محورهاي عضوي پايه، به صورت زير نوشته مي‌شود:

$$\left[K_t\right]_{EB,e}=\frac{EI}{L}\begin{bmatrix}k_{11} & k_{12} & k_{13}\\ & k_{22} & k_{23}\\ \text{(Symmetric)} & & k_{33}\end{bmatrix}=\frac{EI}{L}\begin{bmatrix}\frac{1}{L^2H} & \frac{G_1}{LH} & \frac{G_2}{LH}\\ & \left(S_1+\frac{G_1^2}{H}\right) & \left(S_2+\frac{G_1G_2}{H}\right)\\ \text{(Symmetric)} & & \left(S_1+\frac{G_2^2}{H}\right)\end{bmatrix} \qquad (۱٦)$$

در رابطة كنوني، $\left[K_t\right]_{EB,e}$، ماتريس سختي مماسي كشسان در دستگاه محورهاي عضوي پايه و L طول جزء مي‌باشد.

S_1 و S_2 تـابع‌هـاي پايـداری رايـج هسـتند و در روش پيشنهادي، به صورت چند جمله‌اي درجة پنج مـي‌باشـند. اين دو تابع، به همراه عامل‌هاي G_1 ، G_2 و H، در زير مي‌آيند:

$$S_1=\frac{1}{B_1^2B_2^2}\Big[4(80)^2(48)^2+32(80)(48)^2\rho+(\frac{689}{56})(80+48)^2\rho^2+(\frac{314}{105})(80-48)^2\rho^3+(\frac{716}{35})\rho^4+(\frac{2}{45})\rho^5\Big] \quad (17)$$

$$S_2=\frac{1}{B_1^2B_2^2}\Big[2(80)^2(48)^2+8(80)(48)^2\rho+(\frac{209}{112})(80+48)^2\rho^2+(\frac{121}{420})(80-48)^2\rho^3+(\frac{10}{21})\rho^4-(\frac{1}{126})\rho^5\Big] \quad (18)$$

$$G_1=R_1(\theta_i+\theta_j)+R_2(\theta_i-\theta_j)+R_3\left(\frac{qL^3}{EI}\right)+R_4\left(\frac{v_{imp,0}}{L}\right) \quad (19)$$

$$G_2=R_1(\theta_i+\theta_j)-R_2(\theta_i-\theta_j)-R_3\left(\frac{qL^3}{EI}\right)-R_4\left(\frac{v_{imp,0}}{L}\right) \quad (20)$$

$$H=\frac{I}{AL^2}-R_5(\theta_i+\theta_j)^2-R_6(\theta_i-\theta_j)^2-R_7\left(\frac{qL^3}{EI}\right)(\theta_i-\theta_j)-R_8\left(\frac{v_{imp,0}}{L}\right)(\theta_i-\theta_j)-R_9\left(\frac{qL^3}{EI}\right)^2-R_{10}\left(\frac{v_{imp,0}}{L}\right)^2-R_{11}\left(\frac{qL^3}{EI}\right)\left(\frac{v_{imp,0}}{L}\right) \quad (21)$$

عامل‌هاي به كار رفته در رابطه‌هاي كنوني، در پيوست مي‌آيند.

كاهش سختي در اثر تنش پس‌ماند

در حالت كلي، مقدار و شكل پخش تنش‌های پـس‌مانـد در نيمرخ‌های نورد شده، به فرآيند توليـد و شـكل مقطـع بستگی دارد. در اين مقاله، الگوي ضريب كشسان مماسـي براي وارد كردن اثر تنش‌هاي پس‌ماند به كار مي‌رود. ايـن ضريب، براي كاهش دادن سختي عضو ناشی از تنش‌هـای پس‌ماند در فاصلة بين گره‌ها بـه كـار مـي‌رود. بـه سـخن ديگر، اثر كاهش سختی ناشی از تنش‌های پـس‌مانـد را بـا تنظيم ضريب كشسان مماسی مصالح وارد تحليل می‌كنند. نخستين بار، اين مفهـوم در ضـابطه‌هـاي مقاومـت سـتون آيـين‌نامـة آمريكـا، AISC-LRFD، بـه كـار رفـت و بـراي سادگي كار، فقط تابعي از نيـروي محـوري پنداشـته شـد. ضريب كشسان مماسی LRFD، هم اثر تنش‌هاي پس‌ماند و هم اثـر نقـص‌هـاي هندسـي را در بـر دارد[٥]. سـازمان پژوهش‌هاي ستون، CRC، نيز رابطة ديگري را بـه صـورت زير پيشنهاد مي‌كند:

$$\frac{E_t}{E}=\begin{cases}1.0 & P\le 0.5P_y\\ 4\left(\frac{P}{P_y}\right)\left(1-\frac{P}{P_y}\right) & P>0.5P_y\end{cases} \quad (22)$$

در رابطة كنـوني، E و E_t، بـه ترتيـب، ضـريب كشسـاني و ضريب كشسان مماسی هستند. P، نيروي محـوري جـزء و P_y، ظرفيت بار محوري مي‌باشد. ضريب كشسـان مماسـی CRC، تنها اثر تنش‌هاي پس‌ماند را وارد مي‌كند. بنابراين، اگر نقص هندسـي بـه صـورت جداگانـه الگوسـازي شـود، استفاده از آن مناسب‌تراست. در اينجا، به دليل الگوسـازي صريح نقص‌هاي هندسي، ضريب كشسان مماسي CRC در تحليل به كار خواهد رفت. لازم بـه يـاد آوري اسـت، ايـن ضريب بر پاية آزمايش و به طـور تجربـی بـه دسـت آمـده است[٦ و٧].

كاهش سختي ناشي از جاري شدن مواد

براي وارد كردن اثر جاري شدن تدريجي مواد بـه دليـل شكل‌گيري مفصل خميري، تابع‌هاي كاهش سختي به كار مي‌روند. اين تابع‌ها پس از رسيدن لنگـر مقطـع بـه لنگـر تسليم به كار مي‌افتند و سـختي خمشـي را بـه تـدريج از حالت كشسان به خميري‌كامل كاهش مي‌دهنـد. پـيش از اين، پژوهشگراني چون ليو و همكـاران در سـال ١٩٩٣، از تابع‌هاي كاهش سختي خطي و سهمي درجة دو اسـتفاده كرده‌اند[٦]. در اينجا، تابع نمايي پيشنهادي رضايي پژنـد و رسول زاده باغميشه، به صورت زير به كار خواهد رفت. اين تابع، شيب ملايـم‌تـری نسـبت بـه تـابع‌هـای روش ليـو و همكاران دارد و با بهره‌گيری از آن پاسخ‌های دقيق‌تری بـه دست می‌آيد[٨]:

$$\varphi=1-\alpha^{(1-P/P_y)} \quad (23)$$

در رابطة كنوني، φ تابع كاهش سـختي اسـت. عامـل α نشانة تسليم نام دارد و به صورت خطي تغيير مي‌كند:

$$\alpha=\begin{cases}0 & M<M_{yc}\\ \frac{M-M_{yc}}{M_{pc}-M_{yc}}\le 1 & M_{yc}\le M\le M_{pc}\end{cases} \quad (24)$$

در اين رابطه، M لنگر خمشی در گـره، M_{yc} لنگـر تسـليم نخستين و M_{pc} لنگر خميري كاهش يافته مي‌باشد. در اين

مقاله، سطح تسليم نخستين كينگ و همكاران به كار مي‌رود[۹]:

$$\frac{P}{0.8P_y}+\frac{f\,M}{0.9M_p}=1.0 \quad , \quad f=\frac{Z}{S} \tag{۲۵}$$

در رابطة كنوني، S و Z، به ترتيب، اساس مقطع كشسان و اساس مقطع خميري مي‌باشند. M، لنگر گره و M_p، لنگر خميري است. همچنين، از سطح تسليم‌كامل دوآن و چن به صورت زير بهره گيري مي‌شود[۱۰]:

$$\left(\frac{P}{P_y}\right)^{1.3}+\left(\frac{M}{M_p}\right)=1 \tag{۲۶}$$

بر پاية رابطة كنوني و رابطة (۲۵)، مي‌توان نوشت:

$$M_{yc}=0.9M_y\left(1-\frac{P}{0.8P_y}\right) \tag{۲۷}$$

$$M_{pc}=M_p\left(1-\left(\frac{P}{P_y}\right)^{1.3}\right) \tag{۲۸}$$

با جايگذاري مقدارهاي كنوني در رابطة (۲۴) و سپس در رابطة (۲۳)، مقدار تابع كاهش سختي بر اساس نيروي محوري و لنگر خمشي موجود در گره به دست مي‌آيد.

نيروهاي وارد بر مقطع هرگز نبايد از ظرفيت خميري آن بيشتر گردند. پس از شكل‌گيري مفصل خميري در يك گره و با تغيير نيروي محوري در گام‌هاي بعدي بارگذاري، لنگر خمشي بايد به گونه‌اي تغيير كند كه تركيب آن دو، از ظرفيت خميري مقطع بيشتر نشود. بنابراين، بايد نيروها را اصلاح كرد و به روي سطح تسليم برگرداند. همچنين، رابطة حاكم بر رفتار جزء بايد تصحيح شود تا تغيير رفتار در اثر شكل‌گيري مفصل خميري آشكار گردد.

ماتريس سختي مماسي ناكشسان

پس از به وجود آمدن مفصل خميري در انتهاي i جزء، نمو M_i برابر با $\Delta M_{ph,i}$ خواهد بود. با توجه رابطة (۱۶)، رابطة نموّي حاكم بر رفتار جزء در محورهاي پايه به صورت زير در مي‌آيد:

$$\begin{Bmatrix}\Delta P\\ \Delta M_i\\ \Delta M_j\end{Bmatrix}=\frac{E_tI}{L}\begin{bmatrix}k_{11}^* & 0 & k_{13}^*\\ 0 & 0 & 0\\ k_{13}^* & 0 & k_{33}^*\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta e\\ \Delta\theta_i\\ \Delta\theta_j\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\eta_1\\ 1\\ \eta_2\end{Bmatrix}(\Delta M_{ph,i}) \tag{۲۹}$$

در اين رابطه، k^* ها درايه‌هاي تغييريافتة ماتريس سختي در اثر به وجود آمدن مفصل خميري هستند. η_1 و η_2 نيز اثر خميري شدن گره i را ، به ترتيب، بر روي ΔM_j و ΔP نشان مي‌دهند. از مقايسة رابطة (۲۹) با رابطة (۱۶)، مقدار k^* ها، η_1 و η_2 به صورت زير، به دست مي‌آيد:

$$k_{11}^*=k_{11}-\frac{k_{12}^{\;2}}{k_{22}} \tag{۳۰}$$

$$k_{13}^*=k_{13}-\frac{k_{12}k_{23}}{k_{22}} \tag{۳۱}$$

$$k_{33}^*=k_{33}-\frac{k_{23}^{\;2}}{k_{22}} \tag{۳۲}$$

$$\eta_1=\frac{k_{12}}{k_{22}} \tag{۳۳}$$

$$\eta_2=\frac{k_{23}}{k_{22}} \tag{۳٤}$$

در ادامه، به كار بردن تابع كاهش سختي رابطة (۲۳)، ماتريس سختي مماسي ناكسشان جزء را به قرار زير به دست مي‌دهد:

$$[K_t]_{EB,p}=\frac{E_tI}{L}\begin{bmatrix}\left(k_{11}-\frac{k_{12}^{\;2}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right) & \varphi_i k_{12} & \left(k_{13}-\frac{k_{12}k_{23}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right)\\ & \varphi_i k_{22} & \varphi_i k_{23}\\ (\text{Symmetric}) & & \left(k_{33}-\frac{k_{23}^{\;2}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right)\end{bmatrix} \tag{۳۵}$$

در اين رابطه، $[K_t]_{EB,p}$ ماتريس سختي مماسي ناكشسان جزء در محورهاي پايه مي‌باشد. φ_i تابع كاهش سختي است و درصد خميري شدن در سر i جزء را نشان مي‌دهد. هنگامي‌كه φ_i برابر با يك گردد، مقطع i كشسان و زماني كه برابر با صفر باشد، خميري‌كامل است. به طور مشابه، اگر در گره j مفصل خميري تشكيل شود، مي‌توان نوشت:

$$[K_t]_{EB,p}=\frac{E_tI}{L}\begin{bmatrix}\left(k_{11}-\frac{k_{13}^{\;2}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right) & \left(k_{12}-\frac{k_{13}k_{23}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right) & \varphi_j k_{13}\\ & \left(k_{22}-\frac{k_{23}^{\;2}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right) & \varphi_j k_{23}\\ (\text{Symmetric}) & & \varphi_j k_{33}\end{bmatrix} \tag{۳۶}$$

در رابطة كنوني، φ_j تابع كاهش سختي است و درصد خميري شدن در سر j جزء را نشان مي‌دهد. در حالت كلي، امكان به وجود آمدن مفصل خميري در هر دو سر جزء وجود دارد. بنابراين، با تركيب كردن رابطه‌هاي (۳۵) و (۳۶)، ماتريس سختي مماسي ناكشسان جزء در محورهاي عضوي پايه به صورت زير نوشته مي‌شود:

$$[K_t]_{EB,p}=\begin{bmatrix} kp_{11} & kp_{12} & kp_{13} \\ kp_{21} & kp_{22} & kp_{23} \\ kp_{31} & kp_{32} & kp_{33} \end{bmatrix} \qquad (۳۷)$$

$$kp_{11}=\frac{1}{k_{11}}\left[k_{11}-\frac{k_{12}^{2}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right]\left[k_{11}-\frac{k_{13}^{2}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right] \qquad (۳۸)$$

$$kp_{12}=kp_{21}=\varphi_i\left[k_{12}-\frac{k_{13}k_{23}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right] \qquad (۳۹)$$

$$kp_{13}=kp_{31}=\varphi_j\left[k_{13}-\frac{k_{12}k_{23}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right] \qquad (٤۰)$$

$$kp_{22}=\varphi_i\left[k_{22}-\frac{k_{23}^{2}}{k_{33}}(1-\varphi_j)\right] \qquad (٤۱)$$

$$kp_{23}=kp_{32}=\varphi_i\varphi_j k_{23} \qquad (٤۲)$$

$$kp_{33}=\varphi_j\left[k_{33}-\frac{k_{23}^{2}}{k_{22}}(1-\varphi_i)\right] \qquad (٤۳)$$

اینـك، مـاتریس سـختي مماسـي ناكشسـان جـزء در محورهاي كلي به صورت زیر قابل دست‌یابي است:

$$\begin{aligned}[K_t]_{EG}&=[R]^T[K_t]_{EL}[R]\\ &=[R]^T\left([T]^T[K_t]_{EB,p}[T]+[RBM]\right)[R]\end{aligned} \qquad (۴۴)$$

در این رابطه، $[K_t]_{EL}$ و $[K_t]_{EG}$، به ترتیب، ماتریس سختي مماسي ناكشسان در محورهاي محلـي و كلـي مـي‌باشـند. [T] ماتریس مبدّل از محورهاي عضوي پایه بـه محورهـاي محلـي، [R] مــاتریس انتقــال از محورهــاي محلــي بــه محورهاي كلي و [RBM] ماتریس وابسته به حركت جسم سخت (صلب) است. این ماتریس‌ها در پیوست آمده‌اند.

روش عددي تحلیل غیرخطي

روش نموّي- تكراري وارسي بار، براي حل معادلـه‌هـاي غیرخطي حاكم بر رفتار سازه در این مقاله به كار مـي‌رود. در چنین فرآیندي، نخست، بر پایة سختي مماسـي سـازه، مقدار نموّ تغییرمكان ناشي از نیروي نموّي پیش‌بیني مي‌شود. سپس بر اساس سختي وتري، خطاي برقراري تعادل تصحیح مي‌گردد. نموّ بار، متغیر انتخاب مي‌شود تـا بتـوان شكل‌گیري مفصل خمیري در سازه را به گونه‌اي مناسـب، الگوسازي كرد. برنامة رایانه‌اي نویسندگان، نیروهاي گرهي در هر گام نموّي را با مقاومت مقطع مقایسه مي‌نمایـد. در صورت بیشـتر بـودن نیروهـا از مقاومـت مقطـع، بیشـینة اختلاف به دست مي‌آید و ضریب نموّ بار بـا نسـبت وارون مقدار بیشینه كاهش مي‌یابد. بار دیگـر، تحلیـل در همـان گام انجـام مـي‌شـود و تغییرمكـان‌هـاي جدیـد جـایگزین مقدارهاي پیشین مي‌گردند.

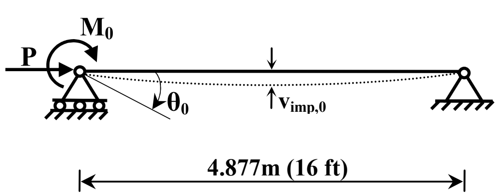
در هر گام تحلیل، شیوة تكراري نیوتن- رافسون بهبـود یافته براي برقراري تعادل نیروها بـه كـار مـي‌رود. در ایـن راهكار، ماتریس سختي مماسي فقط در آغاز هر گـام برپـا مي‌شود و در سایر تكرارها ثابت مي‌ماند. با این كار، شـمار تكرارها افزایش مي‌یابد؛ ولي در برابـر آن، سـرعت تحلیـل بیشتر مي‌گردد. زیرا، نیـازي بـه برپـایي مـاتریس سـختي مماسي در هر تكرار نیست.

نمونه‌هاي عددي

براي نشان دادن توانایي‌هاي روش پیشـنهادي، در ایـن بخش چند سازه تحلیل مي‌شود.

تیر- ستون دو سر مفصل

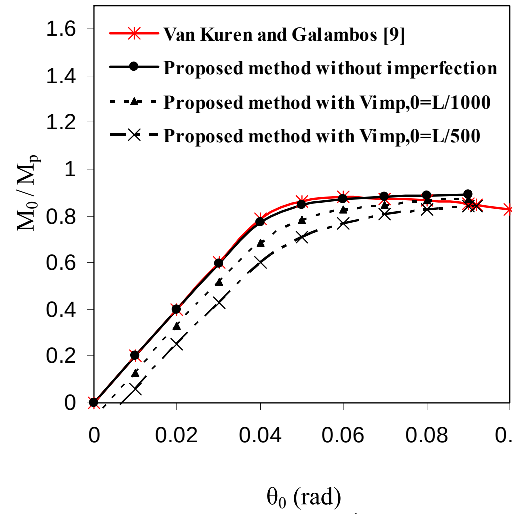
وان كـورن و گـالامبوس در سـال ۱۹۶۴، سـي و هفـت نمونة تیر- ستون I شكل بال‌پهن را آزمایش كردند. شـكل (۲)، یك نمونه از این تیر- ستون‌ها را نشـان مـي‌دهـد. در همة نمونه‌ها، نخست نیروي محوري وارد مي‌گردد و ثابـت نگه داشته مي‌شود. سـپس، لنگرهـاي گرهـي بـه صـورت نموّي به سازه وارد مي‌گردند. براي نمونه، عضو شـكل (۲) در زمان بارگذاري زیر اثر نیروي محـوري ثابـت P_y ۰/۱۵۸ قرار دارد. دو سر تیر- ستون در صفحة بارگذاري، مفصـلي مي‌باشـد و مقطـع سـازه از نیمـرخ 4WF13 اسـت. تـنش تسلیم مصالح، MPa ۲۴۱ و ضـریب كشسـاني، GPa ۲۰۳ مي‌باشد. بیشینة لنگر آزمایش، M_p ۰/۸۸۴ است[۹].



شكل ۲: تیر- ستون دو سر مفصل.

در روش پیشنهادي، نقص هندسـي شـكم‌دادگـي بـا مقدار بیشـینة L/۱۰۰۰ و L/۵۰۰، بـه سـازه افـزوده شـد. نمودار لنگر- دوران تیر- ستون نقص‌دار به همـراه پاسـخ‌هاي وان‌كورن و گالامبوس در شكل (۳) آمده اسـت. روش پیشنهادي، مقـدار لنگـر نهـایي را در حالـت بـدون نقـص شكم‌دادگي، M_p ۰/۸۹۱، با نقـص L/۱۰۰۰، M_p ۰/۸۷۴ و

با نقص L/۵۰۰، M_p ۰/۸۴۵ بـرآورد مـي‌كنـد. شـكل (۳) آشكار مي‌سـازد، روش پيشـنهادي، مسـير ايسـتايي تيـر- ستون را به خوبي پيمايش مي‌نمايد.



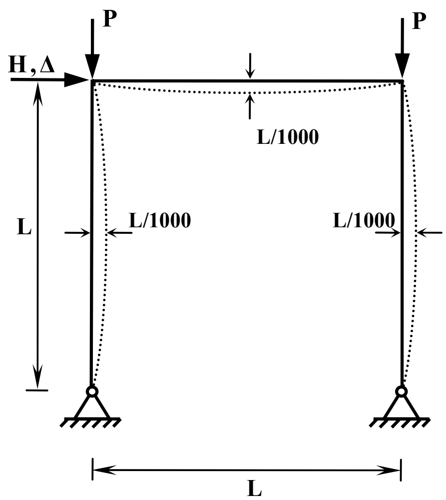
شكل ۳: نمودار لنگر- دوران تير- ستون دو سر مفصل.

بـا وجـود ايـن، بـا گـذر از نقطـة اوج پاسـخ‌هـاي آزمايشگاهي، لنگر در روش پيشـنهادي همچنـان افـزايش پيدا مي‌كند. همچنين، به دليل نداشتن تغييرمكان جانبي در گره‌ها، نقص نخستين اثر گذار است و لنگر نهايي را در نقـص L/۱۰۰۰، ۲ درصـد و در نقـص L/۵۰۰، ۵ درصـد كاهش مي‌دهد.

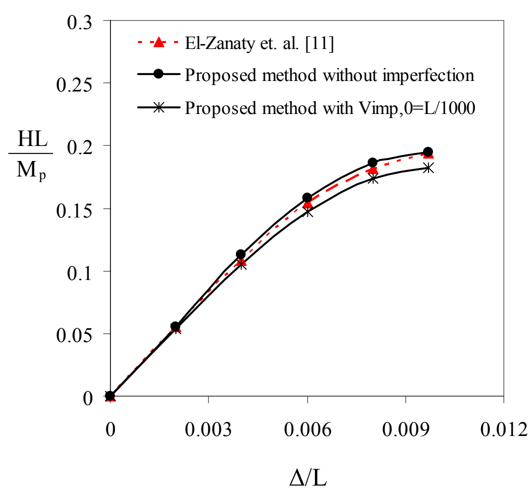
قاب الزاناتي

نخستين بار، الزاناتي و همكاران در سـال ۱۹۸۰، قـاب شكل (٤) را به روش ناحية خميري تحليل كردند. مقطع- هاي سازه از نيمرخ W8×31، ضريب كشسـاني، ۲۰۰ GPa و تنش تسليم مصالح، ۲۵۰ MPa مي‌باشد. در اين قاب، بار وزني به دو گـره بـالاي سـازه وارد مـي‌شـود و تـا $0/6\,P_y$ افزايش مي‌يابد. سپس، اين بار ثابت بـاقي مـي‌مانـد و بـار جانبي تا گسيختگي قاب، بـه آن وارد مـي‌گـردد. در سـال ۱۹۸۵، وايت اين قـاب را بـه شـيوة ناحيـة خميـري و بـا نيروهاي وزني $0/2\,P_y$، $0/4\,P_y$ و $0/6\,P_y$ تحليـل نمـود. در هيچ‌يك از دو راهكار مزبور، عضوها نقص هندسي نخستين ندارند[۹و۱۱].

در اينجا، بار وزني $0/6\,P_y$ به كار مي‌رود و نقص شـكم- دادگي عضوها، همانند شكل (٤) فرض مـي‌گـردد. نمـودار بار- تغييرمكـان روش پيشـنهادي بـه همـراه حـل ناحيـة خميري در شكل (۵) مـي‌آيـد. مشـاهده مـي‌شـود، دقـت راهكار پيشنهادي در برآورد بار نهايي، بسيار خـوب اسـت. همچنين، نقص هندسي، اثر چشم‌گيري در كاهش سختي قاب دارد و بار نهايي را ٦/۵ درصد كاهش مي‌دهد.



شكل ٤: قاب الزاناتي.



شكل ۵: نمودار بار- تغييرمكان قاب الزاناتي.

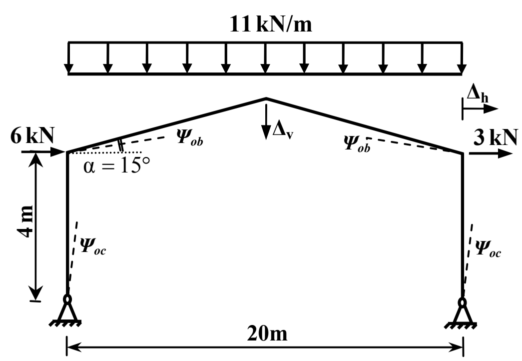
قاب شيب‌دار وگل

نخستين بار، وگـل در سـال ۱۹۸۵، ايـن قـاب را بـه دو شيوة ناحية خميري و مفصل خميري تحليل كـرد. شـكل (٦) هندسة سازه و بارهاي وارد بـه آن را نشـان مـي‌دهـد. براي الگوسازي، وگل بار گستردة روي عضوها را بـا بيسـت بار متمركز به فاصلة ۰/۵ متر جايگزين كرد. نقـص مايـل- بودن ستون‌ها، Ψ_{oc} و تيرها، Ψ_{ob} در روش ناحية خميري، به ترتيب، 1/300 و 1/432 و در شيوة مفصل خميري، به ترتيب، 1/200 و 1/288 به كار رفت. رابطة تنش- كرنش مانـنـد شـكل (۷) مـي‌باشـد. مقطـع‌هـاي سازه از نيمـرخ

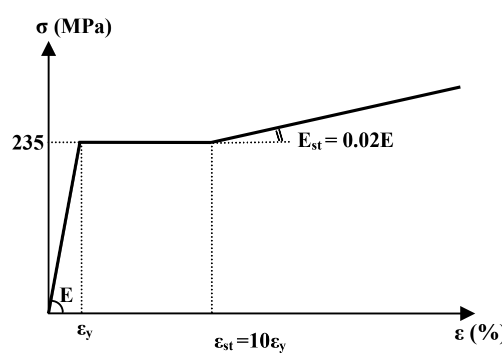
IPE360، تنش تسليم مصالح، ۲۳۵ MPa و ضريب كشساني، ۲۰۵ GPa است. وگل ضريب بار نهايي را در شيوة ناحية خميري، ۱/۰۷ و در روش مفصل خميري، ۰/۹۶ به دست آورد[۱۲].

وايت در سال ۱۹۸۸، شيوة ناحية خميري را براي قاب وگل به كار برد و ضريب بار را ۱/۰۷ تخمين زد. در سال ۱۹۸۹، ساي و همكاران اين قاب را با روش مفصل خميري تحليل كردند و به ضريب بار ۰/۹۷ دست يافتند. درسال ۱۹۹۷، چن و چوي از روش مفصل خميري استفاده كردند و ضريب بار را ۰/۹٦٥ برآورد نمودند[۱۳]. آوري و مهندران در سال ۲۰۰۰، با بهره‌گيري از جزء پوسته‌اي فضايي در نرم افزار ABAQUS، ضريب بار ۱/۰۴ را به دست آوردند[١٤].

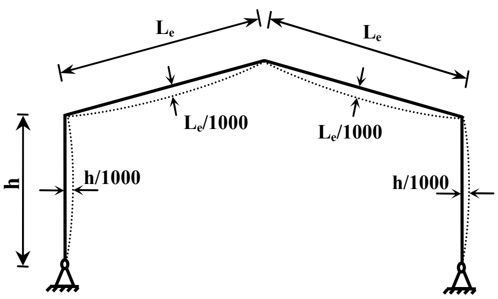
در روش پيشنهادي، هر عضو فقط با يك جزء الگوسازي مي‌شود. اين كار، داده دهي به رايانه و زمان تحليل را كاهش مي‌دهد. شكل (۸)، الگوي نقص هندسي شكم‌دادگي به كار رفته را نشان مي‌دهد. شيوة پيشنهادي، ضريب بار را ۰/۹۸۷ پيش‌بيني مي‌كند. نمودار بار- تغييرمكان جانبي و قائم قاب در شكل‌هاي (۹) و (۱۰) مي‌آيد. مي‌توان ديد، پاسخ روش‌هاي مفصل خميري و ناحية خميري بين ۵ تا ۱۰ درصد اختلاف دارند. از علت‌هاي آن مي‌توان به پديدة سخت شدگی كرنشي و مقدار متفاوت نقص مايل‌بودن عضوها اشاره كرد. از سوي ديگر، اثر نقص شكم‌دادگي عضوها بر مقدار بار نهايي، ناچيز است.



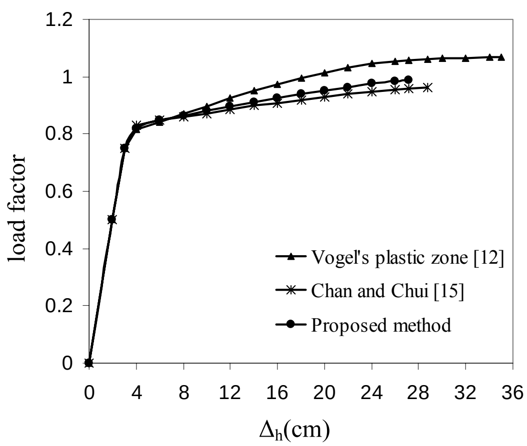
شكل ٦: قاب شيب‌دار وگل.



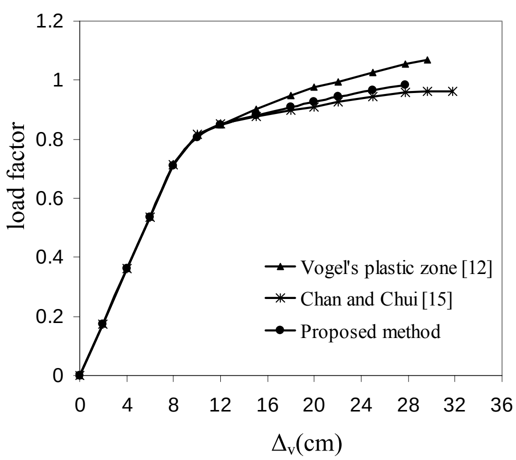
شكل ۷: نمودار تنش- كرنش در قاب‌هاي وگل.



شكل ۸: الگوي نقص شكم‌دادگي در قاب شيب‌دار وگل.



شكل ۹: نمودار بار- تغييرمكان جانبي قاب شيب‌دار وگل.



شكل ۱۰: نمودار بار- تغييرمكان قائم نوك قاب شيب‌دار وگل.

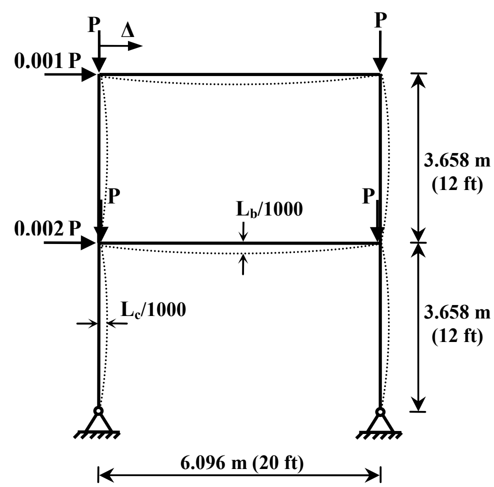
دليل اصلي آن، تغييرمكان جانبي زياد سازه و در نتيجه، حاكم بودن اثر مرتبه دوم P-Δ در پايداري قاب مي‌باشد.

قاب دو طبقة يك دهانه

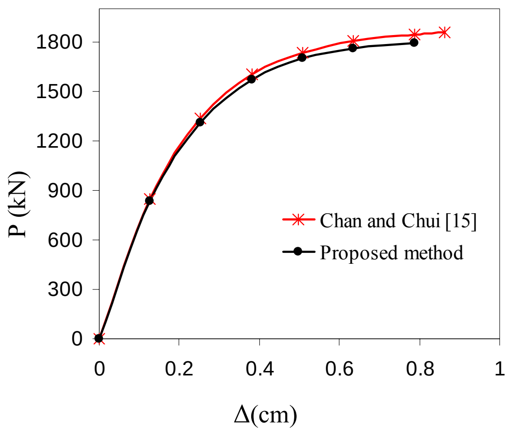
نخستين بار، لوي و چن در سال ۱۹۸۸، اين سازه را در حالت كشسان تحليل كردند. آنها در الگوسازي ستون‌ها، يك جزء و در الگوسازي تيرها، دو جزء به كار بردند. نقص انحناي نخستين در اين قاب وجود ندارد. پس از آن، در سال ۲۰۰۰، چن و چوي اين قاب را در حالت ناكشسان تحليل نمودند. شكل (۱۱)، قاب دو طبقة يك دهانه و بارگذاري آن را نشان مي‌دهد. ستون‌ها از نيمرخ W12×96 و تيرها از نيمرخ W14×48 مي‌باشند. ضريب كشساني، ۲۰۷ GPa (۳۰۰۰۰ ksi) و تنش تسليم مصالح، ۲۴۸ MPa (۳۶ ksi) است[۱۵].

در روش پيشنهادي، نقص انحناي نخستين با الگوي شكل (۱۱)، به قاب افزوده مي‌شود. بار نهايي در اين حالت، ۱۷۹۳ kN به دست مي‌آيد. اين مقدار، در راهكار چن و چوي، ۱۸۵۵ kN است. بنابراين، نقص انحناي نخستين، بار نهايي را حدود ۳/۵ درصد كاهش مي‌دهد. شكل (۱۲)، نمودار بار- تغييرمكان شيوة پيشنهادي و راهكار چن و چوي را نشان مي‌دهد.

بيشتر سازه‌ها زير اثر بارهاي گسترده قرار دارند ولي در بسياري از تحليل‌ها، آنها را با بارهاي گرهي معادل جايگزين مي‌كنند. در سال ۱۹۹۶، ژو و چن بارهاي متمركز وارد بر قاب شكل (۱۱) را، همانند شكل (۱۳)، با بارهاي گستردة يكنواخت جايگزين كردند[۱٦]. در اينجا، بيشتر عضو های سازه ها



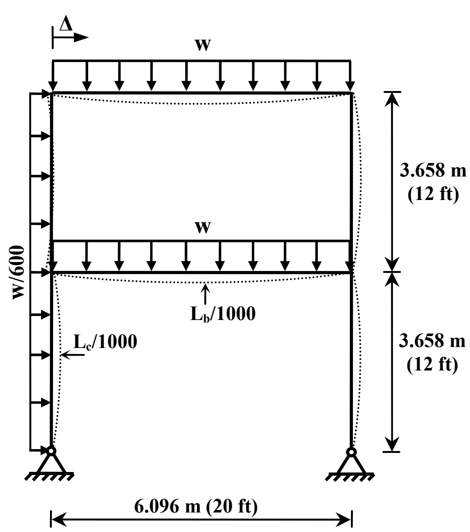
شكل ۱۱: قاب دو طبقة يك دهانه.



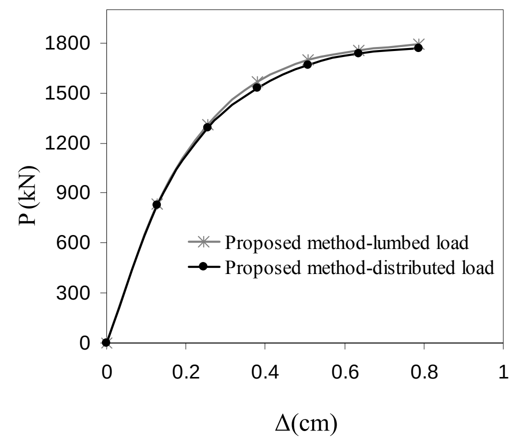
شكل ۱۲: نمودار بار- تغييرمكان قاب دو طبقة يك دهانه.

زير اثر بارهاي گسترده قرار دارند ولي در بسياري از تحليل‌ها، آنها را با بارهاي گرهي معادل جايگزين مي‌كنند. در سال ۱۹۹۶، ژو و چن بارهاي متمركز وارد بر قاب شكل (۱۱) را، همانند شكل (۱۳)، با بارهاي گستردة يكنواخت جايگزين كردند[۱٦]. در اينجا، شدت بارهاي گستردة يكنواخت به گونه‌اي انتخاب شده است كه مقدار نيروهاي وارد به قاب تغيير نكند. بنابراين اگر L_b طول تيرها باشد، رابطة $w = 2P/L_b$ برقرار است.

در اين بارگذاري، بار نهايي روش پيشنهادي، ۱۷۶۶ kN به دست مي‌آيد. نمودار بار- تغييرمكان شيوة پيشنهادي، زير اثر بارهاي متمركز معادل و گستردة يكنواخت، در شكل (۱۴) مقايسه شده است. آشكار است، كاهش سختي زير اثر بارهاي گسترده، شيب ملايم‌تري دارد.



شكل ۱۳: قاب دو طبقة يك دهانه زير اثر بارهاي گسترده.



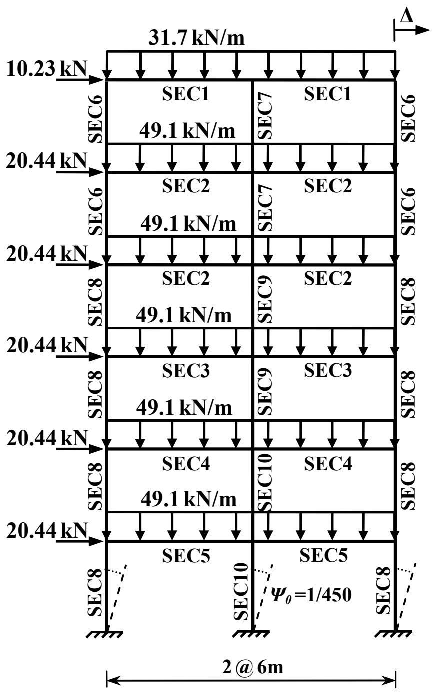
شكل ۱۴: نمودار بار- تغییرمکان قاب دو طبقة يك دهانه زير اثر بارهاي گسترده.

همچنين، بيشينة خطاي متمركز كـردن بارهـاي گسـتردة مياني در گره‌ها، ۲/۵ در صد مي‌باشد.

قاب شش طبقة وگل

وگل در سال ۱۹۸۵، قـابي شـش طبقـه را بـه دو روش ناحية خميري و مفصل خميري تحليل كرد. هندسة قـاب در شكل (۱۵) و نام مقطـع‌هـاي آن در جـدول (۱) آمـده است. وي در تحليل ناحية خميري، ستون‌ها را با يك جزء و تيرها را با هشت جزء الگوسازي نمود. نقـص مايـل‌بـودن ستون‌ها را بر پاية ضابطة آيين‌نامة ECCS، L/۴۵۰ فـرض كرد و براي تيرها، تابع نقص هندسي شكم‌دادگي را سهمي درجة دو با بيشينة L_b/۱۰۰۰ در وسط دهانه پنداشت. L_b طول تيرها مـي‌باشـد. وي اثـر سـخت شـدگی كرنشـي را همانند شـكل (۷) وارد نمـود. او ضـريب بـار نهـايي را در تحليل ناحية خميري و مفصل خميري، به ترتيب، ۱/۱۱۱ و ۱/۱۲ به دست آورد. تنش تسـليم مصـالح، MPa ۲۳۵ و ضريب كشساني، GPa ۲۰۵ مي‌باشد[۱۲].

در سال ۱۹۸۹، زايمن اين قاب را با روش ناحية خميري و به كمك جزءهاي رشته‌اي تحليل كرد. وي، ستون‌ها را با يك جزء و تيرها را با چهار جزء الگوسـازي نمـود. زايمـن، ضريب بار را ۱/۱۸ بـه دسـت آورد[۱۷]. در همـين سـال، ساي و همكاران با بـه كـار بـردن شـيوة ناحيـة خميـري، ضريب بار را ۱/۱۸ تخمين زدند. در سال ۱۹۹۳، كلارك و همكاران در تحليلـي مشـابه، ضـريب بـار را ۱/۱۷ بـرآورد كردند[۱۳]. آوري و مهندران در ۲۰۰۰، بـا بهـره‌گيـري از جزء پوسته‌اي فضايي در نرم افزار ABAQUS، ضريب بـار ۱/۲۳ را به دست آوردند[۱٤]. ازآنجا كه روش‌هـاي ناحيـة خميري اثر سخت شدگی كرنشي را وارد تحليل مي‌كننـد، مقاومت قاب را بيشتر از روش‌هاي مفصل خميري تخمين مي‌زنند.



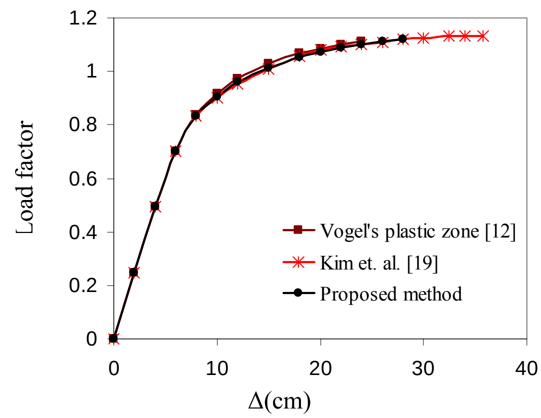
شكل ۱۵: قاب شش طبقة وگل.

جدول ۱: مقطع‌هاي قاب شش طبقة وگل.

Section	Name	Section	Name
SEC1	IPE240	SEC6	HEB160
SEC2	IPE300	SEC7	HEB200
SEC3	IPE330	SEC8	HEB220
SEC4	IPE360	SEC9	HEB240
SEC5	IPE400	SEC10	HEB260

كينگ و همكاران در سال ۱۹۹۲، قاب وگل را با روش مفصل خميري تحليل كردند. آنها، ضريب بار را در شـيوه‌هاي گوناگون مفصل خميري، بين ۱/۱۰ تا ۱/۱۳ برآورد نمودند[۹]. ليو و همكاران نيز در سال ۱۹۹۳، ضريب بـار را ۱/۱۱۸ تخمين زدند[۱۷]. چن و چـن در سـال ۱۹۹۵، روش مفصل خميري با فنرهاي گرهي را به كار بردند و به ضريب بار ۱/۱۴ دست يافتند[۱۸]. در سال ۱۹۹۷، چـن و كيم، اثر نقص هندسي شكم‌دادگـي را بـه صـورت مسـاله افزودند و ضريب بار را با روش مفصل خميري، ۱/۱۲۰ بـه دست آوردند[۵]. در همين سال، چن و چوي قاب وگـل را

با راهكار مفصل خميـري تحليـل كردنـد و ضـريب بـار را ۱/۱۲۵ تخمين زدند[۱۳]. دريكي از تازه‌ترين پـژوهش‌هـا در سال ۲۰۰۴، كيم و همكاران شيوة مفصل خميري را به كار بردند و ضريب بار را ۱/۱۳۱ برآورد نمودند[۱۹].



شكل ۱۶: نمودار بار- تغييرمكان جانبي قاب شش طبقة وگل.

در شيوة پيشنهادي، نقـص انحنـاي نخسـتين بـا بيشـينة L/۱۰۰۰ به هندسة همة عضوهاي سازه افـزوده مـي‌شـود. نمودار بار- تغييرمكان جـانبي قـاب در شـكل (۱۶) آمـده است. روش پيشنهادي نويسـندگان، ضـريب بـار نهـايي را ۱/۱۲۱ به دست مي‌آورد و خطاي آن در مقايسـه بـا حـل ناحية خميري، ۱ درصد است. بيشـتر شـيوه‌هـاي مفصـل خميري، ضريب بار را به خوبي تخمين مي‌زنند. دليـل آن، بالا بودن درجة نامعيني سازه مي‌باشد. بايـد آگـاه بـود، بـا افـزايش درجـة نـامعيني، خطـاي رفتـار بـار- تغييرمكـان درراهكارهاي گوناگون كاهش مي‌يابد[۱۷]. افزون بـر ايـن، نقص شكم‌دادگي عضوها، اثر نـاچيزي بـر مسـير ايسـتايي ناكشسان سـازه مـي‌گـذارد. دليـل اصـلي آن، تغييرمكـان جانبي زياد سازه مي‌باشد. اين پديده، سبب كم شدن تاثير رفتار مرتبه دوم P-δ در پايداري قاب مي‌گردد و از اهميت نقص انحناي نخستين مي‌كاهد.

نتيجه‌گيري

شكم‌دادگي عضوها اثري منفي بر ظرفيت بـاربري سـازه مي‌گذارد. اگر در پايـداري سـازه، اثـر مرتبـه ی دوم P-Δ تعيين كننده باشد، اهميت انحناي نخستين عضوها كمتـر مي‌شود. از سوي ديگر، هنگامي‌كه اثـر مرتبـه ی دوم P-δ درتحليـل وارد گـردد، ايـن عامـل نقشـي تاثيرگـذار پيـدا مي‌كند. افزون بر ايـن، در صـورتي كـه مقـدار بيشـينه ی شكم‌دادگي كوچك باشد، اغلب مي‌توان از آن چشم‌پوشـي نمود. با وجود اين، پيشنهاد مـي‌شـود كـه اثـر ايـن نقـص همواره در تحليل‌هاي مرتبه دوم وارد گردد. زيـرا، قضـاوت درباره ی ميزان اهميت اثرهـاي P-δ و P-Δ در بسـياري از سازه‌ها دشوار است. انحنـاي نخسـتين عضـوها در بيشـتر نمونه‌هاي عددي اين مقاله، ۰/۰۰۱ طـول آن هـا انتخـاب شـد. ايـن مقـدار، حـد مجـاز پيشـنهادي بسـياري از آيين‌نامه‌هاي معتبر تحليل و طراحي حالت حدي مي‌باشد. تحليل نشان داد كه بـار نهـايي ناكشسـان تـا ۶/۵ درصـد كاهش مي يابد. آشكار شد، براي وارد كردن غير مسـتقيم اثرهاي غيرخطي در تحليل، هميشه نمي‌توان به رابطه‌هاي پيشنهادي آيين‌نامه‌ها بسنده كرد و بايد بـه دنبـال يـافتن الگوهاي دقيق‌تر بود. بايد افزود، نمونه‌هاي عددي ديگـري نيز با روش پيشنهادي تحليل شده‌اند و نتيجه‌هاي تحليـل هـم‌خـواني خـوبي بـا پاسـخ‌هـاي ناحيـه ی خميـري و آزمايشگاهي دارد.

مراجع

1- Chan, S. L. (2001). "Review: nonlinear behavior and design of steel structures." Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, PP. 1217-1231.

2- Kim, S. E. and Lee, D. H. (2002). "Second-order distributed plasticity analysis of space steel frames." *Engineering Structures,* Vol. 24, PP. 735-744.

3- Chan, S. L. and Zhou, Z. H. (1995). "Second-order elastic analysis of frames using single imperfect element per member." *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 6, PP. 939-945.

4- Chan, S. L. and Gu, J. X. (2000). "Exact tangent stiffness for imperfect beam-column members." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 126, No. 9, PP. 1094-1102.

5- Chen, W. F. and Kim, S. E. (1997). *LRFD steel design using advanced analysis.* CRC Press, Boca Raton, New York.

6- Liew, J. Y. R., White, D. W. and Chen, W. F. (1993). "Second-order refined plastic-hinge analysis for frame design. Part I." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 119, No. 11, PP. 3196-3216.

7- Ziemian, R.D. and McGuire, W. (2002)."Modified tangent modulus approach, a contribution to plastic hinge analysis" ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 10, PP. 1301-1307.

۸- رضایی پژند، محمد و رسول‌زاده باغمیشه، وحید (۱۳۸۰)، "ثر تابعهای کاهش سختی در تحلیل قابها با مفصل خمیری." نشریة دانشکده فنی، جلد ۳۵، شمارة ٤، صص ٤۹۹ تا ٥۱۱.

9- King, W. S., White, D.W. and Chen, W. F. (1992). "Second-order inelastic analysis for steel frame design." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 118, No. 2, PP. 408-428.

10- Duan, L. and Chen, W. F. (1989). "Design interaction equation for doubly symmetrical sections." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 115, No. 5, PP. 1225-1243.

11- Toma, S., Chen, W. F. and White, D. W. (1995). "A Selection of calibration frames in North America for second-order inelastic analysis." *Engineering Structures,* Vol. 17, PP. 104-112.

12- Toma, S. and Chen, W.F. (1992). "European calibration frames for second-order inelastic analysis." *Engineering Structures,* Vol. 14, PP. 7-14.

13- Chan, S. L. and Chui, P. P. T. (1997). "A generalized design-based elastoplastic analysis of steel frames by section assemblage concept." *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 8, PP. 628-636.

14- Avery, P. and Mahendran, M. (2000). "Distributed plasticity analysis of steel frame structures comprising non-compact sections." *Engineering Structures,* Vol. 22, PP. 901-919.

15- Chan, S. L. and Chui, P. P. T. (2000). *Nonlinear static and cyclic analysis of steel frames with semi-rigid connections.* Elsevier Science, Amsterdam.

16- Zhou, Z. H. and Chan, S. L. (1996). "Refined second-order analysis of frames under lateral and axial loads." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 122, No. 5, PP. 548-554.

17- Liew, J. Y. R., White, D. W. and Chen, W. F. (1993). "Second-order refined plastic-hinge analysis for frame design. Part II." *ASCE, Journal of Structural Engineering,* Vol. 119, No. 11, PP. 3217-3237.

18- Chen, W. F. and Chan, S. L. (1995). "Second-order inelastic analysis of steel frames using element with midspan and end springs." *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 3, PP. 530-541.

19- Kim, S. E., Lee, J. S., Choi, S. H. and Kim, C. S. (2004). "Practical second-order inelastic analysis for steel frames subjected to distributed load." *Engineering Structures*, Vol. 26, PP. 51-61.

پیوست

عامل‌هاي به كار رفته در رابطـه‌هـاي (۲۱) تـا (۲۵) بـه صورت زير مي‌باشند:

$$R_1 = \frac{1}{B_1^{\,3}}\left[4(80)^2 + (\frac{52}{7})(80)\rho + (\frac{92}{21})\rho^2 + (\frac{23}{1260})\rho^3\right] \quad (۴۵)$$

$$R_2 = \frac{1}{B_2^{\,3}}\left[4(48)^2 + (\frac{28}{5})(48)\rho + (\frac{132}{35})\rho^2 + (\frac{11}{420})\rho^3\right] \quad (۴۶)$$

$$R_3 = \frac{-16[7(48)+5\rho]}{35B_2^{\,3}} \quad (۴۷)$$

$$R_4 = \frac{11(392099 + (33/7)(48)^2\rho + 144\rho^2 + \rho^3)}{60B_2^{\,3}} \quad (۴۸)$$

$$R_5 = \frac{-5120(60+\rho)}{21B_1^{\,4}} \quad (۴۹)$$

$$R_6 = \frac{-3072(84+\rho)}{35B_2^{\,4}} \quad (۵۰)$$

$$R_7 = \frac{32(384+5\rho)}{35B_2^{\,4}} \quad (۵۱)$$

$$R_8 = \frac{-11[1528181 + 8(48)^2\rho]}{140B_2^{\,4}} \quad (۵۲)$$

$$R_9 = \frac{-\rho\,(144+\rho)}{35{B_2}^4} \tag{۵۳}$$

$$R_{10} = \frac{-256[29(48)^2 + 17(48)\rho]}{35{B_2}^4} \tag{۵۴}$$

$$R_{11} = \frac{32[3120+41\rho]}{35{B_2}^4} \tag{۵۵}$$

$$B_1 = \rho + 80 \tag{۵۶}$$

$$B_2 = \rho + 48 \tag{۵۷}$$

$$\rho = \frac{PL^2}{EI} \tag{۵۸}$$

ماتريس‌هاي به كار رفته در رابطة (۴۴) به قرار زيرند:

$$[T] = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} -L & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & L & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & L \end{bmatrix} \tag{۵۹}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_J & 0 \\ 0 & R_J \end{bmatrix} \;,\; [R_J] = \begin{bmatrix} C & S & 0 \\ -S & C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۶۰}$$

$$[RBM] = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} 0 & Q & 0 & 0 & -Q & 0 \\ Q & P & 0 & -Q & -P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Q & 0 & 0 & Q & 0 \\ -Q & -P & 0 & Q & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{۶۱}$$

در رابطه‌هاي كنوني، $C = Cos\theta$ و $S = Sin\theta$ مي‌باشد. θ زاوية وتر وصل كنندة دو سر جزء با جهت مثبت محور افقي و L طول تغيير يافتة جزء در پايان گام پيشين بارگذاري است. P نيروي محوري جزء مي‌باشد و در حالت كششي مثبت است. Q نيز به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$Q = \frac{M_i + M_j}{L} \tag{۶۲}$$

ساير متغيرها پيش از اين تعريف شده‌اند.

واژه‌هاي انگليسي استفاده شده در متن

1- Geometrical imperfections	2- Beam-column	3- Initial out-of-straightness
4- Transverse distributed load	5- Inelastic	6- Tangent stiffness matrix
7- Advanced analysis	8- Planar steel frames	9- Plastic zone
10- Second-order	11- Plastic hinge	12- Elastic-perfectly plastic
13- Basic member coordinates	14- Total potential energy	15- Strain energy
16- Stability functions	17- Residual stress	18- Tangent modulus
19- Gradual plastification	20- Stiffness degradation function	21- Initial yield moment
22- Reduced plastic moment	23- Initial yield surface	24- Full yield surface
25- Incremental-iterative strategy	26- Load control method	27- Modified Newton-Raphson method
28- Ultimate load factor	29- Stability	30- Space shell element