

تبیین رفتار پیچشی هسته‌های برشی در ساختمان‌های بلند با کاربرد المان‌های محدود ساخته‌شده بر مبنای توابع کرنش

افشین مشکوه‌الدینی^۱؛ محسن تهرانی زادهⁱⁱ

چکیده

کاربرد سازه‌های هسته برشی در ساختمان‌های چند طبقه و بلند، یکی از روش‌های افزایش مقاومت پیچشی سازه در کنار ازدیاد مقاومت جانبی است. در این خصوص، توجه به چگونگی ساخت یک مدل ریاضی مناسب برای توضیح رفتار هسته‌های برشی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. اجزای محدود ساخته شده بر مبنای توابع کرنش، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های هسته برشی هستند. موضوع این مقاله در زمینه تحلیل رفتار پیچشی هسته‌های برشی در ساختمان‌های بلند، با استفاده از یک جزء محدود پیشنهادی است. جنبه‌های مورد توجه در این خصوص، قابلیت مدل‌کردن پانل‌های صفحه‌ای تشکیل‌دهنده سازه هسته‌برشی و همچنین توانایی دوران هماهنگ با چرخش تیرهای اتصال در ساختمان‌های بلند است. تبیین فرضیات رفتاری ساختمان‌های بلند در ساختار ریاضی المان پیشنهادی، سبب همگرایی سریع روند تحلیل می‌شود. همچنین تعریف ویژگی‌های رفتار خمشی-برشی در توابع کرنش المان محدود پیشنهادی همراه با توصیف حرکت جسم صلب تاوهای کف طبقات، به ایجاد یک مدل تحلیلی با تعداد اندک المان مورد نیاز، منجر خواهد شد. مثال‌های تحلیلی برای نشان دادن قابلیت‌های المان تنش مستوی پیشنهادی در مدل‌سازی رفتار پیچشی هسته‌های برشی ارائه شده‌اند.

کلمات کلیدی

ساختمان بلند، هسته برشی، رفتار پیچشی، جزء محدود تنش مستوی، درجه آزادی دورانی.

Assessment of Torsional Response of Shear Cores in Tall Buildings using Strain Based Finite Elements

A. Meshkat Dini, M. Tehranizadeh

ABSTRACT

Application of shear cores in multistory and tall buildings is one of the ways to increase the torsional resistance as well as the lateral resistance of the structure. It should be noted that the application of an efficient analytical model to explain the action of shear cores is important. The strain based finite elements are suitable to model and analyze shear core structures. In this paper, based on using a presented strain based finite element, the torsional behavior of shear cores in tall buildings is studied. The analytical formulation of the presented finite element has been developed based on the assumptions of tall buildings behavior. The capability of modeling of the plane panels which construct the shear core structure and the ability of producing compatible rotations with lintel beams in tall building, are the notable points of view based on the application of the presented finite element. Examples are given to show the great accuracy of the presented finite element in modeling of torsional behavior of shear cores.

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: a_meshkat@aut.ac.ir

ⁱⁱ استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: tehz@gov.ir

KEYWORDS

Tall Building, Shear Core, Torsional Response, Plane Stress Element, Rotational Degree of Freedom.

تغییر مکان، است. مطالعات نشان می‌دهد که در هر دو دسته اجزای محدود مذکور، تبیین حالت خمش خالص سبب بهبود کارایی و افزایش توانایی المان در توضیح رفتار دیوار برشی می‌شود. شایان ذکر است که تدوین ویژگی فوق، سبب آشکار شدن برخی ناهنجاری‌های رفتاری در جزء محدود و همچنین در مدل سازه، می‌گردد. عمومی‌ترین این ناهنجاری‌ها با نام قفل‌شدگی برشی (Shear Locking)، خمش ساختگی (Artificial Flexure)، برش اضافی (Parasitic Shear) شناخته شده‌اند [۹]-[۱۳].

ویژگی‌های رفتاری المان پیشنهادی در این پژوهش، به گونه‌ای است که از ناهنجاری‌های فوق تاثیر نمی‌پذیرد. المان محدود پیشنهادی، بر اساس فرضیات حاکم بر رفتار ساختمان‌های بلند ساخته شده است. همچنین کارایی این جزء محدود در ارزیابی رفتار پیچشی هسته‌های برشی نشان داده شده است. ساختار محاسباتی جزء محدود پیشنهادی بر پایه توضیح ویژگی‌های رفتار خمشی دیوار برشی و با در نظر گرفتن تاثیرات افزایش درجه میدان کرنش حاکم بر رفتار المان، تدوین شده است.

۲- فرضیات رفتاری ساختمان‌های بلند

توجیه فرضیات رفتاری ساختمان‌های بلند، بر شناخت رفتار سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی نظیر قاب خمشی و دیوار برشی استوار است. فرضیات ذیل برای تحلیل رفتار سازه ترکیبی قاب-دیوار و هسته برشی به کار برده می‌شوند.

- تنش‌ها و کرنش‌های جانبی پانل دیوار برشی قابل چشم‌پوشی است.

- تاوهای کف طبقات، با صلبیت درون صفحه‌ای بی نهایت فرض می‌شوند.

- تغییرشکل‌های موضعی اعوجاجی (Local Distortional Deflections) در سازه‌های مقاوم غیرصفحه‌ای نظیر هسته‌های برشی در مقایسه با تغییرشکل‌های تابیدگی (Warping Deflections) و تغییرشکل‌های پیچشی (Torsional Deflections) سازه، ناچیز است.

بزرگتر بودن دو بعد طولی و عرضی پانل دیوار برشی نسبت به ضخامت آن، سبب ایجاد برآیندهای نیرویی ناشی از اثرات رفتار تنش مستوی و حاکم شدن خمش درون صفحه خواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که تنش‌های هم راستای بارهای جانبی، بسیار کمتر از تنش‌های خمشی هستند [۱۴]-

۱- مقدمه

مطالعات و تحقیقات موجود، نشان می‌دهند که موضوع اساسی در تدوین روش‌های تحلیلی ساختمان‌های بلند و بویژه کاربرد روش اجزای محدود، افزایش قابلیت و کارایی مدل ریاضی سازه است. جامعیت مقوله فوق در شناخت رفتار سازه‌های بلند، تبیین شده و زمینه‌ساز ابداع روش‌های تحلیلی گوناگون برای ارزیابی و تحلیل رفتار این سازه‌ها بوده است [۱]-[۴].

سازه‌های هسته برشی یکی از سیستم‌های کاربردی در ساختمان‌های بلند هستند. ویژگی خاص این نوع سازه‌ها، وجود مقاومت پیچشی زیاد است. بدین منظور توجه به خصوصیات رفتار پیچشی سازه‌های هسته برشی، به عنوان عاملی اساسی و تاثیرگذار در کارایی مدل تحلیلی این سازه در نظر گرفته می‌شود.

پانل‌های صفحه‌ای دیوار برشی، سازنده یک سازه هسته‌برشی هستند. هر کدام از این پانل‌ها با المان‌های محدود تنش مستوی، مدل‌سازی می‌شوند. رفتار کلی جزء محدود مدل‌کننده پانل دیوار برشی، بر اساس دو عامل اصلی تابع کرنش برشی و تابع کرنش خمشی توجیه می‌شود. مفهوم اساسی این مقوله نیز در تبیین رفتار خمشی-برشی پانل صفحه‌ای دیوار برشی، نهفته است. به بیان روشن‌تر، ترکیب فرضیات رفتاری سازه‌های بلند با اصول خمش تیرها، پایه اصلی ساخت المان‌های مدل‌کننده پانل‌های دیوار برشی است [۵]، [۶].

جنبه ریاضی بحث فوق، بر اساس تعریف چندجمله‌ای‌های جبری برای هر کدام از توابع کرنش افقی ϵ_x ، خمشی ϵ_y و برشی γ_{xy} ، استوار است. تبیین چند جمله‌ای‌های توانی متغیرهای x و y برای هر کدام از سه تابع یادشده نیز وابسته به چگونگی اختصاص ضرایب پایه α متناظر با درجات آزادی تعریف‌شده در طرح هندسی المان است. کارکرد مستقیم تابع کرنش برشی در توجیه رفتار برشی پانل دیوار است. همچنین تاثیرپذیری رفتار خمشی جزء محدود نیز با توجه به ترکیب اثرات محوری و پخش خطی یا غیرخطی تنش خمشی، توجیه می‌شود. تعریف تابع انحنا در فرمولاسیون تابع کرنش خمشی، از اهمیت بسزایی برخوردار است [۷]، [۸].

پژوهش‌ها بیان‌گر آن است که تعمیم اساسی موضوع فوق در گزینش و طراحی دو دسته اجزای محدود ساخته شده بر مبنای توابع کرنش و المان‌های ساخته شده با توابع پایه

برای جزء محدود خواهد بود. ساختار محاسباتی جزء محدود پیشنهادی بر پایه طرح و تعمیم ویژگی‌های رفتار خمشی همراه با در نظر گرفتن تاثیرات افزایش درجه میدان کرنش، بر پا شده است. شکل (۱-ب) نمایشگر ساختار هندسی جزء محدود پیشنهادی PE (بر اساس نام‌گذاری Panel Element) است.

ساختار هندسی المان پیشنهادی PE به گونه‌ای تدوین شده است که می‌توان حرکت جسم صلب تاوه‌های کف طبقات ساختمان بلند را در لبه‌های بالایی و پایینی این جزء محدود تبیین کرد. در واقع، تعریف درجات آزادی انتقالی u_1 ، u_2 همراه با فرض $\varepsilon_x = 0$ ، نشان‌دهنده این موضوع است. دوران بازوی صلب مربوط به فصل مشترک میان پانل‌های صفحه‌ای سازنده هسته برشی با تاوه‌های کف طبقات نیز بر پایه دو درجه آزادی دورانی ω_1 و ω_2 تبیین شده است. ساختار تحلیلی المان PE به گونه‌ای تدوین شده است که یک تابع انحنای خمشی مرتبه بالا برای توضیح رفتار پانل‌های دیواربرشی و نیز تابع کرنش خمشی ε_y متناظر با آن منظور شده و همچنین فرض رفتار برشی المان PE نیز مطابق با یک المان تیر اولر-برنولی، در نظر گرفته شده است. بر این اساس، تابع انحنای خطی المان تیر اولر-برنولی به یک چند جمله‌ای درجه سوم نسبت به متغیر y تبدیل شده است [۱۵]، [۱۷]، [۱۹].

تعریف تابع انحنای مرتبه بالا، بر اساس تبیین ویژگی‌های رفتاری حاصل از مود ترکیبی خمشی-برشی حاکم بر رفتار ساختمان‌های بلند، مورد نظر قرار می‌گیرد. توابع کرنش حاکم بر رفتار المان PE به قرار زیر است.

$$(\varepsilon_x)_{PE} = 0 \quad (1)$$

$$(\varepsilon_y)_{PE} = \alpha_4 + (\alpha_5 + \alpha_7 + \alpha_8 y^3)x \quad (2)$$

$$(\gamma_{xy})_{PE} = \alpha_6 + \alpha_7 y \quad (3)$$

پخش خطی تابع کرنش برشی، ساده‌ترین نوع آن برای جزء محدود تبیین‌کننده رفتار تیری است. بدین منظور درجه تابع γ_{xy} المان پیشنهادی PE نشان داده شده در شکل (۱-ب)، با ساختار خطی در نظر گرفته شده است.

$$\gamma_{xy} = \gamma_1 \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{y}{L_{13}} \right) \right] + \gamma_2 \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{y}{L_{13}} \right) \right] \quad (4)$$

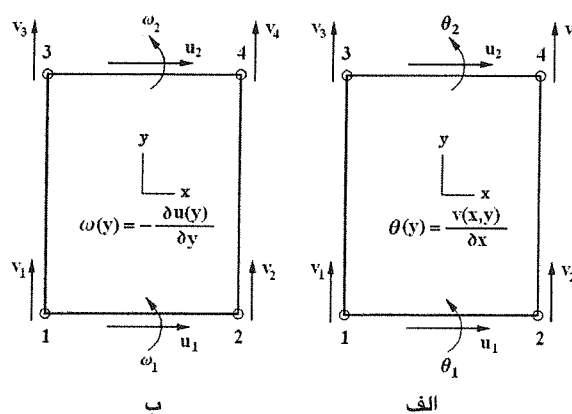
$$L_{13} = 2b \quad (5)$$

L_{13} برابر ارتفاع جزء محدود است. γ_1 و γ_2 نیز مقادیر کرنش برشی در لبه‌های پایینی و بالایی المان است و آنها را می‌توان بر حسب درجات آزادی المان تعریف کرد.

مسئله تغییرشکل ناچیز مقطع دیوارهای برشی صفحه‌ای و سیستم‌های غیرصفحه‌ای هسته برشی، بر پایه صلیبیت درون صفحه‌ای بسیار زیاد کف‌ها توجیه می‌شود. در محل برخورد پانل‌های دیوار برشی و نیز فصل مشترک مقطع یک هسته برشی با تاوه کف طبقه، یک ساختار صلب مجازی بوجود می‌آید. این بخش صلب در دیوارهای برشی صفحه‌ای به صورت یک تیر صلب برشی است و در هسته‌های برشی به شکل یک قاب صلب برشی است [۱۸]–[۲۰].

۳- ساختار تحلیلی جزء محدود پیشنهادی

بررسی تعاریف مختلف ارائه شده برای دوران جسم صلب مربوط به فصل مشترک میان پانل دیوار برشی و تاوه کف طبقه، بیان‌گر دو شکل کلی این مقوله است. بدین منظور تعریف درجه آزادی دورانی در مدل‌سازی ساختمان‌های بلند بر اساس دو دوران نشان داده شده در شکل (۱) انجام می‌گیرد. نخستین تعریف بر پایه توجیه چرخش فصل مشترک یاد شده، به صورت دوران محور افقی پانل دیوار برشی و با نام زاویه θ تدوین شده است (شکل ۱-الف). روش دیگر تعریف قابلیت دورانی المان محدود در مدل‌سازی ساختمان‌های بلند، جایگزینی چرخش محور عمودی پانل دیوار برشی با زاویه ω است (شکل ۱-ب). مطابق پژوهش‌های انجام شده، تنها طرح درست برای تعریف دوران، مطابق شکل (۱-ب) است [۲۱]. این تعریف دوران در جزء محدود پیشنهادی نیز در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): تعریف دوران در مدل‌سازی دیوار برشی، الف- دوران محور افقی، ب- دوران محور عمودی

درجات آزادی u و ω در نظر گرفته شده در شکل (۱-ب)، توجیه‌کننده انتقال و دوران جسم صلب تاوه‌های کف است. بدیهی است که چرخش و انتقال صلب گونه در لبه‌های افقی پایینی و بالایی المان، تداعی‌کننده حرکت بدون کرنش افقی ε_x

اجزای محدود، به دلیل کامل بودن تابع $v(x,y)$ و نیز وجود جمله $\alpha_3 x$ در تابع تغییرمکان مذکور، اضافه شدن جمله $\alpha_6 x$ سبب وارون ناپذیر شدن ماتریس ضرایب ثابت المان خواهد شد. بدین خاطر امکان تدوین تحلیلی دو تابع تغییرمکان $u(y)$ و $v(x,y)$ و همچنین تعیین توابع شکل المان (Shape Functions)، وجود نخواهد داشت. با توجه به مطلب فوق، رابطه تحلیلی صحیح برای تابع f_2 به صورت $f_2(x) = 0$ خواهد بود. این حالت، تنها وضعیت منحصر به فردی است که بر اساس آن می‌توان طبق روش عمومی اجزای محدود، ماتریس سختی را محاسبه کرد. بر این اساس، تابع $f_1(y)$ از انتگرال‌گیری طرف دوم رابطه (۱۳) نسبت به متغیر y حاصل خواهد شد. روش مذکور در فرمولاسیون تحلیلی المان‌های پیشنهادی دارای هفت و نه درجه آزادی، ارایه شده در مراجع [۱۵]، [۱۷] و [۱۹] نیز به کار برده شده است. تابع $f_1(y)$ در رابطه (۱۴) داده شده است:

$$f_1(y) = -\frac{1}{2}\alpha_5 y^2 + \alpha_6 y - \frac{1}{20}\alpha_8 y^5 \quad (14)$$

بدین ترتیب با جایگزینی توابع $f_1(y)$ و $f_2(x)$ در روابط (۱۱) و (۱۲)، شکل پارامتری توابع تغییرمکان u و v حاصل خواهد شد. وجود جملات مرتبه بالای متغیر y در تابع $u(y)$ مربوط به المان PE سبب جلوگیری از آشکار شدن اثرات برش اضافی خواهد شد. بدیهی است که تابع تغییرمکان افقی $u(y)$ ، توجیه‌کننده فرض حرکت جسم صلب تاوه های کف طبقات $\varepsilon_x = 0$ است. با توجه به رابطه $\omega = -\partial u(y)/\partial y$ ، عبارات تحلیلی مربوط به هر دو درجه آزادی دوران درون صفحه ω_1 و ω_2 نیز به دست می‌آیند. توجیه فرض دوران جسم صلب در محل فصل مشترک میان پانلهای دیوار برشی و تاوه های کف طبقات نیز بر اساس دو مقدار ثابت $\omega_1 = -\partial u(-b)/\partial y$ و $\omega_2 = -\partial u(b)/\partial y$ اثبات می‌شود. بر طبق روابط (۴) و (۵) و نیز شکل (۱)، پارامترهای b و $-b$ عبارت از دو تراز ارتفاعی المان در لبه‌های افقی بالایی و پایینی هستند.

۴- رفتار المان در لبه‌های عمودی

بر طبق عبارت پارامتری حاصل از رابطه (۱۲)، تابع تغییرمکان عمودی المان PE به صورت یک رابطه غیرخطی نسبت به متغیر y است. تعریف ساختار جبری این تابع برای دو لبه عمودی $x=a$ و $x=-a$ ، چنانچه المان با اجزای محدود کناری خود پیوسته باشد، امکان‌پذیر نخواهد بود. ناسازگاری یاد شده، سبب آشکار شدن پاره‌ای ناهنجاری‌های رفتاری در مدل تحلیلی

$$\gamma_1 = \theta_1 - \omega_1 = \frac{1}{L_{12}}(v_2 - v_1) - \omega_1 \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \theta_2 - \omega_2 = \frac{1}{L_{12}}(v_4 - v_3) - \omega_2 \quad (7)$$

$$L_{12} = 2a \quad (8)$$

L_{12} نیز طول ضلع افقی المان است. تابع ε_y به گونه‌ای است که تابع $v(x,y)$ ، وابسته خطی متغیر x خواهد بود. بنابراین، مشتق آن نسبت به x ، فقط تابع y می‌باشد. وجود اثرات برش در رفتار خمشی المان PE با ضریب پایه α_7 توجیه شده است. جمله $(\alpha_5 + \alpha_8 y^3)$ نیز بیان‌گر طرح عمومی انعطاف‌پذیری خمشی جزء محدود است. بدین ترتیب، تابع انحنای المان از درجه سوم نسبت به متغیر y است. این روش در تدوین تابع کرنش خمشی مربوط به هر کدام از المان‌های پیشنهادی مرجع [۷] نیز استفاده شده است. تغییرمکان‌های بدون کرنش و تعریف‌کننده حرکت جسم صلب جزء محدود PE با شکل زیر توصیف می‌شود.

$$u_{rbm} = \alpha_1 - \alpha_3 y \quad (9)$$

$$v_{rbm} = \alpha_2 + \alpha_3 x \quad (10)$$

بدیهی است که توابع کرنش حاصل از دو تغییرمکان u_{rbm} و v_{rbm} ، برابر با صفر هستند. شکل پارامتری توابع $u(y)$ و $v(x,y)$ المان PE بر پایه روش عمومی اجزای محدود به دست می‌آید. توابع تغییرمکان این جزء محدود به صورت زیر است:

$$[u(y)]_{PE} = \alpha_1 - \alpha_3 y + f_1(y) \quad (11)$$

$$[v(x,y)]_{PE} = \alpha_2 + \alpha_3 x + \int \varepsilon_y dy + f_2(x) \quad (12)$$

$f_1(y)$ و $f_2(x)$ توابع تکمیل‌کننده میدان تغییرمکان جزء محدود PE هستند. توابع مذکور از بررسی اتحاد ریاضی عبارات جبری در دو سوی رابطه کرنش برشی، با جایگزینی عبارات $\partial u/\partial y + \partial v/\partial x$ به جای نماد γ_{xy} در رابطه (۳) و استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند. چنانچه از توابع ε_x ، ε_y ، انتگرال‌گیری شود و نتایج حاصل در رابطه محاسباتی کرنش برشی $\gamma_{xy} = \partial u/\partial y + \partial v/\partial x = \alpha_6 + \alpha_7 y$ قرار داده شود، پس از عملیات جبری مربوطه و ساده‌سازی عبارات، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial f_1(y)}{\partial y} + \frac{\partial f_2(x)}{\partial x} = -\alpha_5 y + \alpha_6 - \frac{1}{4}\alpha_8 y^4 \quad (13)$$

مطالعات نویسندگان نشان می‌دهد که طبق روش عمومی

$$[u(y)]_{PE} = [u(y)]_{PE_R} = [u(y)]_{PE_L} = [u(y)]_{PE_B} \quad (15)$$

$$[v(x, y)]_{PE} = [N_{v1}(x, y)] \times v1 + [N_{v2}(x, y)] \times v2 + [N_{v3}(x, y)] \times v3 + [N_{v4}(x, y)] \times v4 + (\alpha_7 y + \frac{1}{4} \alpha_8 y^4) \times x \quad (16)$$

عبارات چهارگانه $[N_{vi}(x, y)]$ در رابطه (۱۶)، توابع شکل متناظر با درجات آزادی انتقال عمودی در المان PE می‌باشند. بر اساس کاربرد روش اجزای محدود، هر چهار تابع مذکور بطور کامل مشابه توابع شکل جزء محدود مستطیل دوخطی Q_4 به دست می‌آیند. همچنین مطابق روش حذف اثرات ناسازگاری تابع تغییرمکان عمودی المان PE، آخرین عبارت رابطه (۱۶) برای گروه اجزای محدود هم‌پایه با المان مذکور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[F_V(x, y)]_{PE} = (\alpha_7 y + \frac{1}{4} \alpha_8 y^4) \times x \quad (17)$$

$$[F_V(x, y)]_{PE_L} = \frac{1}{2} (\alpha_7 y + \frac{1}{4} \alpha_8 y^4) \times (x + a) \quad (18)$$

$$[F_V(x, y)]_{PE_R} = \frac{1}{2} (\alpha_7 y + \frac{1}{4} \alpha_8 y^4) \times (x - a) \quad (19)$$

$$[F_V(x, y)]_{PE_B} = 0 \quad (20)$$

جزء محدود PE در این گروه، دو لبه عمودی ناپیوسته دارد. همچنین المان‌های PE_L و PE_R به ترتیب، تنها در لبه عمودی چپ و لبه عمودی راست با المان کناری خود پیوسته هستند. المان PE_B نیز در هر دو لبه عمودی $x=a$ و $x=-a$ با اجزای محدود کناری خود، پیوسته است. ماتریس سختی المان‌های چهارگانه فوق مطابق روش عمومی اجزای محدود محاسبه می‌شوند.

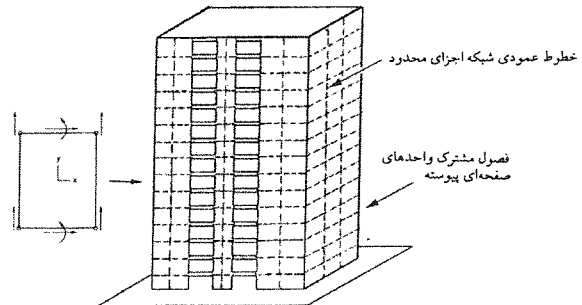
۵- کاربرد گروه اجزای محدود هم‌پایه با المان PE

ساختار تحلیلی المان PE و سه جزء محدود هم‌پایه آن، به گونه‌ای است که رفتار پانل‌های صفحه‌ای تشکیل دهنده یک سازه هسته برشی را مدل می‌کنند. توابع شکل و تغییرمکان متناظر با درجات آزادی u و v ، ایجادکننده یک ساختار پیوسته ریاضی در محل لبه‌های اتصال المان‌ها در مدل سازه هسته برشی خواهند بود. دوران‌های ω_1 و ω_2 نیز قابلیت کوپلینگ با تیرهای اتصال را بوجود می‌آورند.

این قابلیت‌ها، امکان مدل‌سازی سیستم‌های مقاوم مختلف را در درون سازه یک ساختمان بلند ایجاد می‌نماید. نمونه این سیستم‌های مقاوم، دیوارهای برشی کوپل و دیوارهای برشی غیرصفحه‌ای و نیز هسته‌های برشی هستند. کاربرد گروه

سازه هسته برشی می‌شود. پدیدار شدن این ناهم‌انگهی‌ها، در محل فصل مشترک عمودی دیواره‌های سازنده هسته برشی و همچنین خطوط عمودی شبکه اجزای محدود داخلی هر پانل دیوار برشی اتفاق می‌افتد (شکل ۲).

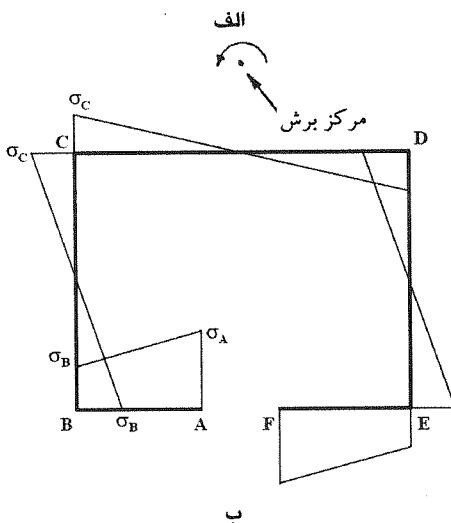
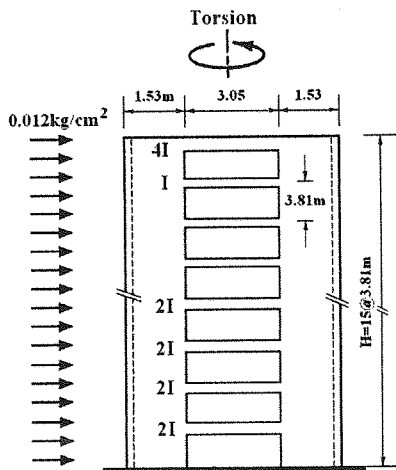
روش اساسی از میان برداشتن چنین تأثیرات ناخواسته‌ای، بر پایه تعریف معادله خط برای وضعیت تغییرشکل یافته لبه‌های پیوسته المان استوار است. بر این اساس، سازگاری کامل برای لبه‌های پیوسته بوجود خواهد آمد. فرایند فوق، یک روش عمومی در برخورد با مسئله ناسازگاری تابع $v(x, y)$ و تأثیرگذاری آن در مدل‌سازی ساختمان‌های بلند است. بدین ترتیب ساختار محاسباتی سازه در وضعیت تغییرشکل یافته، دارای هم‌انگهی کامل خواهد بود. نویسندگان، فرایند تحلیلی یاد شده را در حذف اثرات ناسازگاری تابع v در لبه‌های عمودی برای المان‌های هفت و نه درجه آزادی ارایه شده در مراجع [۱۵]، [۱۷] و [۱۹] نیز مورد استفاده قرار داده‌اند.



شکل (۲): اتصالات متعامد در مدل هسته برشی

کاربرد روش فوق برای تغییر تابع $v(x, y)$ در لبه‌های عمودی پیوسته جزء محدود PE، به آفرینش سه جزء محدود وابسته به المان اصلی منجر خواهد شد. این سه جزء محدود هم‌پایه، دارای یک تابع تغییرمکان افقی مطابق تغییرمکان $u(y)$ المان PE می‌باشند. جزء محدود دوم و سوم (المان‌های PE_L و PE_R) به ترتیب در لبه‌های $x=a$ و $x=-a$ پیوسته است و تابع تغییرمکان عمودی آنها در محل لبه پیوسته، به شکل خطی بازنویسی می‌شود. جزء محدود چهارم (المان PE_B) نیز در دو لبه عمودی $x=a$ و $x=-a$ پیوسته بوده و تابع تغییرمکان عمودی آن به شکل تابع $v(x, y)$ المان مستطیل دوخطی Q_4 است. بنابراین، سازگاری کامل هندسی در هر دو لبه عمودی مربوط به هر چهار المان از این گروه جزء محدود، برقرار خواهد شد. بدین ترتیب یک گروه اجزای محدود هم‌پایه با المان PE، ساخته می‌شود. کاربرد فرایند تحلیلی یاد شده، نتایج زیر را در پی دارد:

گروه اجزای محدود PE، پانل‌های BC، CD، BC و DE نیز هر کدام به ترتیب با چهار المان مدل شده‌اند. نتایج این پژوهش و مراجع دیگر در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. اعداد مثبت و منفی در ستون‌های مربوط به σ_C ، σ_B ، σ_A به ترتیب بیانگر تنش کششی و فشاری است.



شکل (۳): هسته برشی منفرد، الف-نمای سازه، ب-پخش تنش پیچشی در مقطع سازه هسته برشی

نتایج جدول (۱) بیانگر نزدیکی قابل قبول میان پارامترهای رفتاری سازه، حاصل از کاربرد گروه اجزای محدود PE با نتایج سایر مراجع است. با این وجود، تفاوت‌هایی در میان مقادیر متناظر هر کدام از پارامترهای پاسخ سازه مشاهده می‌شود. ریشه و بنیان این اختلافات، بر پایه اصول تحلیلی روش مدل‌سازی لحاظ‌شده در مراجع مذکور، قابل توجیه است. مدل تحلیلی ارایه شده در مرجع [۸] بر پایه یک المان مرتبه پایین و با شش درجه آزادی است. این المان، هیچ درجه آزادی دورانی ندارد. مدل محاسباتی مرجع [۹] نیز بر اساس یک المان

اجزای محدود PE، نیازمند تعریف یک کد شناسایی برای هر کدام از این المان‌های چهارگانه است. در برنامه کامپیوتری نوشته شده، کد شناسایی مذکور برای درایه‌های ماتریس‌های سختی هر چهار المان گروه اجزای محدود PE، تعریف گردیده است. بدین لحاظ امکان تفکیک و شناخت وضعیت‌های مختلف لبه‌های عمودی $x=a$ و $x=-a$ وجود دارد. مطالعات نویسندگان نشان می‌دهد که ساختار تحلیلی و ویژگی‌های رفتاری گروه المان‌های PE به گونه‌ای است که نیاز به تنها یک ردیف از المان‌های این گروه در مدل‌سازی پانل‌های دیوار برشی خواهد بود. بررسی نتایج حاصل از کاربرد این روش مدل‌سازی در مراجع [۷]، [۱۵]، [۱۷] و [۱۹] حاکی از روند سریع همگرایی در تحلیل سازه‌های بلند است.

۶- مثال‌های کاربرد گروه اجزای محدود PE

۶-۱- هسته برشی منفرد

استفاده از هسته‌های برشی دارای یک ردیف تیرهای اتصال در ساختمان‌های بلند عمومیت دارد. مقاومت پیچشی قابل توجه این سازه‌های مقاوم، پارامتری مهم در افزایش سختی پیچشی ساختمان‌های چند طبقه و بلند است. بررسی و تحلیل رفتار پیچشی این سازه‌ها با کاربرد مدل محیط پیوسته و نیز مدل المان‌های دوبعدی قاب‌پایه، در پژوهش‌های مختلف صورت گرفته است [۸]، [۱۲]، [۱۶]، [۲۲].

سازه مثال شکل (۳) از مرجع [۲۲] انتخاب شده است. هسته برشی پانزده طبقه‌ای شکل (۳) دارای مقطع مربعی است. این سازه تحت اثر بارگذاری باد به شدت 0.12 kg/cm^2 قرار دارد. پارامتر I در شکل (۳-الف) ممان اینرسی تیرهای اتصال طبقات پنجم تا چهاردهم می‌باشد. پلان ساختمان به ابعاد $15/25 \times 15/25 \text{ m}$ است. ابعاد تیرهای اتصال $30/5 \times 45/7 \text{ cm}$ و ارتفاع طبقات ساختمان نیز $2/81 \text{ m}$ است. مدول الاستیسیته $E=2/75 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ و مدول برشی $G=1/22 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ در نظر گرفته شده‌اند [۲۲].

پارامترهای رفتار پیچشی این هسته برشی با استفاده از گروه اجزای محدود PE بررسی شده است. مشخصه مهم در سیستم سازه‌ای این نوع هسته‌های برشی، قرار گرفتن مرکز برش در خارج از مقطع سازه و بروز رفتار سه بعدی است. این نکات در ساختار تحلیلی برنامه کامپیوتری نوشته شده در این پژوهش، منظور شده است. پارامترهای مورد بررسی عبارت از تنش قائم ناشی از پیچش سازه در نقاط A، B، C و همچنین زاویه چرخش ϕ_{top} مربوط به بالاترین تراز ارتفاعی سازه می‌باشند. شایان ذکر است که پانل‌های AB و EF با پنج المان از

هشت درجه آزادی با ساختار هندسی مشابه جزء محدود مستطیل دوخطی Q4 ارایه گردیده است. مدل مرجع [۲۳]، یک المان Solid Wall بدون درجه آزادی دورانی است و شش درجه آزادی انتقال افقی و قائم دارد. شایان ذکر است که در هر سه مدل تحلیلی یاد شده، موضوع کاربرد روش‌های متفاوت محاسباتی برای در نظر گرفتن اثر تیرهای اتصال و ایجاد کوپلینگ میان المان‌های تیر اتصال و پانل‌های هسته برشی از جمله موضوعات تاثیرگذار در محاسبه پارامترهای رفتاری سازه است [۸]، [۹]، [۲۳].

جدول (۱): مشخصه‌های رفتاری سازه هسته برشی منفرد

هسته برشی منفرد	$\phi_{Top} \times 10^{-2}$ (rad)	σ_A (kg/cm ²)	σ_B (kg/cm ²)	σ_C (kg/cm ²)
گروه اجزای محدود PE	۳۰/۷۸	-۵۰/۳۳	-۱۱/۱۱	+۲۲/۷۴
[۸]	۳۴/۱۲	-۴۲/۲۲	-۱۰/۷۱	+۲۱/۹۰
[۹]	۳۴/۱۵	-۴۱/۹۸	-۱۰/۷۵	+۲۱/۸۷
[۱۳]	۳۴/۲۶	-۴۲/۵۶	-۱۰/۶۱	+۲۲/۱۵
[۱۴]	۳۴/۸۸	-۴۶/۱۴	-۱۰/۸۶	+۲۲/۴۲
[۲۲]	۲۷/۹۹	-۴۸/۶۶	-۱۸/۳۳	+۲۲/۵۷
[۲۳]	۲۶/۸۷	-۵۶/۲۸	-۱۶/۴۳	+۱۷/۹۱

المان‌های مراجع [۱۳] و [۱۴] به صورت مدل‌های هشت درجه آزادی است و همچنین درجه آزادی دوران درون صفحه نیز دارند. مدل مرجع [۱۳] بر پایه کاهش درجات آزادی تعریف شده در یک المان چهار گرهی با سه درجه آزادی در هر گره و ساخت یک المان محدود با هشت درجه آزادی معادل، تدوین شده است. تابع کرنش برشی این المان از درجه ۲ نسبت به متغیر y است. همچنین المان مرجع [۱۴] نیز یک المان هشت درجه آزادی با تابع انحنای خطی است. این المان بر مبنای توابع کرنش ساخته شده است. شایان ذکر است که کاربرد المان مذکور برای پانل‌های دیوار برشی با عرض مقطع زیاد، منتهی به نتایج تقریبی خواهد شد [۱۳]، [۱۴].

مدل ارایه شده در مرجع [۲۲] بر پایه روش محیط پیوسته (Continuum Analogy) و کاربرد آن در آنالیز ساختمان‌های بلند استوار است. مشخصات و ویژگی‌های تحلیلی مدل‌های تدوین شده بر مبنای روش محیط پیوسته، دارای تفاوت‌های ساختاری با مدل‌های اجزای محدود و قاب‌پایه Solid Wall است. یک تفاوت ساختاری به صورت جایگزینی تیرهای اتصال در هسته‌های برشی با یک مدل الاستیک معادل می‌باشد. تفاوت اساسی دیگر نیز در تعریف و مدل‌سازی اتصال مشترک میان واحدهای صفحه‌ای سازنده هسته برشی است. مفاهیم پایه و مبنای تحلیلی روش مذکور در مراجع [۱]، [۲] و [۱۶] به تفصیل

موجود است.

با توجه به مطلب فوق، در روش مدل‌سازی مرجع [۲۲]، اتصالات میان دیوارهای سازنده هسته برشی بصورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که در مدل‌سازی‌های اجزای محدود و قاب پایه Solid Wall، کلیه اتصالات مشترک میان دیوارهای متعامد سازنده هسته برشی، بصورت گرهی مدل می‌شوند. نمود بارز این تفاوت‌ها بصورت تبدیل برآیندهای تنش حاصل از اندرکنش میان دیوارهای صفحه‌ای مذکور به یک مجموعه نیروهای متمرکز خواهد بود.

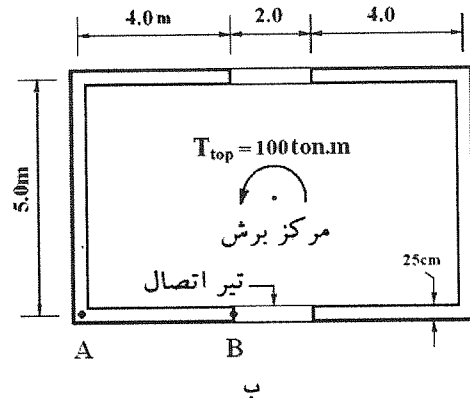
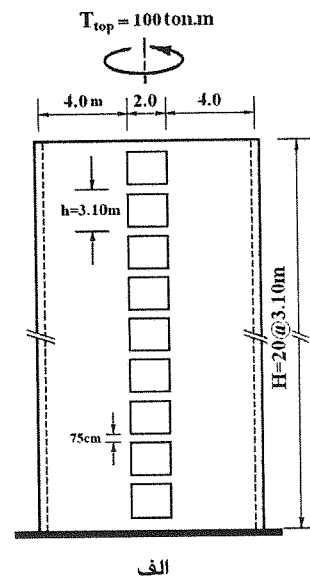
۴-۲- هسته برشی کوپل

هسته برشی بیست طبقه شکل (۴) از نوع متقارن است. ارتفاع طبقات ۳/۱ m بوده و ضخامت دیوارها برابر با ۲۵ cm در نظر گرفته شده‌اند. این سازه مقاوم تحت اثر لنگر پیچشی ۱۰۰ ton.m در بالاترین تراز ارتفاعی ساختمان بلند قرار دارد. سازه مثال شکل (۴) از مرجع [۲۴] انتخاب شده است. پارامترهای مفروض در مرجع [۲۴] بصورت $E=2/75 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $E/G=2/2$ و ضریب پواسون نیز برابر با ۰/۱۰ عنوان شده است. ابعاد مقطع تیرهای اتصال ۲۵ x ۷۵ cm می‌باشد. سیستم سازه‌ای این نوع هسته‌های برشی به گونه‌ای است که مرکز برش و مرکز سختی بر هم منطبق بوده و در یک راستای ارتفاعی قرار دارند.

مهم‌ترین مشخصه‌های رفتاری پیچشی در این سازه، تنش‌های قائم σ_A و σ_B در نقاط گوشه‌ای مقطع و نیز زاویه چرخش ϕ_{Top} مربوط بالاترین تراز ارتفاعی سازه ($Z=H$) است. پانل‌های هم‌راستای تیرهای اتصال با پنج المان و پانل‌های عمود بر راستای تیرهای اتصال نیز با چهار المان گروه PE، مدل شده‌اند. نتایج مطالعات نویسندگان و مراجع دیگر در جدول (۲) گردآوری شده است. این نتایج نشان‌دهنده همگرایی مناسب پاسخ‌های حاصل از مدل‌سازی با المان‌های گروه PE در مقایسه با سایر پژوهش‌ها است.

مقادیر محاسباتی مربوط به σ_B و σ_A در جدول (۲) نشان‌گر وجود تفاوت‌های نسبی بین پاسخ‌های مربوط به هر کدام از تنش‌های یاد شده است. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که پاسخ σ_B مربوط به مرجع [۱۴] و گروه المان‌های PE دارای تفاوت نسبی با سایر مراجع است. مقدار σ_A حاصل از مرجع [۲۳] نیز با سایر مقادیر تفاوت نسبی دارد. چنانچه در مثال سازه هسته برشی منفرد شکل (۳) نیز عنوان شد، دلایل بروز این اختلافات بر پایه وجود تفاوت ساختاری در کاربرد روش‌های تحلیلی محیط پیوسته، اجزای محدود و نیز روش مدل‌سازی قاب‌پایه برای آنالیز رفتار ساختمان‌های بلند است. موضوع دیگر در

رابطه با بروز این اختلافات، بر اساس تمهیدات محاسباتی منظور شده در مدل تحلیلی هر پژوهش برای تعریف المان‌های تیر اتصال و ایجاد کوپلینگ با پانل‌های دیوار برشی است. ساختار کلی مدل‌های ارایه شده در مراجع [۸]، [۹]، [۱۲]، [۱۴] و [۲۳] در مثال سازه هسته برشی منفرد، مطرح شد.



شکل (۴): سازه هسته برشی کوپل، الف- نمای سازه و بارگذاری پیچشی، ب-مقطع سازه

دیوار برشی، به صورت کلی و خلاصه شده در مراجع [۸]، [۹] و [۲۳] مطرح گردیده است. بدین خاطر، موضوعات فوق نیز می‌تواند در بروز اختلاف نتایج تحلیل سازه بویژه برای هسته‌های برشی دارای تیرهای اتصال با ارتفاع مقطع زیاد، تاثیرگذار باشد. شایان ذکر است که مطلب فوق، علاوه بر تفاوت‌های اساسی میان اصول تحلیلی و روش کاربرد مدل‌سازی‌های المان محدود، قاب پایه و محیط پیوسته، مورد نظر قرار می‌گیرد [۱]، [۲]، [۱۶].

جدول (۲): مشخصه های رفتاری سازه هسته برشی کوپل

هسته برشی کوپل	$\phi_{top} \times 10^{-2}$ (rad)	σ_A (kg/cm ²)	σ_B (kg/cm ²)
گروه اجزای محدود PE	۱/۷۸۷	-۰/۸۲۵	-۱/۹۶۱
[۸]	۱/۸۹۵	-۰/۸۹۱	-۱/۴۰۵
[۹]	۱/۹۰۷	-۰/۸۹۰	-۱/۳۹۹
[۱۲]	۱/۶۸۶	-۰/۸۵۱	-۱/۳۹۰
[۱۴]	۱/۷۹۱	-۰/۸۲۵	-۱/۹۵۸
[۲۳]	۱/۶۹۵	-۰/۹۶۲	-۱/۳۶۲
[۲۴]	۱/۷۹۷	-۰/۷۹۶	-۱/۳۰۸

۷- نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تحلیل رفتار ساختمان‌های بلند، بیان گر نیاز به تبیین سه پارامتر مشخصه در توابع تغییر مکان المان‌های محدود با قابلیت کاربرد در موضوع یاد شده، است. پارامتر مشخصه نخست، قابلیت تعریف حرکت جسم صلب تاو‌های کف طبقات است. پارامتر مشخصه دوم نیز تعریف درست درجات آزادی دورانی، منطق با چرخش محور عمودی اتصال تیرها و پانل‌های دیوار برشی می‌باشد. پارامتر مشخصه سوم، قابلیت المان محدود در تحلیل اندرکنش خمشی-برشی پانل‌های دیوار برشی و نیز المان‌های ستون با عرض مقطع زیاد است.

ساختار تحلیلی المان پیشنهادی PE، تبیین کننده هر سه پارامتر مذکور است. بر این اساس، ویژگی‌های رفتار پیچشی هسته‌های برشی در ساختمان‌های بلند، بر پایه کاربرد جزء محدود پیشنهادی PE و سه المان وابسته به آن بررسی شده است. نشان داده شد که یک ارتباط ساختاری میان فرضیات اساسی حاکم بر رفتار ساختمان‌های بلند و ساختار تحلیلی المان PE وجود دارد. تعریف درجات آزادی انتقال افقی در المان PE، بیان کننده فرض حرکت جسم صلب تاو‌های کف طبقات است. همچنین تعریف دو درجه آزادی ω_1 و ω_2 نیز سبب ایجاد چرخش هماهنگ میان تیرهای اتصال و پانل‌های دیوار

مدل تحلیلی ارایه شده در مرجع [۲۴] بر پایه روش محیط پیوسته تدوین گردیده است. بر طبق مطالب مرجع مذکور، ویژگی‌های رفتاری مدل الاستیک معادل تیرهای اتصال هسته برشی، شامل اثرات تغییر شکل‌های برشی و تغییر شکل‌های موضعی در حوزه اتصال تیرها و پانل‌های صفحه‌ای دیوار می‌گردد. شایان ذکر است که موضوع فوق یک نمونه از مواردی است در قالب تمهیدات محاسباتی لحاظ شده در مدل تحلیلی یک پژوهش، در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌های دیگر این موضوع، تمهیدات محاسباتی است که برای تعریف المان‌های تیر اتصال در هسته برشی و ایجاد کوپلینگ با پانل‌های مستوی

Li, Q.S.; Wu, J.R.; "Correlation of dynamic characteristics of a super tall building from full-scale measurement and numerical analysis with various finite element models", Earth. Eng. & Struc. Dyn., vol. 33, pp.1311-1336, 2004.

Paknahad, M.; et al; "Analysis of shear wall structures using optimal membrane triangle element", Finite elements in Analysis and Design, 2007,(Accepted-ID:10.1016/j.finel.2007.05.010).

Kwan, A.K.H.; Chan, W.T.; Effective stiffness of coupling beams connected to walls on out-of-plane directions, Comput. and Struct, Vol.75, pp. 385-394, 2000.

Cheung, Y.K.; Handbook of Structural Concrete – Tall Buildings 2-Chapter38, Pitman Co., 1983.

Kwan, A.K.H.; "Analysis of buildings using strain-based element with rotational dofs", J. Struct. Eng. Div., ASCE, vol. 118, No. 5, pp. 1119-1212, 1992.

مشکوةالدینی، افشین؛ تهرانی‌زاده، محسن؛ "مدل‌سازی رفتار پیچشی هسته های برشی در ساختمان‌های بلند با کاربرد دو دسته اجزای محدود کرنش پایه و تغییرمکان پایه، پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله – SEE5، مقاله SC194N، ۱۳۸۶.

Rutenberg, A.; Shtarkman, M.; Eisenberger, M.; "Torsional analysis methods for perforated cores", J. Struct. Eng. Div., ASCE, vol. 112, No. 6, pp. 1207-1227, 1986.

M. Tehranizadeh, A. Meshkat-Dini, "Analysis of tall buildings using strain based quadrilateral elements with in-plane rotational d.o.f.s", 11th Int. Conference on Civil, Structural and Environmental Eng. Comput., Paper No. 435, Malta, 2007

Reddy, J.N.; "On locking free shear deformable beam finite elements", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol.149, pp. 113-132, 1997.

M. Tehranizadeh, A. Meshkat-Dini, "Response of tall building structures using panel elements with in-plane rotational stiffness", Australian Earth. Eng. Conference (AEES 2007), November 2007

Kim, H.S.; Lee, D.G.; "Analysis of shear wall with opening using super elements", Eng. Struct., vol. 25, pp. 981-991, 2003.

Kwan, A.K.H.; Cheung, Y.K.; "Analysis of coupled shear core walls using a beam type element", Eng. Struct., vol. 16, pp. 111-118, 1994.

Stafford Smith, B.; Taranath, B.; "The analysis of tall core supported structure subject to torsion", Proc. Instn. Civ. Engrs., vol. 53, Part 2, pp. 173-188, 1972.

Macleod I.A.; Hosney, H.; "Frame analysis of shear wall cores", J. Struct. Eng. Div., ASCE, vol. 103, No.10, pp. 2037-2047, 1977.

Coull, A.; "Torsion of structural cores on deformable foundations", Building Science, vol. 10, No. 1, pp: 57-64, 1975.

[۱۰] برشی خواهد شد. بدین ترتیب، اثرات ناشی از پدیده قفل‌شدگی برشی حذف می‌شود.

[۱۱] بر اساس حذف اثرات ناسازگاری تابع تغییرمکان عمودی، گروه المان‌های محدود PE قابلیت مدل‌سازی و تحلیل اثرات متقابل دیواره‌های متعام در هسته‌های برشی را پیدا می‌نمایند.

[۱۲] این ویژگی نیز از نکات تحلیلی برجسته کاربرد المان محدود PE سه جزء محدود هم‌پایه آن در تحلیل رفتار سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در ساختمان‌های بلند است.

[۱۳] مطالعات نویسندگان نشان می‌دهد که تحلیل رفتار سازه‌های هسته برشی با کاربرد شبکه اجزای محدود ساخته

[۱۴] شده بر اساس گروه المان‌های PE، به سرعت همگرا می‌شود. همچنین تنها به یک ردیف از المان‌های مذکور در پانل‌های

[۱۵] متعام دیوار در هر طبقه از سازه هسته برشی نیاز خواهد بود.

مراجع

[۱] Taranath S.B.; Structural Analysis and Design of Tall Buildings, 2nd Edition, McGraw Hill, 1998.

[۲] Georgoussis, G.K.; "Approximate analysis of symmetrical structures consisting of different types of bents", The Structural Design of Tall Buildings, vol. 16, pp. 231-247, 2007.

[۳] Coull, A.; Stafford Smith B.; Tall Building Structures: Analysis and Design, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York, 1991.

[۴] Meftah S.A. et al; "A simplified approach for seismic calculation of a tall building braced by shear walls and thin-walled open section structures", Engineering Structures, vol. 29, pp. 2576-2585, 2007.

[۵] Steenbergen, R.D.; Blaauwendraad, J.; "Closed form element method for tall buildings of irregular geometry", Int. J. of Solids and Structures, 2007, (Accepted- ID:10.1016/j.ijsolstr.2007.10.017).

[۶] Ozturun, N.K.; "A rectangular finite element formulation", Finite Element in Analysis and Design, Vol. 42, No. 12, pp. 1031-1052, 2006.

[۷] حاجی‌کاظمی، حسن؛ مشکوةالدینی، افشین؛ بهبود روش‌های تحلیل اعضای برشی سازه‌ها با استفاده از اجزای محدود، نشریه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، سال سیزدهم، شماره دوم، ص ۲۳ تا ۳۳، ۱۳۸۰.

[۸] Ha, K.H.; Desbois M.; " Finite elements for tall building analysis", Comput. and Struct., vol. 33, No. 1, pp. 249-255, 1989.

[۹] Sabir, A. B.; "Strain based finite elements for the analysis of shear walls", Proc. 3rd Int. Conf. on Tall Buildings, Hong Kong, pp. 447-453, 1984.

[۲۴]