

## چکیده

سیستم هسته مقاوم بتن آرمه به دلیل داشتن سختی و مقاومت بالا، یکی از سیستم‌های جانبی مقاوم سازه‌های مناسب و کارآمد برای مقابله با نیروهای جانبی باد و زلزله در سازه‌های با ارتفاع بلند محسوب می‌شود. از سوی دیگر در طراحی سازه‌های بلند وجود یک یا چند طبقه زیرزمین به دلیل ملاحظات معماری و یا سازه‌ای امری است که در اکثر ساختمان‌ها مشاهده می‌گردد. وجود طبقات تحتانی زیر تراز زمین که توأم با به‌کارگیری دیوارهای بتن آرمه پیرامونی به‌عنوان دیوارهای حائل، برشی و یا هر دو عملکرد می‌باشد در کنار وجود هسته مقاوم بتن آرمه باعث بروز پدیده‌ای به نام اثر رانش معکوس در این گونه سازه‌ها می‌شود. این پدیده که بر اثر وجود سختی زیاد دیوارهای بتن آرمه پیرامونی همراه با دیافراگم تراز زمین حادث می‌گردد باعث می‌شود که در هنگام اعمال نیروهای جانبی و انتقال آن به هسته یک نیروی معکوس از طرف دیافراگم ذکر شده به هسته وارد شده و عملکرد آن را در این ناحیه تحت تأثیر شدید قرار دهد. مرور تحقیقات پیشین بیانگر آن است که نسبت‌های سختی و نسبت‌های ابعادی ریشه ساختمان نقش مستقیم در میزان نیروی به وجود آمده دارند. در این تحقیق به بررسی نقش تغییر شکل‌های برشی هسته در پدیده ذکر شده پرداخته و با بررسی این عامل روابطی را برای برآورد این نیرو پیشنهاد نموده است. روابط تحلیلی به‌دست آمده با نتایج حاصل از یک تحلیل عددی مورد مقایسه قرار گرفته و حاکی از آن است که در موارد کاربردی صرف نظر نمودن از تغییر شکل‌های برشی خطای بزرگی در نتایج ایجاد نموده و لذا لحاظ نمودن اثر تغییر شکل‌های برشی با استفاده از روابط به‌دست آمده قابل توصیه می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** سازه بلند، هسته مقاوم، اثر رانش معکوس، سختی جانبی، تغییر شکل برشی.

## مطالعه اثر رانش معکوس در سازه‌های بلند دارای هسته مقاوم بتن آرمه با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های برشی

مهدی کریمی

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین (نویسنده مسئول)

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،

kheyroddin@semnan.ac.ir

هاشم شریعتمدار

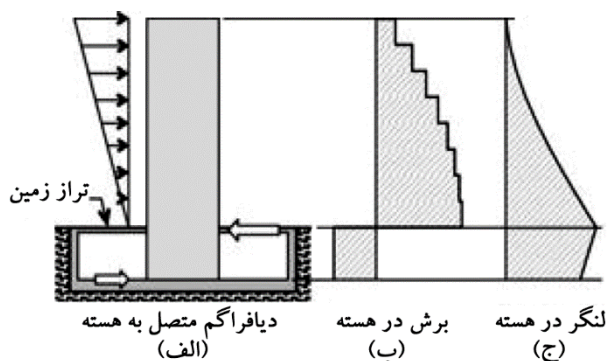
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱- مقدمه

یک یا چند طبقه زیرزمین باعث می‌شود که رفتار سازه به‌خصوص در نواحی تحتانی تحت تأثیر قرار بگیرد. وجود طبقات تحتانی که باعث قرار گرفتن بخشی از سازه در عمق زمین می‌گردد عاملی در جهت افزایش گیرداری سازه بر روی زمین می‌شود و لذا به آن طول گیرداری<sup>۱</sup> سازه در خاک نیز اطلاق می‌شود (شکل ۱). با توجه به آنکه دیوارهای پیرامونی زیرزمین به دلایل فنی و اجرایی اغلب از نوع دیوارهای بتن آرمه می‌باشند، این دیوارها همراه با دیافراگم تراز زمین<sup>۲</sup> مجموعاً تشکیل یک جعبه سخت بتن آرمه را داده و در

با توجه به کارآمدی و عملکرد مناسب سیستم هسته مقاوم در میان سیستم‌های مختلف باربر جانبی شناخته شده این سیستم به‌عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم‌ها به‌صورت تنها و یا ترکیب با سایر سیستم‌ها در طراحی سازه‌های بلند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. مرور و مطالعه طرح‌های معماری و پیکربندی سازه‌های بلند دنیا از سوی دیگر نشان می‌دهد که در اغلب آنها یک یا چند طبقه زیرزمین در آنها در نظر گرفته شده است. ترکیب دو عامل فوق به‌صورت توأم یعنی وجود هسته مقاوم در سیستم سازه‌ای و وجود

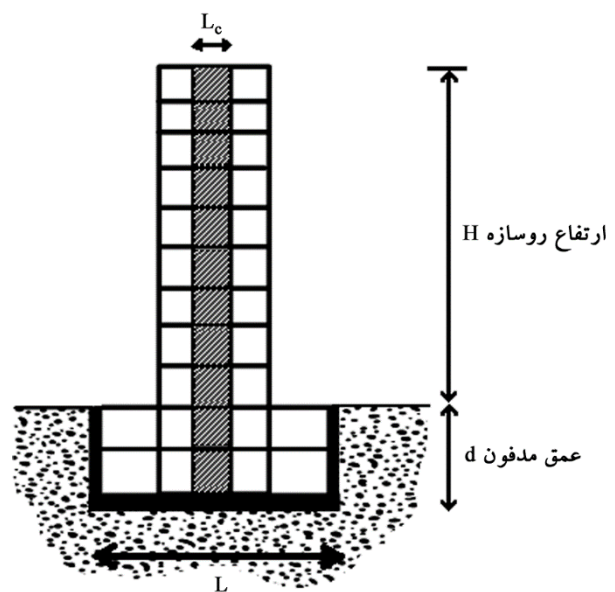
توجه به اینکه قرار دادن تکیه گاه صلب در تراز زمین به منزله در نظر گرفتن سختی بینهایت برای جعبه بتن آرمه می باشد بررسی این مورد، به عنوان بررسی مسئله در یک حالت حدی قلمداد می شود. بررسی این حالت و حالت های حدی دیگر (همچون در نظر گرفتن دوران پای هسته) در مطالعات قبلی مورد توجه قرار گرفته [۶] و نتایج آن در شکل (۳) ارائه شده است. در این شکل دیاگرام نیروی برشی و لنگر خمشی در حالات حدی (به صورت بدون بعد شده) نسبت به مقدار آن در تراز زمین نرمال شده است.



شکل (۲): رانش معکوس و اثر آن در تغییر توزیع نیروهای برشی و لنگر خمشی [۵].

در مطالعه ای که در این خصوص توسط محققان دیگر انجام شده است، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مشاهده شد که با فرض یک دیافراگم با سختی زیاد تشکیل مفصل پلاستیک در دیوار برشی در بالای تراز زمین می تواند باعث افزایش زیادی در برش به وجود آمده در دیوار برشی در زیر تراز زمین گردد [۷]. در این مطالعه همچنین روابطی برای دوران پلاستیک تقاضا بر اساس تغییر مکان تقاضا پیشنهاد شده است. در مطالعه دیگری نشان داده شد که برای مقابله با برش زیاد به وجود آمده لازم است نکات و تمهیدات خاصی در طراحی بخش تحتانی دیوار در نظر گرفته شود [۸]. در مطالعه مذکور روندی گام به گام برای طراحی دیوار نیز پیشنهاد شد. تحقیق پیش رو در صدد است تا با ارائه روابطی بتواند میزان نیروی رانش معکوس را برحسب نسبت های ابعادی تأثیر گذار در این پدیده، برآورد و مقدار آن را برای طراح سازه قابل پیش بینی نماید.

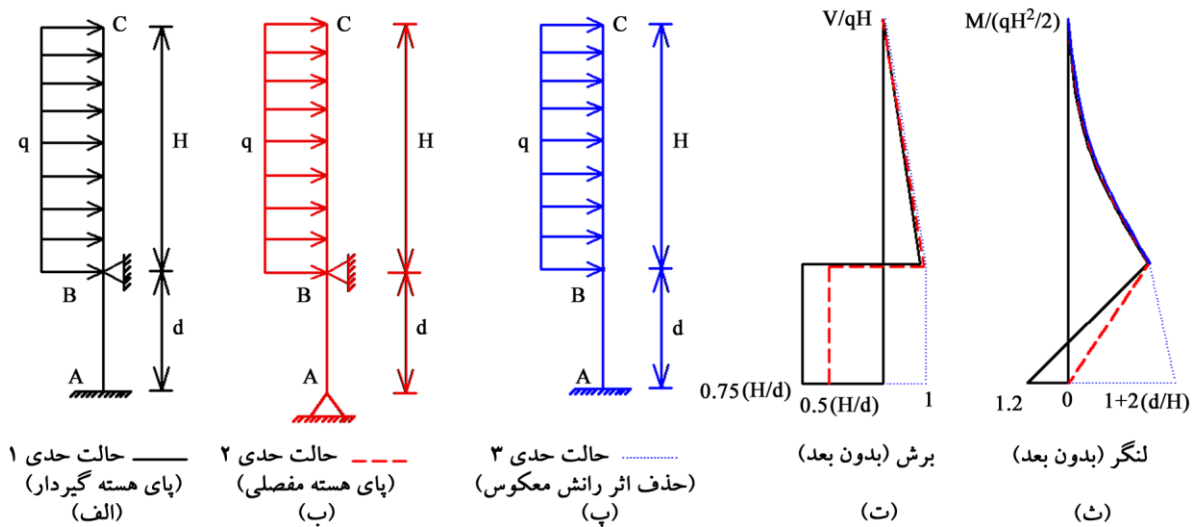
سیستم های دارای هسته مقاوم باعث بروز پدیده ای بنام اثر رانش معکوس<sup>۳</sup> می شوند. علت پدیده رانش معکوس را به صورت کیفی این گونه می توان بیان نمود که با توجه به استفاده از دیوارهای برشی پیرامونی در طبقات زیرزمین، در هنگام اعمال بار جانبی به روسازه، سختی زیاد بخش مدفون سازه در مقابل تغییر شکل جانبی باعث می شود که این بخش مقاومت بیشتری را در مقابل تغییر شکل، از خود نشان داده و با اعمال نیرویی در خلاف جهت اعمال بار جانبی به سیستم سازه ای اصلی، سعی می کند مانع تغییر شکل سازه در حالت عادی و آزاد خود گردد [۳]. با توجه به بزرگ و قابل ملاحظه بودن این نیرو، اثر آن بر روی توزیع نیروی برشی و لنگر خمشی هسته باید کاملاً مورد توجه قرار بگیرد.



شکل (۱): عمق مدفون یا طول گیرداری سازه در خاک در سازه بلند با هسته مقاوم [۴].

در شکل (۲) شمایی از توصیف این پدیده به صورت تصویری و اثر آن بر روی توزیع نیروهای برشی و لنگر خمشی هسته ارائه شده است.

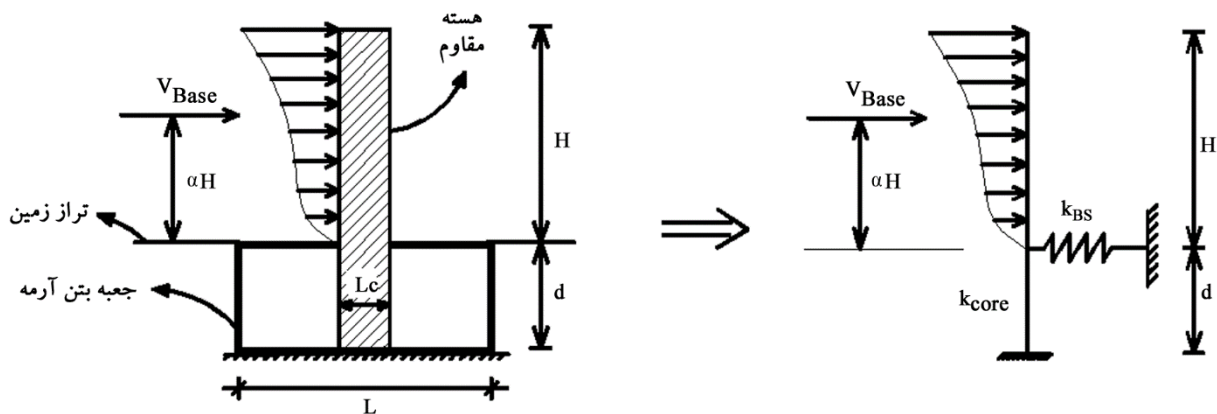
با ملاحظه شکل (۲) ساده ترین مدلی که برای در نظر گرفتن اثر این پدیده به ذهن متبادر می گردد، قرار دادن یک تکیه گاه صلب در تراز دیافراگم سطح زمین در مقابل هسته می باشد. با



شکل (۳): دیاگرام برش و لنگر خمشی هسته در حالات حدی [۶].

میزان پدیده فوق را تحت تأثیر قرار می‌دهند اشاره‌ای نشده است. در مطالعه دیگری که توسط کریمی و خیرالدین [۴] انجام پذیرفت اثر میزان نسبت سختی هسته به سختی جعبه بتن‌آرمه مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. در تحقیق مذکور با در نظر گرفتن یک فتر به‌جای تکیه‌گاه صلب که جایگزین جعبه بتن‌آرمه شده بود (شکل ۴)، سعی شد با حل تحلیلی مدل ساده شده، رابطه‌ای را برای مشخص نمودن نقش این پارامتر در برآورد نیروهای ایجاد شده ارائه نماید. رابطه به‌دست آمده در آن مطالعه به‌صورت زیر حاصل گردید:

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{1+1.5\alpha(H/d)}{\frac{k_{Core}}{k_{BS}}+1} \quad (1)$$



شکل (۴): مدل در نظر گرفته شده برای لحاظ نمودن اثر سختی بخش تحتانی سازه در بررسی پدیده رانش معکوس.

## ۲- لحاظ نمودن اثرات سختی در برآورد اثر رانش معکوس

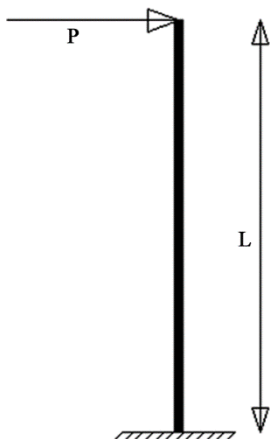
در کنار عامل نسبت‌های ابعادی در بخش ریشه ساختمان، سختی اجزای سازه‌ای در بخش تحتانی سازه یعنی سختی هسته و سختی جعبه بتن‌آرمه نقش و اثری مهم در میزان نیروهای به وجود آمده بر اثر پدیده رانش معکوس دارد. لذا با توجه به اهمیت میزان سختی اجزای ذکر شده، مؤسسات تحقیقاتی مختلف پیشنهادهایی را برای چگونگی در نظر گرفتن سختی این اجزا ارائه نموده‌اند [۹-۱۰]. این پیشنهادها عمدتاً شامل ارائه مقادیر ضرایب ترک‌خوردگی حداقل و حداکثر در زمان طراحی برای اجزای ذکر شده بوده و در آنها به اینکه میزان سختی اجزای اصلی مورد بحث چگونه و به چه

شکل های برشی در آنها لحاظ نشده است. تحقیق پیش رو در صدد وارد نمودن اثرات تغییر شکل های برشی در جهت هر چه کامل تر نمودن و کاربردی نمودن روابط ارائه شده می باشد.

### ۳- اثر تغییر شکل های برشی

به طور کلی در نظر نگرفتن اثر تغییر شکل برشی در سختی یک عضو منجر به برآورد دست بالاتری از میزان سختی آن عضو می شود. به عبارت دیگر می توان گفت که وارد نمودن اثر تغییر شکل برشی باعث کاهش سختی عضو مورد نظر می گردد. برای یک عضو کنسولی به طول  $L$  تحت اثر بار متمرکز، تغییر شکل عضو تحت اثر بار متمرکز  $P$  در انتهای آن (شکل ۵) از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{KAG} \quad (5)$$



شکل (۵): عضو کنسولی تحت اثر بار متمرکز

که در آن  $\delta_b$  بیانگر تغییر شکل خمشی،  $\delta_s$  بیانگر تغییر شکل برشی،  $E$  مدول الاستیسیته مصالح،  $G$  مدول برشی مصالح،  $I$  ممان اینرسی مقطع و  $A$  مساحت مقطع می باشد. پارامتر  $K$  نیز ضریب مساحت برشی بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۲]:

$$K = \frac{I^2}{A \int_A \frac{Q^2}{t^2} dA} \quad (6)$$

که در آن  $t$  عرض تار مقطع در محل مورد نظر و  $Q$  گشتاور اول مساحت قرار گرفته در بالای تار مورد نظر نسبت به مرکز

که در آن  $F_{BS}$  برابر کل نیروی محوری ایجاد شده در دیافراگم تراز زمین (معادل نیروی فنر جایگزین شده)،  $V_{Base}$  برش پایه (نیروی برشی درست در بالای دیافراگم تراز زمین)،  $H$  ارتفاع روسازه،  $d$  عمق مدفون یا گیرداری سازه در زمین،  $\alpha$  ضریبی از ارتفاع روسازه که مشخص کننده محل مرکز برآیند نیروهای جانبی است،  $K_{BS}$  سختی جعبه بتن آرمه (معادل با سختی فنر جایگزین شده) و  $K_{Core}$  سختی جانبی بخش تحتانی هسته (فقط سختی خمشی) بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$K_{Core} = \frac{3EI}{d^3} \quad (2)$$

در این رابطه  $E$  مدول الاستیسیته مصالح هسته و  $I$  نیز ممان اینرسی مقطع هسته (با فرض ثابت بودن آنها در عمق  $d$ ) می باشد. پارامترهای موجود در رابطه (۱) همچنین به صورت تصویری در شکل (۴) بر روی اجزای هندسه کلی سازه قابل ملاحظه می باشد. در مطالعه قبلی [۴] نشان داده شد که رابطه (۱) را می توان به صورت مجموع دو اثر نیروی برش پایه (مقدار کل بار) و لنگر خمشی (اثر نحوه توزیع بار) ایجاد شده در پای سازه نیز در نظر گرفت: (اثر مقدار بار)

$$\left(\frac{F_{BS}}{V_{Base}}\right)_P = \frac{1}{\frac{K_{Core}+1}{K_{BS}}} \quad (3)$$

(اثر لنگر خمشی یا نحوه توزیع بار)

$$\left(\frac{F_{BS}}{V_{Base}}\right)_M = \frac{1.5\alpha(H/d)}{\frac{K_{Core}+1}{K_{BS}}} \quad (4)$$

نکته قابل ذکر اینکه با میل نمودن سختی جعبه بتن آرمه به سمت بینهایت رابطه (۱) به رابطه حالت حدی ۱ تبدیل شده و آن را تأیید می نماید.

لازم به ذکر است که رابطه (۱) همان طور که در تحقیق مربوطه نیز اشاره شده است تنها با لحاظ نمودن اثر تغییر شکل های خمشی برای هسته حاصل شده است. دقت در خود این روابط نیز نشان دهندهی آن است که با توجه به عدم وجود پارامتر نسبت ابعادی مقطع هسته در این روابط، اثر تغییر

از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$K_{CoreT} = \frac{k_{Core}}{1+\beta} = \frac{3EI}{d^3(1+\beta)} \quad (12)$$

دقت در رابطه (۱۱) و مقایسه آن با رابطه قبلی که اثر تغییر شکل‌های برشی در آن لحاظ نشده است (رابطه ۱) نشان می‌دهد که تفاوت این دو رابطه در مقدار پارامتر  $\beta$  می‌باشد؛ به نحوی که با کوچک شدن این مقدار و میل نمودن آن به سمت صفر رابطه مورد نظر به رابطه (۱) تبدیل می‌شود.

برای مشخص شدن میزان مؤثر بودن پارامتر  $\beta$ ، در صورتی که هسته مقاوم در حالت ساده آن به صورت یک مقطع جعبه‌ای در نظر گرفته شود، این پارامتر را می‌توان به نسبت ابعادی هسته مرتبط نمود. لذا با محاسبه  $\beta$  برای هسته مقاومی به طول (عمق)  $d$  با مقطع قوطی (Box) مربعی جدار نازک با ضخامت ثابت به ابعاد  $L_c \times L_c$  و ضریب پواسون بتن آرمه برابر  $0.2$  خواهیم داشت:

$$\beta = 2.4 \left(\frac{L_c}{d}\right)^2 \quad (13)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با کاهش نسبت بعد هسته به عمق مدفون سازه (مراجعه به شکل ۱) ضریب  $\beta$  به سرعت کاهش یافته و اثر تغییر شکل‌های برشی ناچیز می‌گردد.

برای روشن شدن اثر کلی این پارامتر بر اثر رانش معکوس در رابطه (۱۱)، در شکل (۶) نمودار تغییرات نسبت نیروی ایجاد شده به برش پایه برای یک نسبت ثابت  $H/d = 20$  و بررسی  $K_{Core}/K_{BS} = 11.4$  بر حسب  $d/L_c$  ارائه شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که برای یک مقطع قوطی مربعی اثر تغییر شکل‌های برشی در حالی که برای نسبت‌های  $d/L_c$  بزرگ‌تر از  $10$  قابل چشم‌پوشی می‌باشد برای نسبت‌های مذکور کوچک‌تر از این مقدار، خطای قابل توجهی ایجاد نموده و برای لحاظ نمودن اثرات مورد نظر بایستی از رابطه (۱۱) به جای رابطه (۱) (یا برای یک مقطع قوطی جدار نازک از منحنی شکل ۶) استفاده نمود. ملاحظه و دقت در سازه‌های واقعی همچنین حاکی از آن است که در حالت‌های کاربردی، نسبت مذکور یعنی نسبت

سطح مقطع بوده و انتگرال‌گیری بر روی کل مساحت مقطع انجام می‌گیرد.

در رابطه (۵) در صورتی که از جمله تغییر شکل خمشی فاکتور گرفته شود خواهیم داشت:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{KAG} = \frac{PL^3}{3EI} \left(1 + \frac{3}{K} \times \frac{E}{G} \times \frac{I}{AL^2}\right) \quad (7)$$

با در نظر گرفتن جمله دوم داخل پرانتز تحت عنوان متغیر  $\beta$  که منعکس کننده اثر تغییر شکل‌های برشی می‌باشد، به صورت زیر:

$$\beta = \frac{3}{K} \times \frac{E}{G} \times \frac{I}{AL^2} \quad (8)$$

رابطه (۷) را می‌توان به صورت خلاصه زیر بیان نمود:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{KAG} = \frac{PL^3}{3EI} (1 + \beta) \quad (9)$$

که در آن  $\beta$ ، پارامتر  $K$  و  $\frac{I}{A}$  تنها به هندسه مقطع وابسته بوده و پارامتر  $\frac{E}{G}$  نیز تنها به خواص مصالح بستگی دارد.

با مشخص شدن  $\beta$  سختی عضو طره‌ای تحت اثر بار متمرکز با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

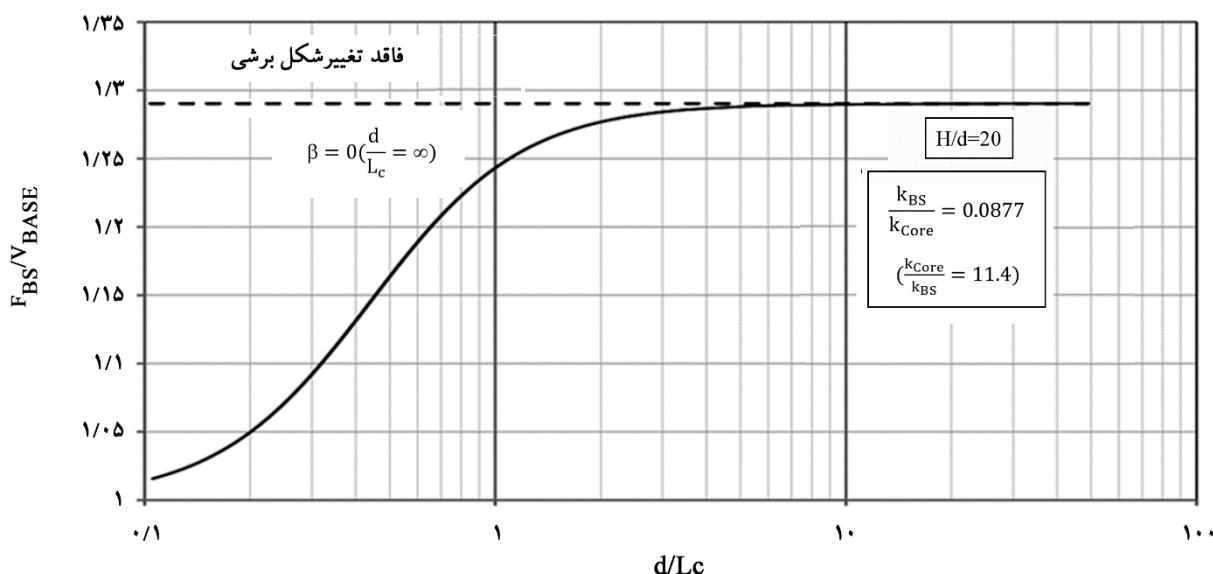
$$K_{Cantilever} = \frac{3EI}{L^3(1+\beta)} \quad (10)$$

ذکر این نکته نیز شایان توجه است که یک عضو تحت اثر خمش خالص فاقد هرگونه تغییر شکل برشی بوده و تغییر شکل برشی اساساً برای چنین عضو یا حالتی بی‌معنا می‌باشد.

اکنون با وارد نمودن اثر  $\beta$  در رابطه (۱)، رابطه اثر رانش معکوس در فرم تکمیل شده آن به صورت رابطه زیر قابل ارائه خواهد بود:

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{1+1.5\frac{\alpha}{1+\beta}\left(\frac{H}{d}\right)}{\frac{K_{CoreT}+1}{K_{BS}}} \quad (11)$$

که در آن  $K_{CoreT}$  سختی هسته با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی بوده و از یک تحلیل به روش اجزای محدود<sup>۴</sup> (FEM) و یا



شکل (۶): اثر نسبت ابعادی عمق به بعد هسته (پارامتر  $\beta$ ) در تغییر شکل‌های برشی با استفاده از رابطه (۱۱) برای مقطع قوطی مربعی.

#### ۴-۱- مشخصات سازه مورد استفاده در تحلیل عددی

تعداد کل طبقات سازه برابر ۲۱ طبقه بوده که یک طبقه آن به عنوان زیرزمین در نظر گرفته شده است؛ به این ترتیب بخش روسازه دارای ۲۰ طبقه و بخش مدفون در زمین دارای یک طبقه می‌شود که از آن، نسبت  $H/d = 20$  حاصل می‌شود. پلان سازه مورد نظر، یک مربع به ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر (۵ دهانه ۶ متری در هر جهت) و ارتفاع محور تا محور طبقات برابر ۳/۵ متر فرض گردید. یک هسته بتن آرمه با مقطع مربع ابعاد ۶ در ۶ متر و ضخامت ثابت ۴۰ سانتی‌متر نیز در مرکز پلان در نظر گرفته شد. بار جانبی مفروض نیز به صورت یکنواخت (حالتی شبیه به بار باد [۲]) و برابر ۳ تن بر متر در نظر گرفته شد. پلان سازه و شمایی از مدل سه‌بعدی آن در شکل (۷) نشان داده شده است.

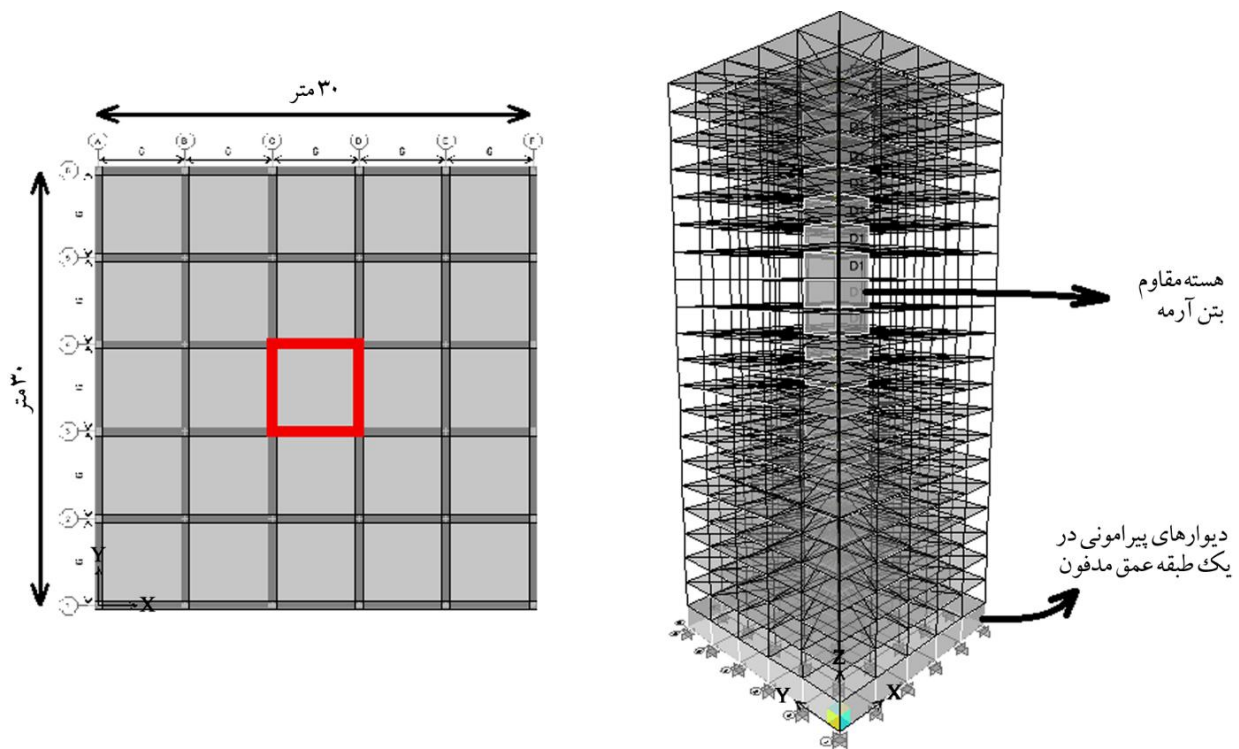
مشخصات بتن مورد استفاده در کلیه المان‌های سازه‌ای منطبق با بتن رده C25 مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱۳] تعریف شده است. ضخامت هسته بتن آرمه و دیوارهای پیرامونی زیرزمین برابر ۴۰ سانتی‌متر و ضخامت دال مربوط به دیافراگم تراز زمین نیز برابر ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بار جانبی وارده به قسمت روسازه، به صورت یکنواخت ( $\alpha = 0.5$ ) برابر ۳ تن بر متر در ارتفاع، (معادل ۱۰/۵ تن بر هر طبقه) اعمال شد.

$d/Lc$  اغلب در حدود ۰/۴ الی ۱/۵ بوده و لذا تغییر شکل‌های برشی در آنها کاملاً تأثیرگذار بوده و برای در نظر گرفته شدن تغییر شکل‌های برشی باید از رابطه (۱۱) استفاده شود.

#### ۴-۲- صحت‌سنجی نتایج تحلیلی و مقایسه آن با نتایج مدل‌سازی عددی

در مطالعه‌ای که قبلاً برای ارزیابی و صحت‌سنجی رابطه اثر رانش معکوس (کنترل رابطه ۱ بدون اثرات تغییر شکل‌های برشی) توسط نویسندگان این مقاله صورت گرفت [۴]، سازه‌ای ۲۱ طبقه دارای یک طبقه زیرزمین، تحت بار جانبی یکنواخت در برنامه ETABS مدل‌سازی شد. برای حذف تغییر شکل‌های برشی در آن مطالعه، ضرایب سختی مربوط به مؤلفه‌های برشی المان‌های پوسته‌هسته در برنامه ETABS در مقادیر عددی بزرگ ضرب شد و پس از تحلیل، نیروی برشی ایجاد شده در زیر تراز زمین در هسته، به‌دست آمده از تحلیل عددی با رابطه (۱) مقایسه گردید. در این بخش از مقاله سعی شده است که همان سازه این بار با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی، مورد ارزیابی مجدد قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی سازه با نتیجه حاصل از رابطه تحلیلی جدید (رابطه ۱۱)، مقایسه شود. جزئیات کامل تر سازه مورد نظر در ادامه ارائه شده است.





شکل (۷): مشخصات کلی مدل سازه ۲۱ طبقه با یک طبقه عمق مدفون به کار رفته در تحلیل عددی.

#### ۴-۲- مقایسه نتایج رابطه تحلیلی و تحلیل عددی

در این بخش نتایج حاصل از رابطه تحلیلی و تحلیل عددی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند؛ برای مقایسه بهتر، نتایج حاصل از رابطه (۱) (بدون اثر تغییر شکل‌های برشی) از مطالعه قبلی نیز ارائه شده است.

برای مقایسه نتایج تحلیل عددی با رابطه تحلیلی لازم است پارامترهای موجود در رابطه تحلیلی از مدل عددی و یا پیکربندی سازه، استخراج شده و با جاگذاری در دو سمت رابطه (۱۱) با یکدیگر مقایسه شوند. با توجه به مقدار بار جانبی برابر ۳ تن بر متر و ارتفاع سازه، مقدار کل بار جانبی که در روابط (۱) و (۱۱) معادل همان  $V_{Base}$  می‌باشد، برابر ۲۱۰ تن به دست می‌آید. با مشخص شدن  $F_{BS}$ ، سمت چپ رابطه یعنی نسبت  $F_{BS}/V_{Base}$  از تحلیل عددی حاصل می‌گردد. با توجه به جهشی که در نمودار نیروی برشی هسته در محل اعمال  $F_{BS}$  به وجود می‌آید، برای تعیین  $F_{BS}$  می‌توان از مقادیر نیروی برشی هسته بلافاصله قبل و بعد از دیافراگم تراز زمین (محل اعمال  $F_{BS}$ ) استفاده نمود.

به منظور انطباق با فرض اعمال شدن کل بار جانبی به هسته در این مدل، درجات آزادی برخی از المان‌های سازه‌ای همچون اتصالات همه تیرهای بخش روسازه، به صورت مفصل مدل شده است. مشخصات تیرها و ستون‌ها با توجه به مفصل بودن دو سر تیرها و همچنین مقید نمودن گره‌های سقف‌های بخش روسازه در جهت افقی (تعریف نمودن دیافراگم در برنامه ETABS) اثر محسوسی بر نتایج نداشته و مشخصات آنها در تحلیل بی‌تأثیر خواهد بود.

نکته مهم و قابل توجهی که در مدل‌سازی این گونه سازه‌ها یا به‌طور کلی دیافراگم‌هایی که لازم است اثر نیروی محوری در آنها مورد توجه قرار بگیرد، آن است که برای به وجود آمدن نیروی محوری در دیافراگم مورد نظر (در اینجا دیافراگم تراز زمین)، باید از تعریف قید دیافراگم در طبقه مورد نظر خودداری شود. با توجه به رایج بودن تعریف دیافراگم بدون توجه به آثار آن، در طراحی سازه‌ها توسط مهندسين محاسب، توجه به این امر می‌تواند مهم تلقی گردد.

بر اساس توضیحات ذکر شده و رعایت آنها، مقادیر سختی‌های مورد نظر به صورت زیر به دست آمده است:

$$K_{BS} = 10873 \text{ T/cm} \quad (16)$$

$$K_{Core} = 123914 \text{ T/cm} \quad (17)$$

سختی محاسبه شده برای هسته همان‌طور که از اندیس آن نیز مشخص است، تنها شامل سختی خمشی آن می‌باشد. یکی از دلایل بزرگ بودن نسبی این سختی نسبت به سختی جعبه بتن آرمه نیز همین موضوع است. از سوی دیگر سختی دیافراگم با توجه به مد تغییر شکلی آن آن قدر که تصور می‌شود دارای سختی بالایی نبوده و نقش آن در محاسبه سختی جعبه بتن آرمه که به صورت فنی سری در معادله وارد می‌شود، باعث کاهش سختی کل مجموعه دیافراگم و دیوارهای پیرامونی می‌گردد. شایان ذکر است که سختی معادل یک مجموعه فنر که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند از کوچک‌ترین مقدار سختی فنرهای موجود نیز کوچک‌تر خواهد بود. به این ترتیب نسبت سختی هسته به سختی جعبه بتن آرمه برای مدل سازه مورد مطالعه به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{K_{Core}}{K_{BS}} = 11.4 \quad (18)$$

تنها پارامتر باقیمانده از رابطه (۱۱) محاسبه پارامتر  $\beta$  می‌باشد که از رابطه کلی (۸) و در حالت خاص یعنی مقطع قوطی جدار نازک از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است:

$$\beta = 2.4 \left( \frac{L_c}{d} \right)^2 = 2.4 \left( \frac{6}{3.5} \right)^2 = 7.05 \quad (19)$$

با مشخص شدن همه پارامترهای موجود در رابطه‌های (۱) و (۱۱)، نسبت نیروی رانش معکوس به برش پایه با استفاده از رابطه‌های ذکر شده قابل محاسبه است:

(رابطه ۱، بدون در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی)

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{1+1.5\alpha\left(\frac{H}{d}\right)}{\frac{K_{Core}+1}{K_{BS}}} = \frac{1+1.5 \times 0.5 \times 20}{11.4+1} = 1.290 \quad (20)$$

مقدار نیروی برشی بلافاصله در زیر دیافراگم تراز زمین، به دست آمده از تحلیل عددی در مطالعه قبلی (حذف اثر تغییر شکل‌های برشی و استفاده از رابطه ۱) برابر ۶۱ تن در جهت معکوس (که به معنی تغییر علامت نیروی برشی در دیافراگم برش می‌باشد) و در مطالعه اخیر (در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی) نیز برابر ۳۶ تن در جهت معکوس به دست آمد. با داشتن مقادیر استخراج شده از تحلیل، نسبت نیروی رانش معکوس به برش پایه به صورت زیر به دست می‌آید:

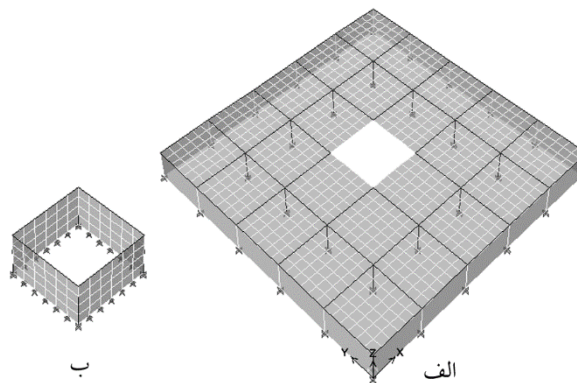
(بدون در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی)

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{210+61}{210} = 1.286 \quad (14)$$

(با لحاظ نمودن تغییر شکل‌های برشی)

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{210+36}{210} = 1.171 \quad (15)$$

برای استفاده از رابطه تحلیلی نیاز به داشتن مقادیر سختی جانبی هسته مقاوم و جعبه بتن آرمه تحتانی برای محاسبه نسبت سختی‌ها ( $K_{BS}/K_{Core}$ ) می‌باشد. نیروی ایجاد شده در هسته، ارتباط تنگاتنگی با سختی دیوار پیرامونی و دیافراگم خواهد داشت [۱۴]. برای محاسبه نسبت سختی‌ها در این قسمت، بخش تحتانی هسته و جعبه بتن آرمه به صورت جداگانه مدل شده و آنگاه سختی‌ها بر اساس نسبت نیروی وارده به تغییر شکل ایجاد شده، محاسبه شده‌اند. بدیهی است که در محاسبه سختی‌های مورد نظر تغییر شکل‌ها باید در لبه هسته و در امتداد جهت بارگذاری اندازه‌گیری شوند (شکل ۸).



شکل (۸): مدل سازی بخش تحتانی سازه شامل جعبه بتن آرمه و هسته برای محاسبه سختی آنها [۴].



(رابطه ۱۱، با لحاظ نمودن تغییر شکل‌های برشی)

$F_{BS} = 1.29 \times 210 = 271 \text{ Ton}$  و در حالت لحاظ نمودن

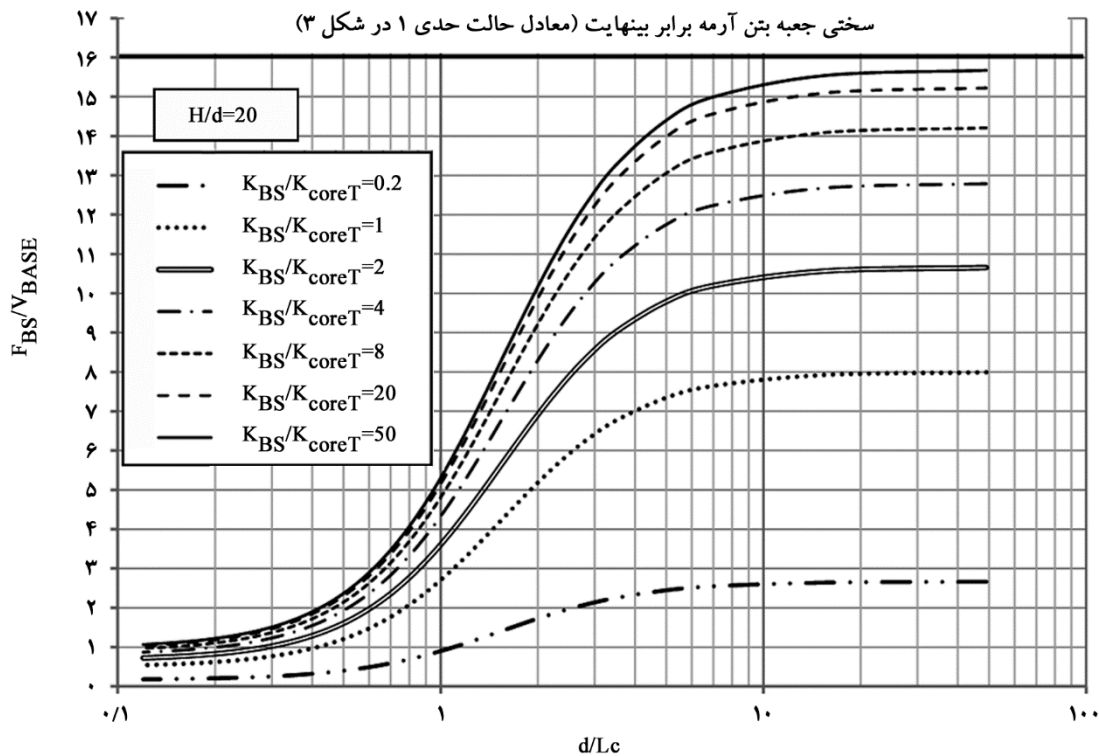
تغییر شکل‌های برشی (حالت واقعی)  $1/18$  برابر برش پایه (برابر با  $F_{BS} = 1.18 \times 210 = 248 \text{ Ton}$  می‌شود که بیانگر خطای

زیاد رابطه (۱) در برآورد نیروی رانش معکوس می‌باشد. با توجه به اینکه در ارائه منحنی شکل (۶)، نسبت‌های  $H/d$  و  $K_{Core}/K_{BS}$  برابر مقادیر مثال عددی انتخاب شده است، با مراجعه به این شکل می‌توان ملاحظه نمود که با افزایش نسبت  $d/L_c$  مقدار به دست آمده از رابطه (۱۱) یعنی  $1/18$  به مقدار به دست آمده از رابطه (۱) یعنی  $1/29$  میل می‌نماید. با توجه به این شکل می‌توان گفت که در حالت‌های کاربردی، میل به رابطه (۱) عملاً برای نسبت‌های  $d/L_c \geq 10$  با خطای بسیار ناچیزی محقق می‌گردد. البته همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد وقوع این حالت یعنی  $d/L_c \geq 10$  در موارد کاربردی بسیار نادر می‌باشد.

بررسی تغییرات نسبت سختی جعبه بتن‌آرمه به هسته مقاوم و مقایسه آن با حالت حدی ۱ در شکل (۳) نیز می‌تواند جالب توجه باشد. در شکل (۹) منحنی‌های تغییرات  $F_{BS}/V_{Base}$  نسبت

$$\frac{F_{BS}}{V_{Base}} = \frac{1+1.5\frac{\alpha(H)}{1+\beta(d)}}{\frac{K_{CoreT}}{K_{BS}}+1} = \frac{1+1.5\frac{0.5}{1+7.05}\times 20}{\frac{11.4}{(1+7.05)}+1} = 1.185 \quad (21)$$

مقایسه نتایج روابط تحلیلی (۲۰) و (۲۱) به ترتیب با نتایج حاصل از تحلیل عددی به دست آمده از روابط (۱۴) و (۱۵) نشان‌دهنده‌ی تطبیق مناسب روابط تحلیلی با نتایج عددی، در برآورد اثر رانش معکوس می‌باشد. بدیهی است که تنها، رابطه (۲۱) بیان‌کننده‌ی حالت واقعی بوده و رابطه (۲۰) صرفاً به لحاظ بررسی جنبه‌ی تئوری مسئله (به دلیل عدم در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی) ارائه شده است. مقایسه این دو حالت همچنین نشان‌دهنده‌ی اهمیت تغییر شکل‌های برشی بوده و میزان تأثیر آن در نتایج واقعی را بیان می‌کند. بررسی مطالعه موردی فوق نشان می‌دهد که نیروی رانش معکوس برای نسبت سختی هسته به جعبه بتن‌آرمه برابر  $11/4$ ، برای نسبت ابعادی  $L_c/d = 6/3.5 = 1.714$  برای یک هسته مقاوم با مقطع قوطی جدار نازک مربعی در حالت عدم لحاظ نمودن تغییر شکل‌های برشی،  $1/29$  برابر برش پایه (برابر با



شکل (۹): اثر نسبت ابعادی عمق به بعد هسته (پارامتر  $\beta$ ) در تغییر شکل‌های برشی برای مقادیر مختلف نسبت سختی و مقایسه با حالت حدی.

۲- میزان اثرگذاری تغییر شکل‌های برشی برای نسبت‌های کوچک عمق مدفون سازه به طول هسته (نسبت  $d/L_c$ ) کاملاً محسوس و قابل ملاحظه می‌باشد، به نحوی که عدم در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی خطای زیادی در برآورد نیروی رانش معکوس ایجاد نموده و استفاده از رابطه (۱) برای محاسبه آن را غیرقابل قبول می‌سازد.

۳- نکته ساده اما بسیار مهمی که در مدل‌سازی سازه‌های با عمق مدفون در زمین باید رعایت شود، عدم تعریف قید دیافراگم صلب در تراز طبقه زمین یا طبقات زیر تراز زمین می‌باشد؛ زیرا در غیر این صورت به دلیل عدم ایجاد نیروهای محوری در دیافراگم، هیچ اثری از پدیده رانش معکوس بر دیافراگم ترازهای مذکور مشاهده نخواهد شد.

۴- در صورتی که نسبت سختی جعبه بتن آرمه به بیش از حدود ۵۰ برابر سختی هسته بتن آرمه برسد جعبه بتن آرمه عملاً شبیه به یک تکیه‌گاه صلب (حالت حدی شکل ۳-ت) عمل می‌کند. همچنین در صورتی که عمق مدفون سازه به بیش از حدود ۱۰ برابر بعد هسته برسد اثر تغییر شکل‌های برشی بسیار ناچیز می‌شود. این حالت در موارد کاربردی بسیار کم رخ می‌دهد و لذا همواره استفاده از رابطه (۱۱) به جای رابطه (۱) قابل توصیه می‌باشد.

## مراجع

1. Kheyroddin, A. and Aramesh, S. (2012) *Lateral Resisting Systems in Tall Buildings*. Semnan University Press, Semnan, Iran (in Persian).
2. Bryan, S.S. and Coull, A. (1991) *Tall Building Structures: Analysis And Design*. John Wiley & Sons, New York.
3. Tocci, N. and Levi, S. (2012) Basement modeling in tall buildings: backstay effect. *Structure Magazine*, June, 23-24.
4. Karimi, M. and Kheyroddin, A. (2016) Study of backstay effect in tall buildings and presentation of governed relationships of structural behavior from

به پارامتر  $d/L_c$  برای مقادیر مختلف  $K_{BS}/K_{Core}$  ارائه شده است. در صورتی که برای مثال عددی ارائه شده در این تحقیق، سختی جعبه بتن آرمه به سمت بینهایت میل کند، وضعیتی معادل با حالت حدی ۱ در شکل (۳) را ایجاد می‌نماید. با مراجعه به شکل (۳-ت) مقدار حدی در این حالت باید برابر  $1 + 0.75(H/d)$ ، یعنی  $16 = 0.75 \times 20 + 1$  شود. دقت در منحنی‌های شکل (۹) نشان می‌دهد که زمانی که نسبت سختی جعبه بتن آرمه به حدود ۵۰ برابر سختی هسته بتن آرمه برسد این حالت حدی عملاً اتفاق افتاده و  $\frac{F_{BS}}{V_{Base}}$  به مقدار حدی خود (در این مثال عدد ۱۶) کاملاً نزدیک می‌شود.

نکته دیگری که در نمودارهای شکل (۹) می‌تواند قابل توجه باشد آن است که مقادیر  $F_{BS}/V_{Base} > 1$  به معنای بزرگ‌تر بودن نیروی رانش معکوس از برش پایه بوده و در این حالت باعث معکوس شدن نیروی برشی هسته در زیر تراز دیافراگم تراز زمین (مشابه نمودار برش در شکل ۲) می‌گردد. بررسی نمودارهای ارائه شده و یا خود رابطه (۱۱) می‌تواند طراح را در اینکه چگونه نسبت‌های سختی و ابعادی می‌توانند بر میزان نیروی برشی هسته در زیر تراز دیافراگم اثرگذار باشند، یاری نماید.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تغییر شکل‌های برشی بر روی اثر رانش معکوس بررسی و نتایج آن با حالت‌های حدی یعنی حذف کامل تغییر شکل‌های برشی و قرار دادن تکیه‌گاه صلب به جای جعبه بتن آرمه که به معنای در نظر گرفتن سختی بینهایت برای جعبه بتن آرمه می‌باشد، مقایسه شد. موارد زیر را می‌توان به عنوان اهم نتایج این تحقیق برشمرد.

۱- اثر تغییر شکل‌های برشی که باعث کاهش سختی هسته بتن آرمه می‌شود، بر ایجاد نیروی رانش معکوس ایجاد شده نیز یک اثر کاهشی می‌گذارد. به عبارت دیگر در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی هسته مقاوم، باعث کاهش نیروی رانش معکوس ایجاد شده می‌گردد.

<b>واژه‌نامه</b>	
Embedment Length	۱- طول گیرداری
Grade Level	۲- تراز مبنا (تراز زمین)
Backstay Effect	۳- اثر رانش معکوس
Finite Element Method (FEM)	۴- روش اجزای محدود
Shell Element	۵- المان پوسته

this viewpoint. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National Conference on Iranian structural Engineering*, Iran, Tehran, Amirkabir University (in Persian).

5. Moehle, J. (2015) *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education, New York.
6. Karimi, M. and Kheyroddin, A. (2015) Introduction and study of backstay effect in high-rise core-wall buildings. *Iranian Concrete Institute*, **59**, 34-42 (in Persian).
7. Adebar, P. (2008) Design of high-rise core-wall buildings: a canadian perspective. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, China, Beijing.
8. Rad, B.R. and Adebar, P. (2009) Seismic design of high-rise concrete walls: reverse shear due to diaphragms below flexural hinge. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **135**(8).
9. LATBSDC (2014) *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region*. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, Los Angeles, USA.
10. PEER/ATC-72-1 (2010) *Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
11. Kheyroddin, A. and Emami, E. (2016) *Shear Walls*. Semnan University Press, Semnan, Iran (in Persian).
12. Gere, J.M. and Timoshenko, S.P. (Ed.) (1991) *Mechanics of Materials*. Springer-Science+ Business Media, UK.
13. Office of Iranian National Building Regulations (2014) *Iranian National Building Code, Devision 9: Design and Construction of Concrete Structures*. Tehran, Iran (in Persian).
14. PEER/TBI (2017) *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*. Pacific Earthquake Engineering Research Center as part of the Tall Buildings Initiative, Headquarters at the University of California, Berkeley.

## Study of Backstay Effect in Tall Buildings with Core-Wall System by Involving of Shear Deformation

Mahdi Karimi<sup>1</sup>, Ali Kheyroddin<sup>2\*</sup> and Hashem Shariatmadar<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran
2. Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran,  
\*Corresponding Author, email: kheyroddin@semnan.ac.ir
3. Associate Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

### Introduction

Regarding to the efficiency of core-wall resisting system, it has become one of the most widely used structural resisting system. On the other hand, existence surrounding walls at subterranean levels together with diaphragm of grade level cause to comprise a stiff concrete box. This stiff box can create a large force at diaphragm of grade level whenever a lateral load is imposed to the structure. Due to a largeness of mentioned generated force, it may reverse the internal shear force of below grade in the core-wall. This phenomenon is often recognized as "Backstay Effect". Some literatures such as PEER/ATC 72-1 have been prescribed various certain values for upper and lower bound of stiffness of effecting components. By utilization of these specified values, the aforesaid structural components must be designed for all the critical conditions. A study was performed by Karimi and Kheyroddin determined various limit states of backstay effect. These limit states were investigated by various boundary condition assumptions for core-wall support and ground level diaphragm. Another research was performed by these authors, presented a relationship for prediction of backstay effect; however, this relationship was not considering of shear deformation that may be important for mentioned investigation.

### Involving Shear Deformation

This paper is focused on involving the shear deformation of the core-wall in backstay formulation. Large depth of section to the length ratio of a frame element causes to increase the contribution of the shear deformation in total deformation. Therefore, due to the largeness of the core-wall section dimensions relative to embedment length of structure in the ground, accounting of this aforementioned impact must be considered. In this research, the effect of shear deformation is comprised as a parameter named  $\beta$ . The  $\beta$  parameter is related to a shape of the element section and the length of that element, and can be calculated from the Elasticity of Material science. This parameter was obtained for a core with a shape of square thin walled section and then the aspect ratio of core width to the subterranean height is related to the generated force at the diaphragm of grade level. All the parameters exist in the presented formulas are dimensionless, that make convenient for the usage of them.

### Results and Discussion

Obtained formula is depicted in the form of some curves as a function of an aspect ratio of the subterranean height to the core width at different individual stiffness ratios (the stiffness of a concrete box relative to the stiffness of a core-wall). Investigation of these curves (or main formula) shows when the value of stiffness ratios is very high; the result of obtained formula is closed to a limit state of the obtained results of the previous research. Results show that considering of shear deformation cause to decrease the core-wall stiffness and also decrease generated force at diaphragm of grade level. Furthermore, concerning shear deformation is quite important for a low ratio of the embedment length to the dimension of core-wall section. If this ratio is bigger than about 10, the effect of shear deformation is not considerable.

Besides, for verification of the achieved formula, a numerical case study is performed. For this purpose, a building of 21 stories with a core-wall resisting system is investigated. This building has one story of basement and 20 stories of the superstructure with a quadrilateral typical plan (five bays of 6 m in each side). The core-wall section with a square shape of 6 by 6 m is placed at the centre of the plan. A notable point that must be considered at modelling time is not using the rigid diaphragm constraint at the diaphragm of grade level. Analysing of the explained mentioned building by ETABS program and comparing its result to the obtained result from the proposed formula showed a good acceptable match.

**Keywords:** Core-Wall System, Stiff Concrete Box, Backstay Effect, Shear Deformation, Grade Level.