

معرفی و مطالعه پدیده رانش معکوس در سازه‌های بلند با هسته مقاوم بتن آرمه



علی خیرالدین
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
استاد مدعو دانشگاه تگزاس، آمریکا



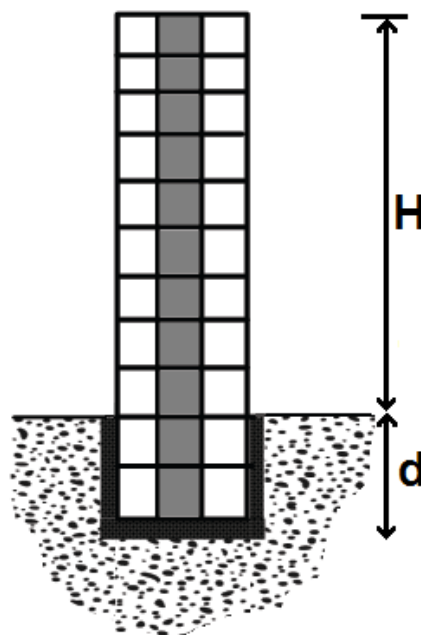
مهدی کریمی
دانشجوی دکتری سازه
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده

در پیکربندی اغلب سازه‌های بلند بخشی از ارتفاع سازه در یک یا چند طبقه بصورت مدفون در عمق زمین در نظر گرفته می‌شود. این طول یعنی فاصله تراز سطح زمین تا زیر فونداسیون که در متون تخصصی تحت عنوان طول گیرداری در خاک یا عمق مدفون سازه در خاک از آن نام برده شده است تابع عوامل متعددی است که هر کدام میتوانند بنحو قابل ملاحظه‌ای بر روی پاسخ سازه اثرگذار باشند. از بین عوامل دخیل، در این مقاله به بررسی اثر پدیده رانش معکوس پرداخته شده است. در سازه‌های با سیستم هسته مقاوم که استفاده از آن در سازه‌های بلند بسار رایج میباشد، با توجه به اینکه دیوارهای پیرامونی بکار رفته در طبقات زیرزمین دارای سختی جانبی بسیار بزرگی میباشد، ترکیب و تقابل این دو سیستم با یکدیگر باعث میشود که در صورت اعمال بار جانبی، نیروی متمرکز بزرگی در تراز دیافراگم واقع در تراز سطح زمین ایجاد و به هسته سازه وارد گردد. ایجاد این نیروی متمرکز در خلاف جهت بار جانبی باعث بروز پدیده رانش معکوس شده و اثرات مهمی را در هسته و دیافراگم واقع در تراز زمین ایجاد میکند. در این مقاله پس از معرفی دقیقتر این پدیده و بررسی عوامل موثر در آن، با در نظر گرفتن حالات حدی به ارائه روابطی برای ارزیابی میزان حداکثر و حداقل نیروهای داخلی بوجود آمده در هسته و دیافراگم مورد نظر پرداخته شده است. مطالعات نشان میدهد که پدیده رانش معکوس باعث افزایش نیروی برشی در جهت معکوس و کاهش لنگر داخلی در هسته مقاوم در زیر تراز زمین میگردد. همچنین مقادیر این نیروها بستگی به ارتفاع سازه، عمق مدفون، سختی جانبی بخش تحتانی (هسته و دیوارهای پیرامونی) و میزان گیرداری هسته به فونداسیون داشته که حالات حدی آن در این تحقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است.

کلمات کلیدی: سازه بلند، اثر رانش معکوس، هسته مقاوم.

مطالعه طرحهای معماری و پیکربندی سازه‌های بلند دنیا نشان می‌دهد که در اغلب آنها یک یا چند طبقه زیرزمین در آنها در نظر گرفته شده است. کاربری این طبقات که در طرح معماری معمولاً بعنوان پارکینگ، تجاری و دیگر بخشهای خدماتی در نظر گرفته میشود، بلحاظ سازه‌ای و تاثیری که بر روی جنبه‌های مختلف عملکرد سازه میگذارد نیز بسیار حائز اهمیت میباشد، بگونه ای که تعیین ابعاد تحتانی سازه برای رسیدن به عملکرد مطلوب و مناسب سازه‌ای ممکن است بر طرح معماری طراح، در این بخش حکفرما باشد. لحاظ نمودن این طبقات باعث میشود که بخشی از ارتفاع سازه در عمق زمین مدفون و باعث افزایش گیرداری سازه در خاک گردد؛ لذا به این عمق طول گیرداری^۱ سازه در خاک نیز اطلاق میگردد (شکل ۱).



شکل ۱: عمق مدفون یا طول گیرداری سازه در خاک در سازه‌های بلند
عمق مدفون سازه در خاک، در طراحی یک سازه بلند بسیار مهم بوده و پاسخ سازه را از طرق مختلف تحت تاثیر

قرار میدهد؛ که از جمله آنها میتوان به اثر اندرکنش خاک و سازه، افزایش گیرداری و کاهش تغییرمکانهای جانبی و وقوع پدیده‌ای بنام اثر رانش معکوس^۲ که موضوع مورد بررسی این مقاله میباشد اشاره نمود.

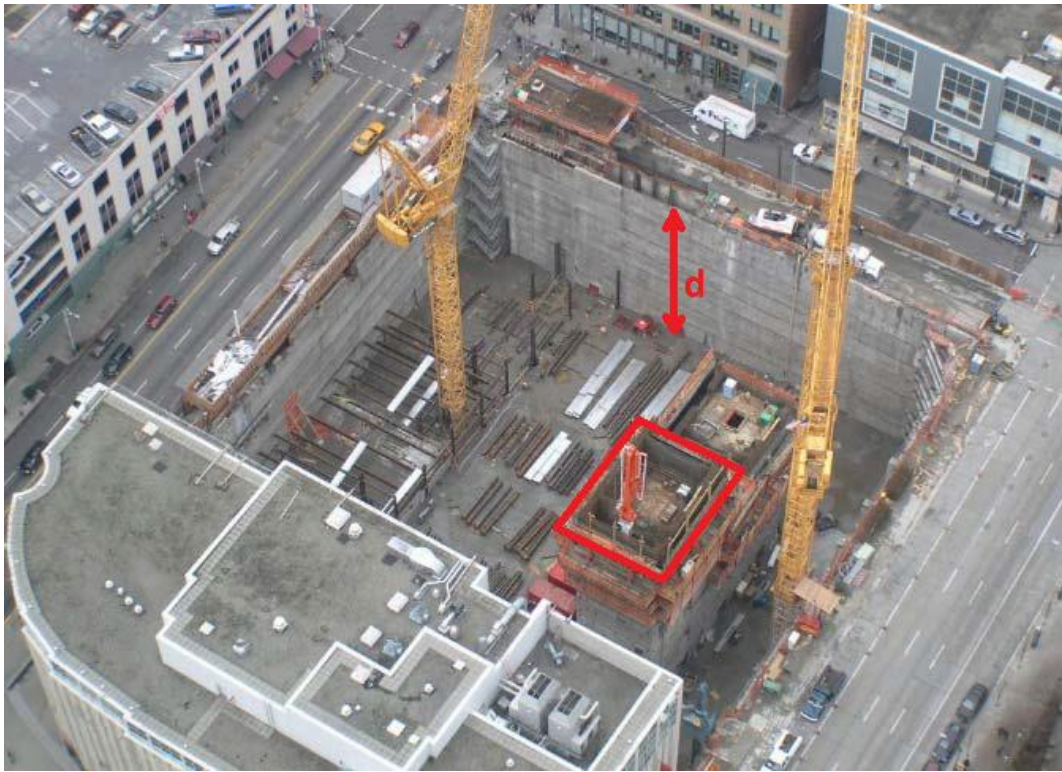
۲- معرفی و بیان مسئله

در طراحی سیستم مقاوم جانبی سازه‌های بلند، یکی از سیستمهای رایج مورد استفاده، سیستم هسته مقاوم بوده که در صورت طراحی صحیح [۱] میتواند دارای عملکرد لرزه‌ای بالا و بسیار مناسبی باشد. استفاده از این سیستم در کنار استفاده از دیوارهای بتن آرمه پیرامونی در طبقات زیرزمین یا همان عمق مدفون سازه (d) باعث بروز پدیده رانش معکوس در اینگونه سازه‌ها میگردد. در شکل ۲ نمایی از یک ساختمان بلند با سیستم هسته مقاوم بتن آرمه در مرحله اجرای فونداسیون و هسته نشان داده شده است. در این شکل همچنین عمق گیرداری سازه در خاک (عمق مدفون d) بصورت تقریبی نیز قابل مشاهده میباشد.

علت پدیده رانش معکوس را بصورت کیفی اینگونه میتوان بیان نمود که با توجه به استفاده از دیوارهای برشی پیرامونی در طبقات زیرزمین، در هنگام اعمال بار جانبی به روسازه سختی زیاد جانبی بخش مدفون سازه در مقابل تغییرشکل جانبی مقاومت بیشتری را در مقابل تغییر شکل، از خود نشان داده و با اعمال نیرویی در جهت خلاف اعمال بار جانبی به سیستم سازه‌ای اصلی سعی میکند مانع تغییرشکل سازه در حالت عادی و آزاد خود گردد [۲]. عمق کوچک مدفون d در مقایسه با ارتفاع سازه H و همچنین سختی زیاد جانبی دیوارهای پیرامونی در مجموع باعث بروز نیروی متمرکزی بزرگ در دیافراگم تراز زمین و وقوع پدیده رانش معکوس میگردد. بدیهی است که در صورت بزرگ بودن این نیرو (که معمولاً نیز به همین صورت میباشد) اثرات مهم و قابل ملاحظه‌ای را در پاسخ و رفتار سازه و بویژه در طراحی هسته و دیافراگم مورد نظر ایجاد مینماید.

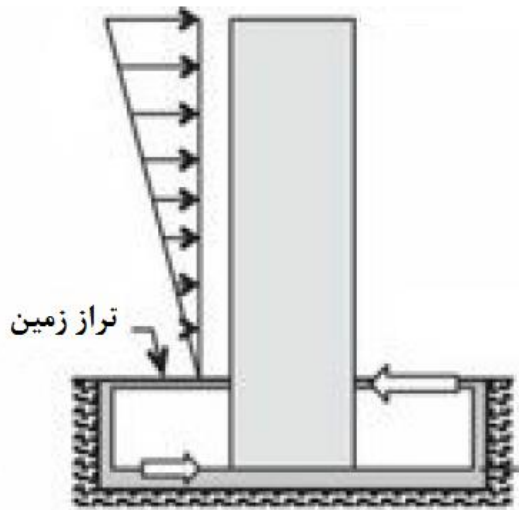
^۲ - Backstay Effect

^۱ - Embedment Length



شکل ۲: ساختمانی بلند با چهار طبقه زیرزمین و سیستم هسته مقاوم در مرحله فونداسیون [۳]

بصورت یک ستون طره در نظر گرفت که کل بار جانبی را متحمل می‌گردد.



شکل ۱: اثر رانش معکوس [۵]

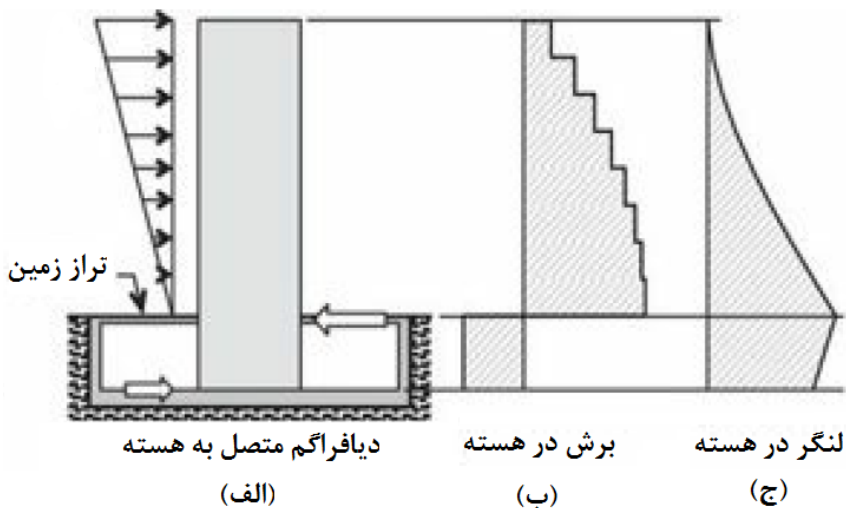
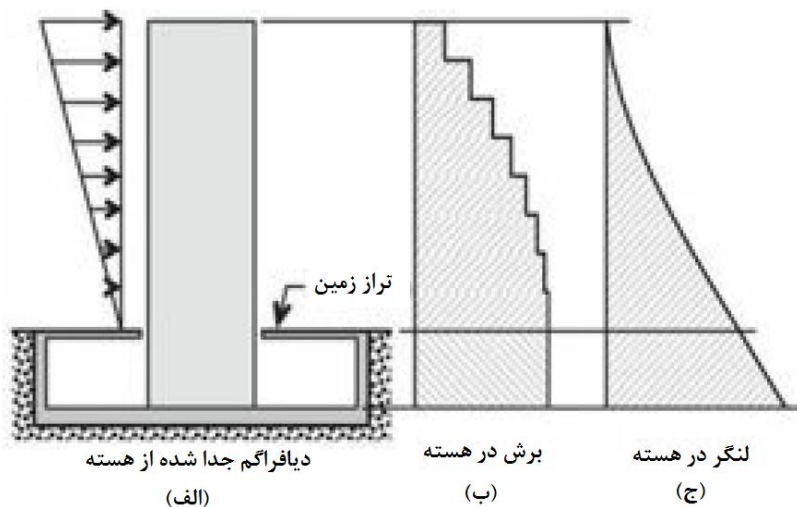
با فرضیات ذکر شده اگر نیروی متمرکز ناشی از رانش معکوس با ایجاد فاصله‌ای میان هسته و دیافراگم حذف گردد، با مشخص بودن بار جانبی گسترده در ارتفاع سازه،

مقدار نیروی متمرکز بوجود آمده و بطور کلی پارامترهای موثر در پدیده رانش معکوس تابع عوامل زیادی می‌باشد که از جمله آنها میتوان به ارتفاع بخش روسازه، ارتفاع بخش مدفون یا همان طول گیرداری سازه در خاک، تعداد طبقات زیرزمین، میزان گیرداری هسته به فونداسیون، نحوه اتصال دیافراگم، میزان سختی دیوارهای پیرامونی و هسته و دیافراگم، اثر ترک خوردگی و اندر کنش قاب و هسته [۴] اشاره نمود. بمنظور ساده‌سازی و درک بهتر این موضوع در اینجا سعی میشود حالت ساده آن یعنی وجود تنها یک طبقه زیرزمین (با ارتفاع متغیر) در نظر گرفته شده و پارامترهای اصلی اثرگذار بر روی مسئله در حالات حدی آن مورد بررسی و تدقیق قرار گیرد.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اعمال نیروی جانبی بر سازه باعث بروز یک کوپل نیروی مخالف با لنگر واژگونی، در تراز سطح زمین و فونداسیون بر روی هسته می‌گردد. در صورتیکه اتصالات تیر به ستون بصورت ساده فرض گردد در اینصورت هسته سازه را میتوان

دیافراگم واقع در تراز زمین، اثر این نیرو (اثر رانش معکوس) باعث تغییر توزیع برش و لنگر خمشی مطابق شکل ۵ خواهد شد.

دیافراگم برش و خمش را می‌توان براحتی برای هسته ترسیم نمود (شکل ۴). حال در صورت وجود اتصالی پیوسته میان هسته و دیافراگم و به وجود آمدن نیروی متمرکز بزرگ در



۳- تحلیل مسئله در حالات حدی

همانطور که در بخش قبل ذکر گردید مقدار نیروی متمرکز ایجاد شده بستگی به میزان سختی بخش تحتانی مدفون سازه در خاک دارد. اگر بخش تحتانی سازه را کاملاً سخت فرض نماییم، بررسی اثر رانش معکوس را می‌توان با مدلی که در شکل ۶ ارائه شده است، در یک

در اینحالت بدیهی است که نحوه و میزان تغییر در دیافراگم برش و خمش ارتباط مستقیم با مقدار نیروی متمرکز ایجاد شده خواهد داشت که آن نیز به نوبه خود وابسته به مقدار سختی دیافراگم تراز زمین و بخش تحتانی مدفون سازه در خاک می‌باشد.

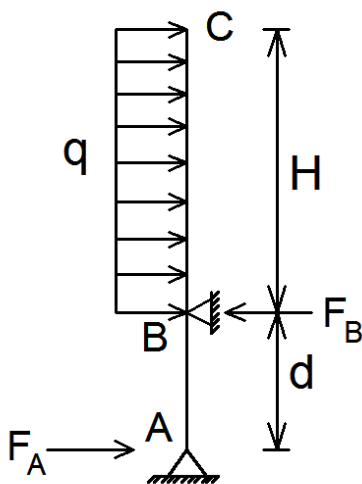
میباشد، روابط فوق را میتوان بشکل روابط کاملاً بدون بعدی بصورت زیر تبدیل نمود:

$$\frac{F_B}{qH} = 1 + \frac{3H}{4d} \quad (4)$$

$$\frac{F_A}{qH} = \frac{3H}{4d} \quad (5)$$

$$\frac{M_A}{qH^2/2} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه در حالت واقعی ممکن است فرض گیرداری کامل پای هسته به فونداسیون صحیح نباشد یکی دیگر از حالات حدی مورد بررسی را میتوان با فرض مفصلی بودن (چرخش کاملاً آزاد) پای هسته بصورت نشان داده شده در شکل ۷ فرض، و روابط فوق را مجدداً استخراج نمود.



شکل ۷: مدل حدی با سختی جانبی ماکزیمم و چرخش آزاد در پای هسته

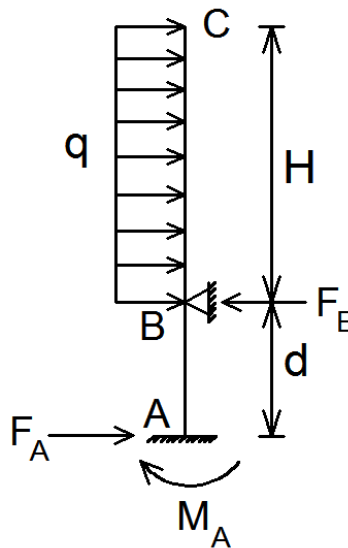
نتایج حاصله برای حالت حدی شکل ۷ بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{F_B}{qH} = 1 + \frac{H}{2d} \quad (7)$$

$$\frac{F_A}{qH} = \frac{H}{2d} \quad (8)$$

$$\frac{M_A}{qH^2/2} = 0 \quad (9)$$

حالت حدی (بخش تحتانی کاملاً صلب و اتصال هسته به فونداسیون کاملاً گیردار) مورد بررسی قرار داد [3]. در این مدل برای رسیدن به یک ارزیابی کمی، بار جانبی را بصورت بار گسترده یکنواخت (نزدیک به حالت بارگذاری باد) در نظر گرفته و دیگرام برش و خمش با فرض متغیر بودن ارتفاع d استخراج شده‌اند.



شکل ۶: مدل حدی با سختی ماکزیمم و بار گسترده یکنواخت

نتایج حاصل از تحلیل سازه فوق با یک درجه نامعینی، و مرتب نمودن پارامترها بر حسب نسبت بدون بعد $\frac{H}{d}$ بصورت زیر بدست آمده‌اند:

$$F_B = qH \left(1 + \frac{3H}{4d}\right) \quad (1)$$

$$F_A = qH \left(\frac{3H}{4d}\right) \quad (2)$$

$$M_A = \frac{1}{4} qH^2 \quad (3)$$

همانطور که در روابط فوق مشاهده میشود در این حالت حدی، مقدار لنگر در پای سازه ارتباطی به عمق مدفون d ندارد. با توجه به اینکه qH در واقع به منزله کل بار جانبی وارده، و $\frac{qH^2}{2}$ برابر لنگر در پای روسازه (نقطه B)

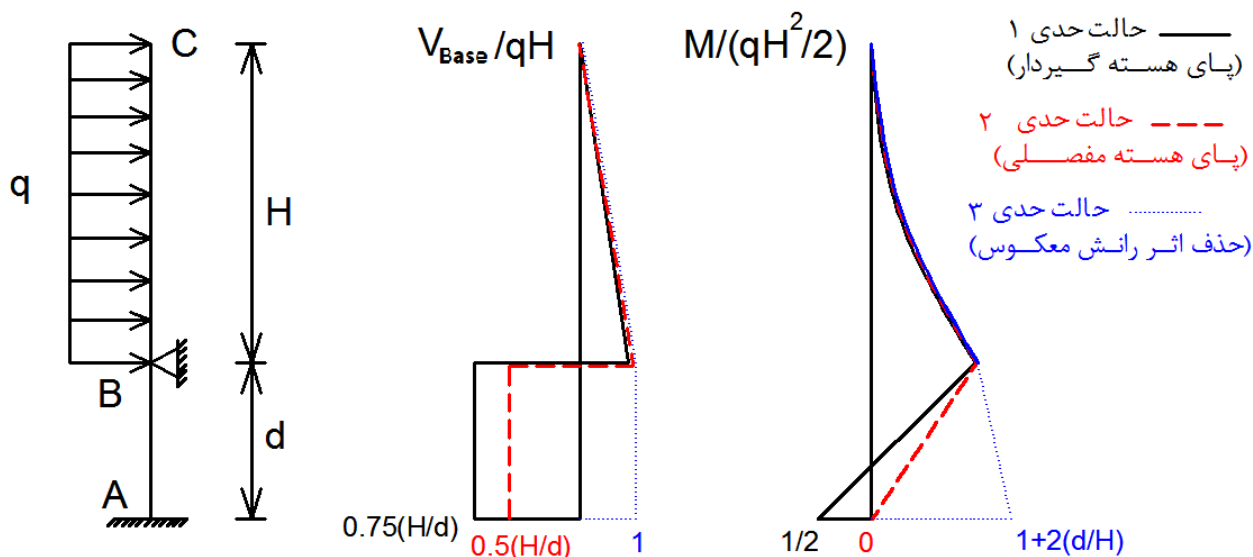
شایان ذکر است که در کلیه روابط فوق F_A با مقدار برش هسته در زیر دیافراگم واقع در تراز زمین (V_{Base}) نیز برابر می‌باشد. اکنون می‌توان با رسم دیاگرام های برش و لنگر خمشی برای هر سه حالت حدی بر روی یک گراف، برآورد یا تخمینی از حالت واقعی که بین حالات حدی مفروض قرار می‌گیرد حاصل نمود (شکل ۸).

نهایتاً اگر سختی جانبی بخش تحتانی به صفر میل نماید (بعبارت دیگر تکیه گاه B حذف گردد) اما پای هسته گیردار باشد، این روابط بشکل زیر تبدیل میشوند:

$$\frac{F_B}{qH} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{F_A}{qH} = 1 \quad (11)$$

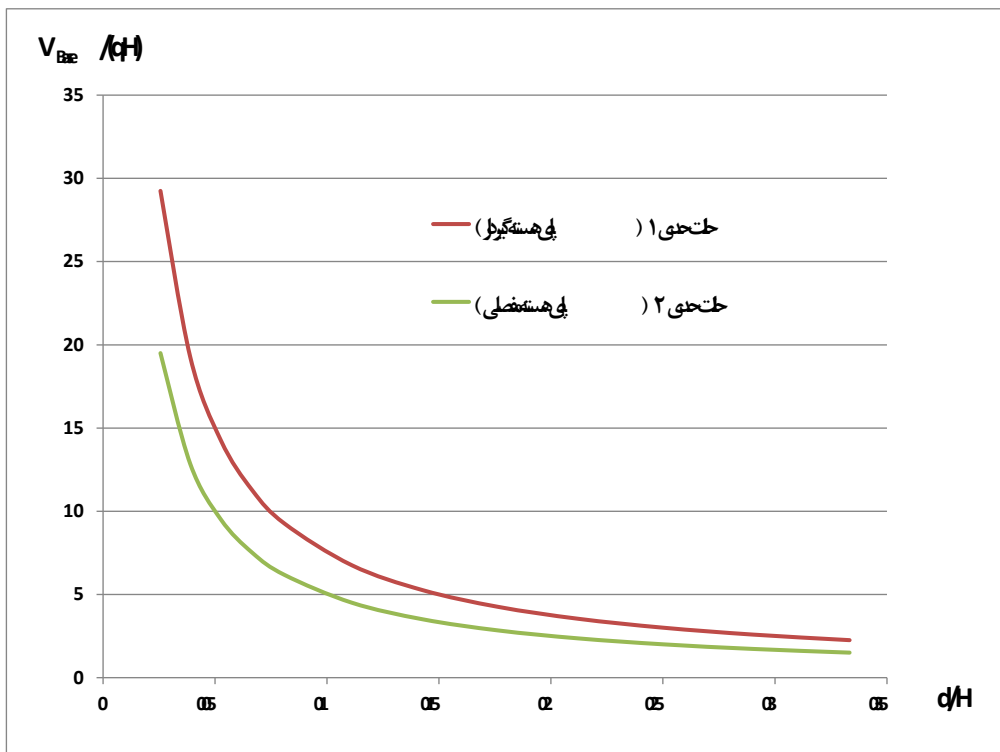
$$\frac{M_A}{qH^2/2} = 1 + \frac{2d}{H} \quad (12)$$



شکل ۸: دیاگرام برش و لنگر خمشی هسته در حالات حدی

همانطور که از نتایج تحلیلی حالات حدی بدست آمده و همچنین از تجسم شهودی مسئله نیز قابل تصور می‌باشد میزان برش در زیر تراز زمین در دو حالت حدی ۱ و ۲ ارتباط مستقیم با نسبت H/d (یا نسبت عکس با d/H) خواهد داشت. برای مشاهده بهتر اثر این نسبت یعنی d/H در میزان برش قسمت تحتانی سازه، در شکل ۹ روند تغییرات برش این ناحیه بر حسب $\frac{d}{H}$ ارائه شده است.

با توجه به اینکه حالت‌های مورد بررسی قرار گرفته در فوق، جزء حالات حدی این مسئله تلقی میشوند لذا می‌توان انتظار داشت که در حالت واقعی با توجه به نسبت سختی دیوارهای پیرامونی و همچنین میزان گیرداری پای هسته مقادیر برش و لنگر خمشی هسته در بخش تحتانی (در قسمت عمق مدفون) بین مقادیر حداقل و حداکثر بدست آمده قرار گیرند. لذا می‌توان گفت که مقدار برش واقعی به کل بار وارده در این قسمت از هسته بین مقادیر حدی ۱ و $0.75(H/d)$ و مقدار لنگر واقعی در پای سازه به لنگر در پایین قسمت روسازه (یعنی $qH^2/2$) بین مقادیر حدی ۰.۵ و $1 + 2(d/H)$ واقع می‌گردد.



شکل ۹: روند تغییرات برش در قسمت تحتانی هسته بر حسب نسب d/H

در نظر گرفته شده و آنگاه با انجام آنالیز حساسیت نسبت به آنها حالت بحرانی بدست آمده حاکم بر هر المان سازه‌ای در طراحی آن مورد استفاده قرار گیرد. بعنوان مثال انجمن سازه‌های بلند لوس آنجلس آمریکا پیشنهاد میکند که برای در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی دیافراگمها، سازه بایستی در دو حالت حد بالا و حد پایین ترک خوردگی مطابق جدول ۱ تحت آنالیز قرار گرفته و المانهای سازه‌ای برای حالت بحرانی طراحی گردند.

از نمودار ارائه شده در شکل ۹ کاملاً واضح است میزان برش در قسمت تحتانی هسته شدیداً به نسبت d/H وابسته بوده و با افزایش آن برش در ناحیه تحتانی سرعت کاهش میابد. در اینجا شایان ذکر است که بعلت تعداد زیاد پارامترها و حالت‌های احتمالی ممکن، ارائه یک روش عمومی که برای کلیه ساختمانها صادق باشد مشکل میباشد. اما با توجه به تعدد عوامل موثر و دخیل در بررسی این مسئله، بهترین کار آن است که در مدلسازی صورت گرفته همه پارامترها

جدول ۱: حد بالا و پایین ضرایب ترک خوردگی دیافراگمها در تراز زمین و زیر آن [۶]

Stiffness Parameters	UB	LB
Diaphragms at the podium and below		
$E_c I_{eff}$	0.5	0.20 to 0.25
$G_c A$	0.5	0.20 to 0.25

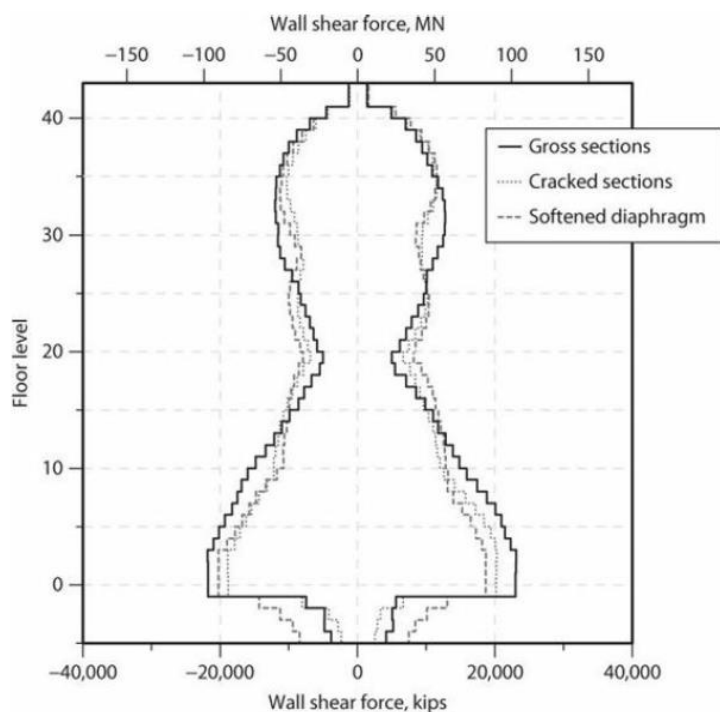
دیافراگم (که باعث کاهش سختی آن میگردد) میباشد، نتایج بدست آمده از این حالات حدی ممکن است تا حدی همراه کننده باشد. لذا در طراحی یک سازه واقعی نتایج آنالیز بایستی نسبت به میزان ترک خوردگی، تحت

همانطور که ذکر شد حالات حدی ارائه شده در این تحقیق تنها بیانگر مقادیر ماکزیمم و مینیمم نیروهای بوجود آمده میباشند و با توجه به اینکه نیروهای تولید شده در هسته بسیار حساس به میزان ترک خوردگی

که حداکثر برش معکوس بوجود آمده در دیوار متناسب با ظرفیت خمشی دیوار میباشد [۷]. در یکی از مراجعی که ATC و PEER بصورت مشترک و بعنوان یک راهنما برای طراحی سازه‌های بلند منتشر نموده‌اند نحوه و چگونگی لحاظ نمودن اثر ترک خوردگی اجزای موثر در پدیده رانش معکوس را بصورت دقیقتر و مفصلتری ارائه نموده‌اند [۸]. در این مرجع پدیده رانش معکوس بطور کلی بنحو جامعتری (نسبت به سایر مراجع) مورد بررسی و دقت قرار گرفته است.

آنالیز حساسیت قرار گرفته و المانهای تحت تاثیر، مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. بعنوان مثالی از یک طراحی واقعی در شکل ۱۰ نمونه‌ای از نتایج اثر ترک خوردگی در هسته مقاوم و دیافراگم یک ساختمان ۵۴ طبقه که توسط J. Moehle [۵] در کتاب طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح ایشان بررسی گردیده، ارائه شده است. در این شکل میتوان مشاهده نمود که برش هسته در زیر تراز زمین تا چه حد میتواند تحت تاثیر سختی و ترک خوردگی قرار بگیرد.

در بررسی این پدیده تحت آنالیز دینامیکی غیرخطی توسط Rad و Adebar (2008) نیز مشاهده شده است



شکل ۱۰: اثر ترک خوردگی در هسته و دیافراگم در توزیع برش درون هسته [۵]

۴- نتیجه گیری

یکی از جنبه‌های اثرگذار عمق مدفون یا طول گیرداری سازه در خاک بر روی پاسخ سازه، اثر رانش معکوس میباشد که باعث کاهش لنگر در بخش تحتانی هسته و افزایش چشمگیر نیروی برشی در این ناحیه میگردد. با توجه به پیچیدگیهای ذاتی بررسی این پدیده بدلیل اثرات ناشی از ترک خوردگی و میزان سختی اجزای مشارکت

با توجه به ارتباط و حساسیت شدید نیروهای داخلی (برش و ممان) تولید شده در هسته نسبت به سختی دیافراگم و دیوارهای پیرامونی [۹]، تحقیقی در راستای بررسی نحوه اثر سختی اجزای مشارکت کننده در انتقال نیروهای بخش تحتانی سازه نیز توسط نویسندگان این مقاله در دست مطالعه میباشد

اتصال هسته به فونداسیون نصف مقدار لنگر در تراز پایه خواهد بود. در حالتی که چرخش در اتصال هسته به فونداسیون کاملاً آزاد (اتصال مفصلی) فرض گردد، این مقادیر به ترتیب به $0.5(H/d)$ و مقدار صفر کاهش میابد. بررسی روند کاهش سختی جعبه بتنی که در حالت حدی میتوان آنرا برابر صفر فرض نمود نیز نشان میدهد که در این حالت برش در بخش تحتانی به برش پایه میل نموده اما مقدار لنگر به میزان $1 + \frac{2d}{H}$ برابر لنگر پای روسازه افزایش میابد. در نظر داشتن مقادیر حدی این نیروها به هنگام طراحی میتواند کمک موثری به قضاوت مهندسی و داشتن یک ارزیابی اولیه از مقادیر نیروها و انتخاب عمق مدفون و سایر پارامترهای وابسته گردد؛ اما در طراحی واقعی برای طراحی و اطمینان از عملکرد مطمئن کلیه المانهای سازه‌ای در بخش تحتانی سازه، بایستی با در نظر گرفتن میزان ترک خوردگیهای مختلف (مانند آنچه که در جدول ۱ ارائه شده است) در مدل‌های جداگانه اثر آن در نحوه باز توزیع نیروها مورد بررسی قرار گیرد.

کننده در انتقال نیروهای مورد بررسی، در این مقاله سعی شده است تا با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده حالات حدی حداکثر و حداقل مورد بررسی قرار گیرد. لذا در صورتیکه دیوارهای پیرامونی زیرزمین همراه با فونداسیون کف و دیافراگم تراز زمین همانند یک جعبه سخت بتنی تصور گردد، این وضعیت را در حالت حدی (یعنی سختی بسیار زیاد جانبی دیوارهای پیرامونی و دیافراگم واقع در تراز زمین) میتوان مشابه یک تکیه‌گاه ثابت در تراز زمین فرض نمود. همچنین در صورتیکه میزان گیرداری اتصال پای هسته به فونداسیون بصورت کامل فرض نشود حالات حدی این اتصال را میتوان بصورت گیردار و بار دیگر بصورت مفصلی فرض نمود. حل تحلیلی مسئله در حالات حدی ذکر شده در حالت بار گسترده یکنواخت نشان میدهد که در صورت گیرداری کامل و سختی بینهایت جعبه بتنی (یعنی حالتی که میزان این سختی نسبت به سختی هسته بسیار زیاد باشد) مقدار برش ایجاد شده در بخش تحتانی هسته $0.75(H/d)$ برابر برش پایه و میزان لنگر در محل

۵- مراجع

[۱] خیرالدین، علی و آرامش، سیما، سیستم‌های مقاوم سازه ای در سازه های بلند، دانشگاه سمنان، چاپ دوم، ۱۳۹۴

[2] N. Tocci and S. Levi, "Structure Magazine." pp. 23–24, 2012.

[3] J. Maffei, "Floor diaphragms, collectors, and podium and backstay effects in tall buildings," 2008, no. April.

[4] S. S. Bryan, A. Coull, "Tall Building Structures: Analysis And Design." John Wiley & Sons, 1991

[5] J. Moehle, *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education, 2015.

[6] "An Alternative Procedure For Seismic Analysis And Design Of Tall Buildings Located In The Los Angeles Region." Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, 2014.

[7] P. Adebar, "Design Of High-Rise Core-Wall Buildings : A Canadian Perspective," No. Ii, 2008.

[8] "Modeling And Acceptance Criteria For Seismic Design And Analysis Of Tall Buildings." Applied Technology Council/Pacific Earthquake Engineering Research Center (ATC/PEER), 2010.

[9] "Seismic Design Guidelines For Tall Buildings." Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 2010.