

اثر اندرکنش خاک و سازه بر ارزیابی عملکرد شاخص خرابی تجمعی انرژی در قاب های بتن مسلح

رضا وهدانی^{۱*}، مجید بیطرفان^۲، محمد ایمان خداکرمی^۳

۱- استادیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در اکثر روش های متداول طراحی، خاک زیر سازه صلب فرض می شود در صورتی که در واقعیت صلب نیست. تا کنون مطالعات زیادی بر روی تاثیر اندرکنش بر پاسخ سازه صورت پذیرفته، ولی تاثیر این پدیده بر خرابی سازه چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه به بررسی شاخص خرابی غیر تجمعی کوزینگ که شاخص خرابی بر اساس انرژی می باشد، در سطوح شکل پذیری هدف ۳، ۴ و ۵ در قاب های خمشی بتنی ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ طبقه تحت ۷ عدد شتابنگاشت پرداخته شده است. خاک زیر سازه نیز با استفاده از مفهوم مدل های مخروطی مدل شده اند. نتایج نشان می دهد که در قاب های کوتاه مرتبه که دارای لاغری کمی هستند عدم در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه ها در جهت اطمینان می باشد ولی با افزایش ارتفاع قاب ها (افزایش لاغری) به همراه افزایش شکل پذیری اثر اندرکنش خاک و سازه در طبقاتی موجب افزایش خرابی می گردد که این افزایش در نقاطی تا ۱۴ درصد به خصوص در طبقات فوقانی پیش می رود که این موضوع اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه را در سازه های لاغر نشان می دهد. در خاک متوسط در اکثر موارد پاسخ ها به حالت صلب بسیار نزدیک می باشند. ولی در بررسی خرابی در معیار کلی قاب، اثر اندرکنش خاک و سازه موجب کاهش شاخص خرابی می گردد. در شاخصی تجمعی که مبنای انرژی داشته باشد، اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی در المان تیر بیشتر از المان ستون می باشد.

کلمات کلیدی: شاخص خرابی تجمعی، اندرکنش خاک و سازه، شکل پذیری هدف، خرابی محلی و کلی.

*نویسنده مسئول: رضا وهدانی

پست الکترونیکی: reza.vahdani2001@gmail.com

در سال های اخیر مفهوم شاخص های خرابی جنبه گسترده ای پیدا کرده است. همچنین دانش کامل از روشی که سازه چگونه آسیب می بیند، توانایی را برای تعریف یک تابع خسارت افزایش می دهد. در مورد سازه های بتن مسلح به دلیل اندرکنش بتن و فولاد وضعیت کمی مشکل می باشد. برای این نوع سازه ها باید میزان بار موثر و تعداد سیکل های شکست و ارتباطشان، با به کار بردن فاکتورهای شتاب ویژه شبیه سازی گردند [۱].

اخیرا، مطالعات متعددی توسط محققان به منظور ارزیابی شاخص های خرابی سازه ها انجام شده است. با این حال، کلیه محققان بر انواع مختلف سازه ها با پی صلب، یعنی بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه، متمرکز شده اند. اندرکنش خاک و سازه یکی از مهمترین فاکتورهایی است که می تواند به طور قابل توجهی پاسخ های لرزه ای سازه های قرار گرفته در خاک های نرم را با تغییر سختی کلی و مکانیزم استهلاک انرژی سیستم ها، تحت تاثیر قرار دهد. در حقیقت، یک سیستم خاک-سازه به عنوان سیستم جدید دارنده ی پیروید طولانی تر و به طور کلی میرایی بالاتر به علت استهلاک انرژی توسط رفتار هیسترتیک و تابش موج در خاک، رفتار می کند [۲]. در سال های اخیر، مطالعات بسیاری توسط محققان برای بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه بر رفتار غیر الاستیک سازه ها شکل گرفته است [۳]. [۴]. با این حال، بیشتر آنها بر سیستم های SDOF متمرکز شده اند، در حالی که اثر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ غیر الاستیک سیستم های MDOF به علت پیچیده تر بودنش به طور جزئی بررسی نشده است. در مطالعه ای که اخیرا صورت گرفته، گنجوی و هائو [۵] به واسطه ی محاسبات پارامتریک دقیق، اثر اندرکنش خاک و سازه را بر مقاومت و نیازهای شکل پذیری MDOF همچون ساختمان های SDOF معادل آن با در نظرگیری هر دو رفتار الاستیک و غیر الاستیک، بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ممکن نیست سیستم های SDOF معمول به تخمین دقیقی از مقاومت و نیازهای شکل پذیری سیستم های خاک-سازه MDOF، به خصوص برای ساختمان های میان مرتبه و بلند مرتبه، به علت سهم قابل توجه مود های ارتعاشی بالاتر، منجر شوند.

مطالعات کمی از اثرات اندرکنش خاک و سازه بر سیستم های MDOF توسط بارسنا و استوا [۶]، چوو و هائو [۷، ۸]، ریچودهری [۹] و تنگ و ژنگ [۱۰] انجام شده است. با این حال، اثرات اندرکنش خاک و سازه بر نیازهای لرزه ای سیستم های MDOF به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته اند و بررسی های بیشتر ضروری به نظر می رسند. در حقیقت، بررسی خرابی سازه به صورت موضعی و کلی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه ضروری است. علت این امر این است که، پارامترهای دوران بیشینه، دوران پلاستیک و انرژی جذب شده توسط سازه ها، به طور قطع توسط مشخصات خاک تحت تاثیر قرار می گیرد. در این پژوهش، مطالعه ی پارامتری جامعی به منظور ارزیابی اثر اندرکنش خاک و سازه بر شاخص خرابی کرزینگ در شکل پذیری های هدف مختلف و در قاب های بتن مسلح با استفاده از مدل ساده شده ی خاک-سازه، انجام شده است. این کار برای محدوده ی زیادی از مدل های سازه ای برای ارزیابی نقش اندرکنش خاک و سازه بر شاخص خرابی کرزینگ در سازه های ساختمانی MDOF انجام شد. در زیر به صورت موردی به نوآوری های مقاله اشاره می شود:

۱- در این مطالعه سازه های چند درجه آزادی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در صورتی که مطالعات انجام گرفته، اکثرا بر روی سازه های یک درجه آزادی بوده است، در صورتی که مطالعات اخیر نشان می دهد که سازه یک درجه آزاد تخمین مناسبی از سازه چند درجه آزادی ندارند.

۲- ارزیابی بر روی رفتار اعضا تیر، ستون و معیار طبقه به صورت مجزا انجام گرفته است.

۳- پارامتر مورد بررسی به منظور ارزیابی اثر اندرکنش خاک و سازه، شاخص خرابی سازه بر اساس انرژی می باشد. در مطالعات پیشین معمولا پارامترهای لرزه ای (تغییر مکان نسبی، برش پایه، ...) بیشتر مورد بررسی قرار گرفته اند.

۴- اثر شکل پذیری سازه نیز به عنوان یک پارامتر مهم، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل خرابی

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار سازه تحت اثر اندرکنش خاک و سازه از شاخص خرابی تجمعی کرزینگ استفاده شده است

[۱].

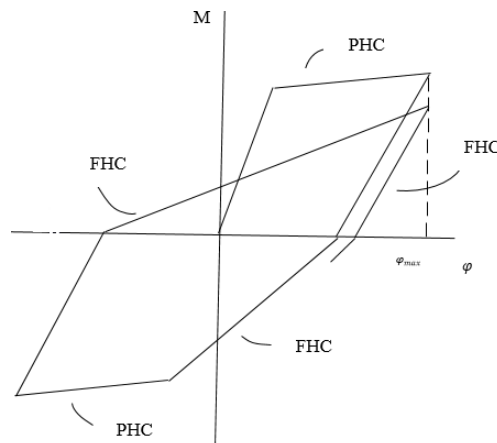
انرژی مستهلک شده در عضو معمولاً ناشی از جاری شدن مصالح و میرایی در عضو است. این شاخص از مجموع این انرژی‌ها به عنوان پارامتر نشانگر خرابی استفاده می‌کند. محاسبه این شاخص از طریق روابط ۱ تا ۳ امکان پذیر می‌باشد.

$$D_{Kratzig} = D^+ + D^- - D^+ \times D^- \quad (1)$$

$$D^+ = \frac{\sum E_{p,i}^+ + \sum E_{f,i}^+}{E_u^+ + \sum E_{f,i}^+} \quad (2)$$

$$D^- = \frac{\sum E_{p,i}^- + \sum E_{f,i}^-}{E_u^- + \sum E_{f,i}^-} \quad (3)$$

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود چرخه هیسترتیک عضو به چهار بخش تقسیم شده است. عبارت PHC نشان دهنده قسمتی از چرخه هیسترتیک است که در آن ممان و چرخش هم علامت هستند و عبارت FHC نشان دهنده یک چهارم چرخه بعد از PHC است تا حدی که در آن قدر مطلق ممان حداکثر عضو از PHC قبلی بیشتر نشود. عبارت مثبت و یا منفی نیز به علامت حداکثر ممان در PHC قبلی بستگی دارد [۱].



شکل ۱: پارامترهای شاخص خرابی کرزینگ [۱].

۳- مدل خاک-سازه

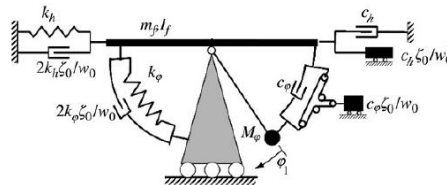
روش زیر سازه برای مدل کردن سیستم خاک-سازه استفاده می شود. با استفاده از روش زیر سازه، خاک می تواند به طور جداگانه مدل شود و سپس برای ایجاد سیستم خاک-سازه ترکیب گردد. المان-خاک-پی توسط مدل گسسته ی خطی معادل بر اساس مدل مخروطی با ضرایب وابسته به فرکانس و مدل خطی معادل، مدل می شود [۱۱، ۱۲]. مدل مخروطی بر اساس تئوری انتشار موج یک بعدی، یک پی صلب دایره ای با جرم m_f و ناحیه ممان اینرسی I_f را نشان می دهد که بر روی نیم فضای همگن قرار دارد. به جای روش الاستودینامیک خیلی دقیق، مدل مخروطی ساده شده می تواند با دقت کافی در فعالیت های مهندسی استفاده شود [۱۲].

مدل خاک استفاده شده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. درجات آزادی انتقالی و نوسانی به ترتیب به عنوان نماینده های حرکات انتقالی و چرخشی پی سطحی با نادیده گرفتن اثر کم حرکت عمودی و پیچشی، تعریف می شوند. سختی و اتلاف انرژی خاک تکیه گاه به ترتیب توسط فنرها و کمک فنرها (میراگرها) نشان داده می شوند. کلیه ضرایب فنرها و میراگرها برای درجات آزادی انتقالی و نوسانی استفاده شده برای تعریف مدل خاک-پی سطحی در به صورت زیر خلاصه می شوند:

$$K_h = \frac{8\rho v_s^2 \Gamma}{2 - \nu} \quad , \quad C_h = \rho v_s A_f \quad (4)$$

$$K_\phi = \frac{8\rho v_s^2 \Gamma^3}{3(1 - \nu)} \quad , \quad C_\phi = \rho v_p I_f \quad (5)$$

که k_h ، c_h ، k_ϕ و c_ϕ به ترتیب سختی انتقالی، میرایی ویسکوز انتقالی، سختی نوسانی، و میرایی ویسکوز نوسانی هستند. شعاع و مساحت معادل پی استوانه ای (دایره ای) توسط r و A_f نشان داده می شوند. علاوه بر این، U ، ρ ، v_p و v_s به ترتیب چگالی جرمی مخصوص، نسبت پواسن، سرعت موج اتساعی و سرعت موج برشی خاک هستند.



شکل ۲: نمونه ای از مدل قابها با سیستم تکیه گاه منعطف [۱۳].

۴- روش تحقیق

۴-۱- صحت سنجی

جهت صحت سنجی روش مدلسازی، یک سازه ی سه طبقه انتخاب شده است [۱۴]. جزئیات تحلیل تاریخچه زمانی و چگونگی صحت سنجی در زیر شرح داده شده است.

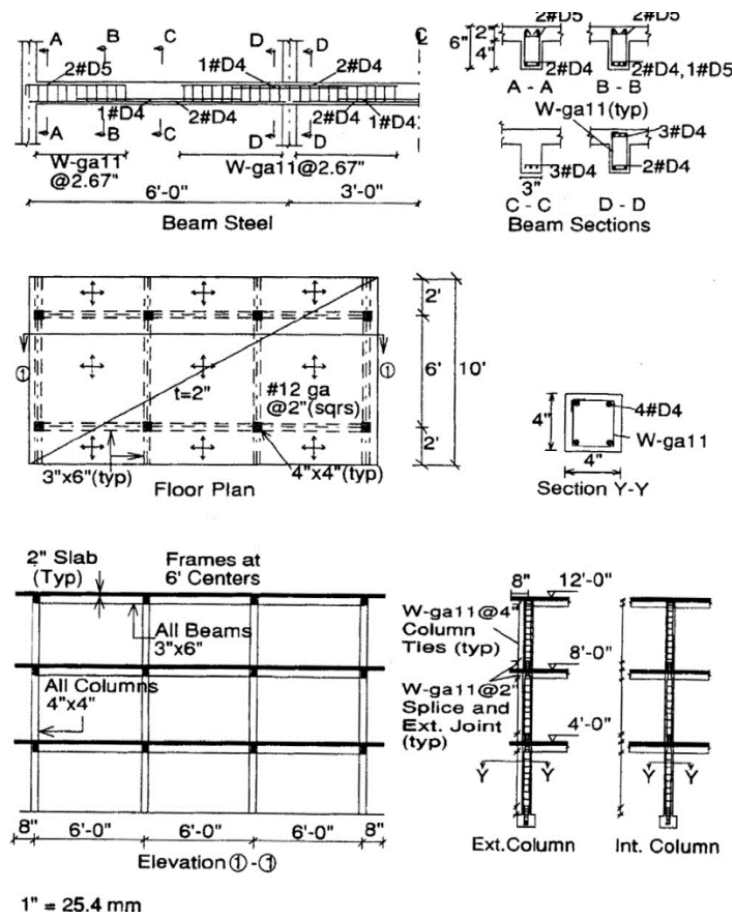
سازه ی نمایش داده شده در شکل ۳ یک سازه ی بتنی سه طبقه با مقیاس یک سوم می باشد که تحت اثر بارهای گرانشی طراحی شده است. مقاومت فشاری بتن بین ۲۰/۲ تا ۳۴/۲ مگاپاسگال (میانگین را می توان ۲۷/۲ مگاپاسگال اتخاذ نمود) و میانگین مدول الاستیسیته بتن نیز ۲۴۰۰ مگاپاسگال می باشد. بارهای مرده با توجه به وزن تیرها، ستون ها و سقف سازه محاسبه گردیدند و وزن کلی هر طبقه تقریباً برابر با ۱۲۰ کیلونیوتن بوده است. رکورد انتخاب شده، رکورد N21E می باشد که این زلزله در ۲۱ جولای سال ۱۹۵۲ در کالیفرنیا روی داده است [۱۵].

در جدول ۱ فرکانس ۳ مود اول سازه در آزمایش و مدلسازی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود تطابق خوبی بین پاسخ ها وجود دارد.

سیس تحلیل استاتیکی غیر خطی در نرم افزار OpenSees تحت زلزله ی تفت انجام پذیرفت. پاسخ های مربوط به دریافت و جابجایی بدست آمد و با پاسخ های ارائه شده در نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۲ دیده میشود تطبیق خوبی بین پاسخ ها وجود دارد.

۲-۴- شتابنگاشت های مورد استفاده

در این مطالعه، مجموعه‌ی ۷ شتابنگاشت با مشخصات مختلف ثبت شده بر روی نهشته های آبرفتی و خاک نرم (خاک نوع C با سرعت موج برشی بین ۱۸۰ و ۳۶۰ m/s و خاک نوع D با سرعت موج برشی کمتر از ۱۸۰ m/s بر اساس طبقه بندی سایت USGS) گردآوری شده و در آنالیزهای تاریخچه زمانی دینامیکی غیر خطی به کار برده شده اند. کلیه شتابنگاشت های، از زلزله هایی با نزدیک ترین فاصله تا شکست گسل بیش از ۱۵ کیلومتر بدون مشخصات پالس گونه، به دست آمده اند. مشخصات اصلی شتابنگاشت ها در جدول ۳ داده شده است.



شکل ۳: ابعاد و مشخصات سازه مورد آزمایش [۱۴].

جدول ۱: مقایسه فرکانس های مود های مختلف

نرم افزار	آزمایش [۱۴]	مود
۱	۱/۷۸	۱/۸۴
۲	۵/۳۲	۵/۰۸
۳	۷/۸۹	۸/۵۹

جدول ۲: مقایسه دررفت و جابجایی بین مدل آزمایشگاهی [۱۴] و مدلسازی در نرم افزار

طبقه	حداکثر شتاب زمین	ماکزیمم دررفت طبقه (%)		ماکزیمم جابجایی طبقه (mm)	
		آزمایش	نرم افزار	آزمایش	نرم افزار
۷/۷	۷/۶	-۰/۱۸	-۰/۲۳	۳ g	۰/۰۵
۶/۰	۵/۶	-۰/۲۷	-۰/۲۴	۲	
۳/۱	۳/۶	-۰/۲۵	-۰/۲۸	۱	
۳۱/۹	۳۳/۵	-۰/۸۴	-۰/۵۴	۳ g	۰/۲
۲۴/۰	۲۹/۰	۱/۱۸	۱/۰۷	۲	
۱۵/۹	۱۶/۳	۱/۳۰	۱/۳۳	۱	

جدول ۳: مشخصات شتابنگاشت های مورد استفاده در این مطالعه

Number	Earthquake name	Date (yy-mm-dd)	Station	R (Km)	PGA (g)	PGV/PGA (s)	CAV (m/s)	Tp (s)	Tm (s)
1	Chi-Chi, Taiwan,	99-09-20	CHY065	83.43	0.1	0.14	9.88	0.56	0.79
2	Chi-Chi, Taiwan,	99-09-20	TAP095	109.01	0.15	0.18	56.56	0.98	0.84
3	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58224	72.2	0.24	0.15	27.69	0.32	0.86
4	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58472	74.26	0.26	0.16	28.35	0.64	0.85
5	Kobe, Japan,	95-01-16	HIK	95.72	0.14	0.11	45.02	0.6	0.76
6	Manjil, Iran,	90-06-20	Qazvin	49.97	0.13	0.09	59.48	0.16	0.46
7	Kocaeli, Turkey,	99-08-17	Bursa Tofas	60.43	0.1	0.21	100.9	0.68	0.93

۳-۴- مدل سازه فوقانی

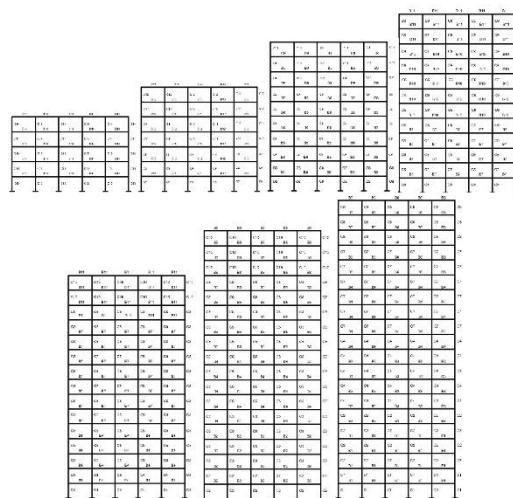
در این بخش قاب های طراحی شده جهت تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی ارائه می گردد. یک گروه قاب بتن مسلح با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط انتخاب شده است. این گروه دارای طبقات ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ طبقه و تعداد ۵ دهانه می باشد. پلان سازه یک پلان متقارن است، که بار قاب های سازه یکسان می باشند. ارتفاع طبقات برابر با ۳/۲ متر، دارای دهانه های ۵ متری هستند. بار مرده سقف طبقات با در نظر گرفتن اثر بار تیغه بندی برابر با ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده با توجه به کاربری اداری برای قاب ها، ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. درصد میرایی نیز ۵٪ در نظر گرفته شده است. در طراحی قاب ها سعی شده است مقاطع بسیار بحرانی باشند تا مقایسه منطقی و قابل تعمیم باشد. در جدول ۴ مقادیر پارامترهای مورد نیاز در طراحی مقطع قاب ها و در جدول ۵ نامگذاری و مقاطع مورد استفاده در طرح تیرها و ستون ها نشان داده شده است. در شکل ۴ مقاطع طرح شده در المان های تیر و ستون نشان داده شده است.

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مورد نیاز در طراحی مقطع قاب‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

مقدار	پارامتر
۰/۳۵	شتاب مینای طرح، منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد
۱	ضریب اهمیت سازه، اداری
۷	ضریب رفتار، قاب خمشی بتنی متوسط
۰/۰۵	ضریب خروج از مرکزیت
تیپ ۳	نوع خاک
۱/۵	S
۰/۵	T _s
۰/۱	T ₀

جدول ۵: معرفی مقاطع مورد استفاده

شماره	Beam		Column	
	آرماتور (mm)	ابعاد (mm)	آرماتور (mm)	ابعاد (mm)
1	12 ϕ 20	700 × 600	28 ϕ 22	600 × 600
2	8 ϕ 20	700 × 600	24 ϕ 22	600 × 600
3	12 ϕ 20	600 × 500	20 ϕ 22	600 × 600
4	8 ϕ 20	600 × 500	24 ϕ 22	550 × 550
5	6 ϕ 20	600 × 500	20 ϕ 22	550 × 550
6	10 ϕ 20	550 × 450	16 ϕ 20	550 × 550
7	8 ϕ 20	550 × 450	24 ϕ 22	500 × 500
8	6 ϕ 20	550 × 450	20 ϕ 20	500 × 500
9	14 ϕ 20	500 × 400	16 ϕ 20	500 × 500
10	12 ϕ 20	500 × 400	20 ϕ 20	450 × 450
11	10 ϕ 20	500 × 400	16 ϕ 20	450 × 450
12	8 ϕ 20	450 × 400	12 ϕ 20	450 × 450
13	8 ϕ 20	400 × 400	16 ϕ 16	450 × 450
14	6 ϕ 20	400 × 400	12 ϕ 16	400 × 400



شکل ۴: مقاطع طرح شده برای المان‌های قاب‌های ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ طبقه.

۵- بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی

در این مطالعه به بررسی شاخص خرابی کرزینگ در المان‌های تیر، ستون، طبقه و در نهایت کل سازه در سطوح شکل‌پذیری ۳، ۴ و ۵ در قاب‌های ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ طبقه در حالات گیرداری کامل، خاک متوسط ($V_s=200$) و خاک سست ($V_s=200$) (طبقه طبقه بندی ATC-40 [۱۶]) پرداخته خواهد شد.

برای بدست آوردن شکل‌پذیری، از شکل‌پذیری کل سازه استفاده می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (6)$$

که در آن δ_m و δ_y به ترتیب تغییرمکان‌های بیشینه بام حاصل از زلزله و تغییرمکان تسلیم می‌باشد.

از تحلیل استاتیکی غیر خطی شکل‌پذیری قاب‌ها حدوداً ۲/۴ تا ۲/۶ بدست می‌آید. در این مطالعه شکل‌پذیری‌های هدف ۳، ۴ و ۵ انتخاب شدند تا قاب‌ها در عضوهای تیر و ستون و همچنین در طبقات مختلف دچار خرابی گردند تا بتوان تخمین بهتری از اثر اندرکنش خاک و سازه روی خرابی در قاب‌ها داشت.

افزایش ارتفاع و بازدهی روزافزون سازه‌های ساختمانی بلند، باعث شده است که کنترل عوامل موثر بر کاهش پایداری سازه، یکی از موارد قابل توجه در مراحل طراحی گردد. یکی از پارامترهای مهم در طرح چنین سازه‌هایی، اثر بار محوری یا به بیان دیگر اثر P- Δ می‌باشد. اثر P- Δ بنا به تعریف، اثر متقابل بار محوری و تغییر مکان جانبی بر یکدیگر می‌باشد. این اثرات به دلیل ایجاد کاهش در سختی جانبی سیستم، نقش مهمی در کنترل پایداری سازه‌ها دارند. جهت اعمال اثر P- Δ در تحلیل سازه‌ها، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. هر یک از این روش‌ها شیوه خاصی را برای دخالت دادن اثر P- Δ دنبال می‌کنند. در این پژوهش به منظور در نظر گرفتن اثر P- Δ ، در نرم افزار OpenSees در قسمت تعریف المان‌ها اثر P- Δ وارد تحلیل سازه‌ها شده است.

شاخص خرابی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس انرژی می‌باشد و انرژی بدست آمده از مساحت زیر نمودار ممان- دوران می‌باشد. از طرفی نیز اثر P- Δ بر روی چرخش گره‌ها تاثیر گذار می‌باشد. هر چند این چرخش در طبقات ابتدایی ناچیز و در سازه‌های بلند و طبقات انتهایی مقدار بیشتری می‌باشد [۱۷]. این مسئله نشان می‌دهد که اثر P- Δ می‌تواند در سازه‌های بلند در تخمین خرابی تاثیر گذار باشد. در این مطالعه به صورت جداگانه به بررسی اثر P- Δ پرداخته نشده است ولی اثر آن در تحلیل‌ها آورده شده است.

۵-۱- تشریح روش کار

به منظور بررسی دقیق‌تر سازه‌های ۷، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ طبقه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند و پاسخ‌های مربوط به آنها در گراف‌ها و نتایج انتهایی وارد گردیده است. شاخص‌های ارائه شده حاصل از میانگین‌گیری ۷ شتابنگاشت که در جدول ۳ آمده است، می‌باشند. ابتدا شاخص خرابی برای المان‌های تیر و ستون محاسبه می‌شود. برای این منظور خرابی در نقاط انتگرال‌گیری در هر المان بدست آورده می‌شود و مقدار ماکزیمم این خرابی به عنوان خرابی المان مورد نظر ارائه می‌گردد. به منظور رسم نمودارهای مربوط به خرابی تیر و ستون، بیشترین خرابی این اعضا در هر طبقه به عنوان خرابی این المان معرفی شده است. به منظور بدست آوردن شاخص خرابی طبقه و در نهایت کل سازه، از میانگین‌گیری وزنی استفاده شده است. در این مطالعه قابها با توجه به پاسخی که ارائه دادند به سه دسته تقسیم شده‌اند. قابهای ۵ و ۷ طبقه با توجه به پاسخ تقریباً مشابه، بعنوان قابهای کوتاه مرتبه و دارای لاغری کم، قابهای ۱۰ و ۱۲ طبقه بعنوان قابهای میان مرتبه و دارای لاغری متوسط و قابهای ۱۵، ۱۸ و ۲۰ طبقه بعنوان قابهای بلند مرتبه و دارای لاغری زیاد معرفی گردیده‌اند.

شکل ۵ تا ۸ مقدار شاخص خرابی کرزینگ را در المان‌های تیر، ستون و طبقه در سطوح شکل‌پذیری ۳، ۴ و ۵ در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در حالات گیرداری کامل، خاک متوسط ($V_s=200$) و خاک سست ($V_s=100$) نشان می‌دهد. در نمودار مربوط به error،

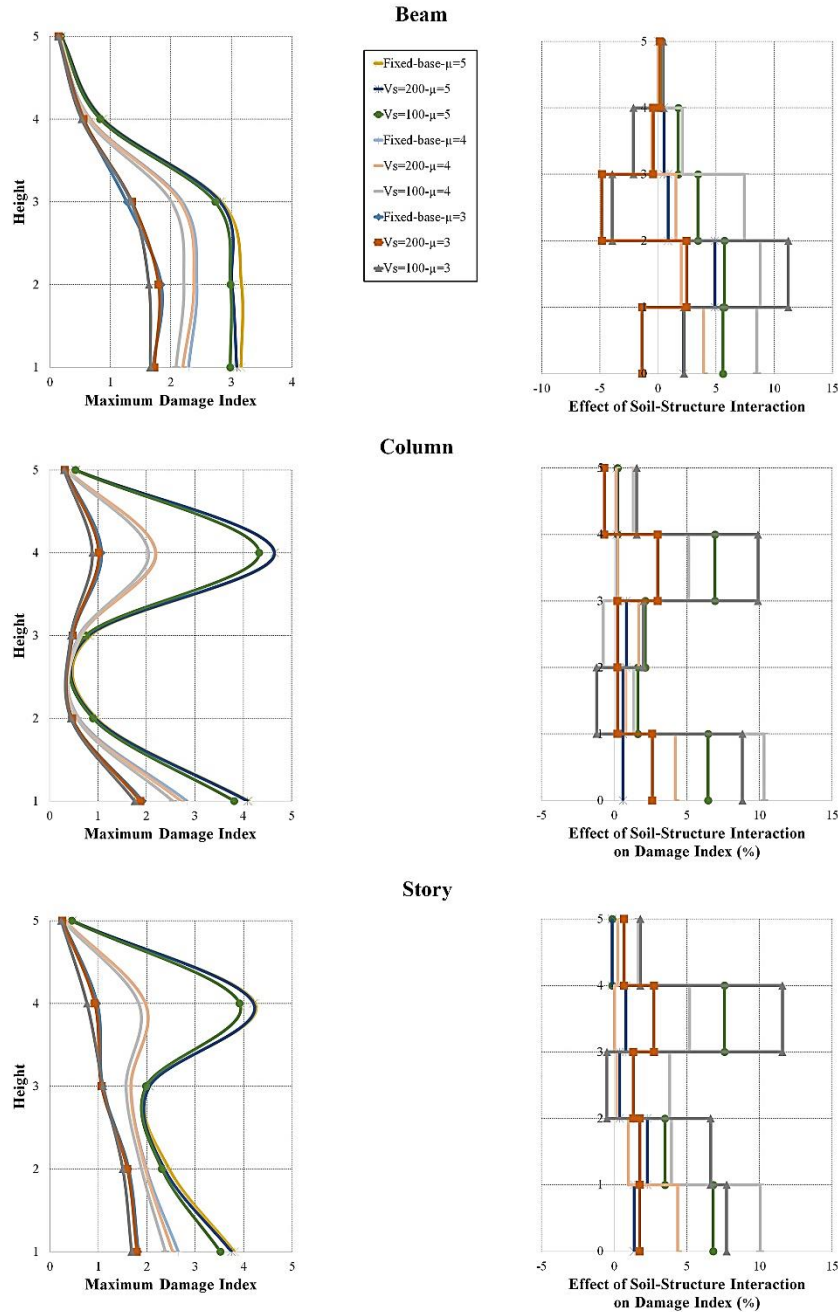
جهت مثبت نشان دهنده ی کاهش و جهت منفی نشان دهنده ی افزایش شاخص خرابی تحت اثر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت صلب می باشد.

همانطور که در شکل ۵ تا ۷ مشاهده می شود اندرکنش خاک و سازه در قاب های کوتاه مرتبه در اکثر مواقع باعث کاهش شاخص خرابی کرزینگ می گردد، به طوری که در قاب ۵ طبقه، بیشترین مقدار کاهش شاخص خرابی کرزینگ در اثر اندرکنش خاک سازه در خاک سست ($V_s=100$) و در شکل پذیری ۳ می باشد که در المان تیر، در طبقه ی ۲ به میزان ۱۱ درصد، در المان ستون در طبقه ۱ به میزان ۱۰ درصد و در معیار طبقه در طبقه ۴ به میزان ۱۲ درصد می باشد. در طبقاتی نیز افزایش شاخص خرابی مشاهده می گردد که بیشترین مقدار این افزایش در المان تیر، ستون و معیار طبقه نزدیک به ۵ درصد می باشد، که عدد کمتری در مقابل کاهش خرابی دارد. اندرکنش خاک و سازه در قاب های میان مرتبه در شکل پذیری های کم نیز در بسیاری از مواقع باعث کاهش شاخص خرابی کرزینگ می گردد. برای مثال بیشترین کاهش شاخص خرابی در خاک سست ($V_s=100$) در شکل پذیری ۳ که کمترین شکل پذیری بررسی شده در این مطالعه می باشد، در قاب ۱۰ طبقه در المان تیر در طبقه ۳ به میزان ۲۷ درصد، در المان ستون در طبقه ی ۱ به میزان ۱۶ درصد و در معیار طبقه در طبقه ۳ به میزان ۲۶ درصد می باشد و هیچ افزایشی در خرابی دیده نمی شود. با افزایش شکل پذیری در قاب های میان مرتبه در طبقات پایین اندرکنش خاک و سازه در اکثر مواقع باعث کاهش شاخص خرابی کرزینگ می گردد ولی در طبقات بالا با افزایش شکل پذیری در قاب های میان مرتبه اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش شاخص خرابی کرزینگ می گردد. برای مثال در قاب ۱۰ طبقه در شکل پذیری ۵ که بیشترین شکل پذیری مورد بررسی در این مطالعه می باشد، اندرکنش خاک و سازه در خاک سست ($V_s=100$) در المان تیر در طبقه ۷ به میزان ۲ درصد، المان ستون در طبقه ی ۸ به میزان ۶ درصد و در معیار طبقه در طبقه ۸ به میزان ۵ درصد باعث افزایش شاخص خرابی کرزینگ می شود. اندرکنش خاک و سازه در قاب های بلند مرتبه مثل قاب های ۱۵ و ۲۰ طبقه در تمام شکل پذیری ها و در اکثر موارد در طبقات بالا موجب افزایش شاخص خرابی کرزینگ می شود ولی همچنان در طبقات پایین شاخص خرابی مورد بررسی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در بسیاری از موارد کاهش می یابد. به طور مثال در قاب ۲۰ طبقه بیشترین افزایش خرابی المان تیر در طبقه ۱۴ به میزان ۱۲ درصد، در المان ستون در طبقه ۱۸ به میزان ۵ درصد و در معیار طبقه در طبقه ۱۵ به میزان ۱۱ درصد و بیشترین کاهش مقدار شاخص خرابی کرزینگ در المان تیر در طبقه ۱۰ به میزان ۲۷ درصد، در المان ستون در طبقه ی ۱ به میزان ۱۹ درصد و در معیار طبقه در طبقه ی ۱۰ به میزان ۲۹ درصد می باشد. هر چند در مواردی اندک در طبقات بالایی کاهش شاخص خرابی مشاهده می گردد، که بیشترین مقدار این کاهش در المان تیر، ستون و معیار طبقه به میزان ۲/۷ درصد می باشد که عدد بسیار ناچیزی در مقابل افزایش خرابی در طبقات بالایی دارا می باشد.

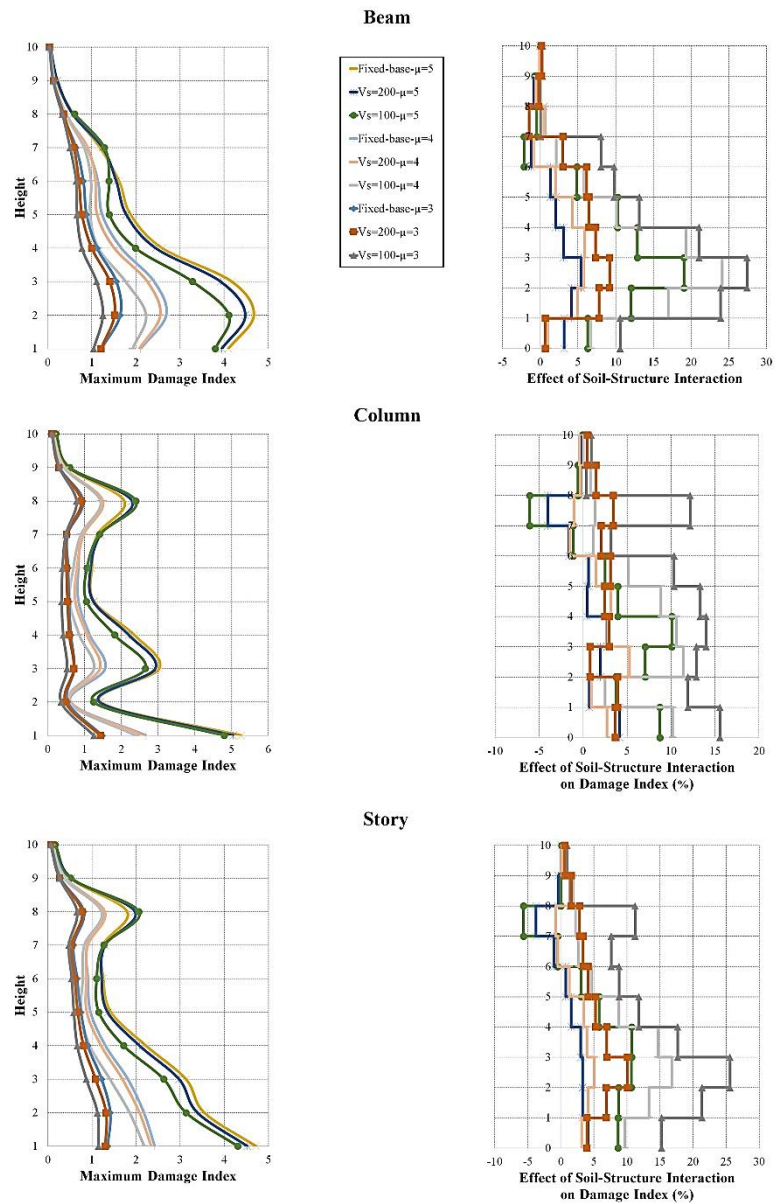
با توجه به اشکال ۵ تا ۸ شاخص خرابی معیار طبقه (این شاخص از میانگین گیری وزنی المان های تیر و ستون حاصل می گردد) دیده می شود، در خاک سست و در قاب های مورد بررسی، افزایش شکل پذیری موجب کاهش اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی می گردد. برای مثال مجموع قدر مطلق اثرات اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی در شکل پذیری هدف ۳، در معیار طبقه و در خاک سست در قاب ۲۰ طبقه این عدد در شکل پذیری ۳، ۱۰۲ درصد و با کاهشی ۳۴ درصدی در شکل پذیری ۵، ۶۸ درصد می رسد.

در شاخص خرابی کرزینگ که شاخصی تجمعی انرژی می باشد، اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی المان تیر بیشتر از ستون می باشد و با افزایش ارتفاع قاب ها این اثر در المان تیر مقادیر بالاتری نیز به خود می گیرد. برای مثال در قاب ۵ طبقه اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی در المان تیر و ستون نزدیک هم می باشد ولی با افزایش ارتفاع قاب ها به مرور این اثر روی المان تیر نسبت به المان ستون افزایش می یابد، به صورتی که مجموع قدر مطلق اثرات اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی در تمامی شکل پذیری های هدف و خاک سست در قاب ۵ طبقه در المان تیر ۲۵ درصد می باشد در حالی که این مقدار در ستون برابر ۱۶ درصد است ولی با افزایش ارتفاع (افزایش لاغری قاب) در قاب ۲۰ طبقه این مقدار در تیر به عدد مجموع ۲۲۴ درصد و در ستون به ۹۱ درصد می رسد. با افزایش شکل پذیری، شاخص خرابی کرزینگ در المان های تیر، ستون و معیار طبقه و در هر ۳ حالت مربوط به خاک ($V_s=200$, Fixed-base) و $V_s=100$ افزایش می یابد. برای مثال در قاب ۲۰ طبقه در حالت گیرداری کامل، در المان تیر و در شکل پذیری ۵ بیشترین خرابی حدوداً برابر ۱۰ می باشد که این مقدار در شکل پذیری ۴ به ۶/۶ و در شکل پذیری ۳ به عدد ۰/۷۲ می رسد. در خرابی المان ستون نیز، در حالت گیرداری کامل و در شکل پذیری ۵ بیشترین خرابی حدوداً برابر ۴ می باشد در شکل پذیری ۴ به ۲/۵۴ و در شکل پذیری ۳ به ۳/۳۴ می رسد.

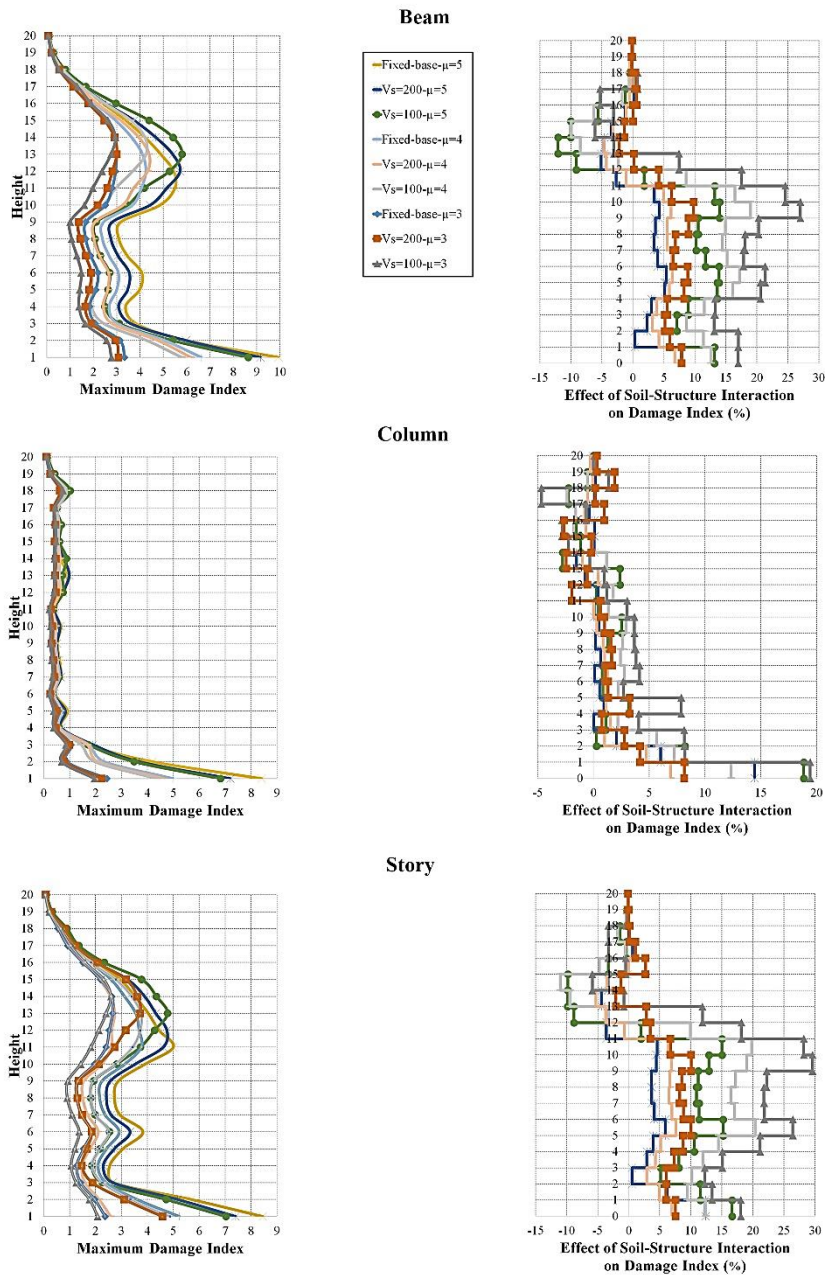
با توجه به اینکه در المان‌های تیر و ستون در شکل ۵ تا ۸ نیز دیده شد، در مجموع اندرکنش خاک و سازه اثر کاهشی بیشتری بر روی شاخص‌های خرابی دارا می‌باشد که این موضوع در ۸ نیز دیده می‌شود، به صورتی که در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در اکثر مواقع باعث کاهش شاخص خرابی در معیار خرابی کلی قاب‌ها می‌گردد.



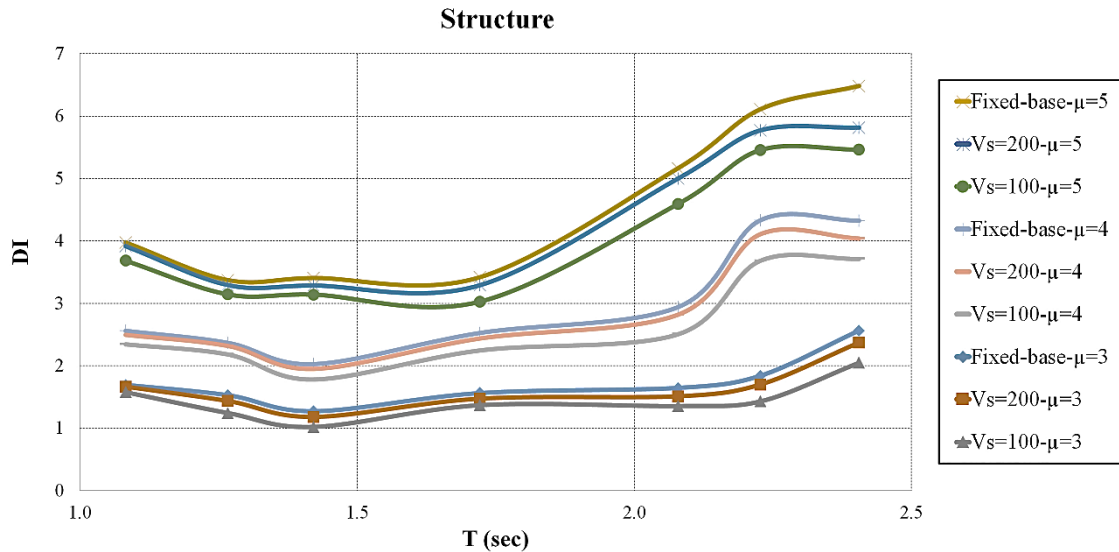
شکل ۵: مقایسه شاخص خرابی کرزینگ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در خاک‌های متوسط ($V_s=200$) و سست ($V_s=100$) در سطوح شکل‌پذیری هدف ۳، ۴ و ۵ در معیار تیر، ستون و طبقه قاب ۵ طبقه.



شکل ۶: مقایسه شاخص خرابی کرزینگ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در خاک‌های متوسط ($V_s=200$) و سست ($V_s=100$) در سطوح شکل‌پذیری هدف ۳، ۴ و ۵ در معیار تیر، ستون و طبقه قاب ۱۰ طبقه.



شکل ۷: مقایسه شاخص خرابی کرزینگ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در خاک‌های متوسط ($V_s=200$) و سست ($V_s=100$) در سطوح شکل‌پذیری هدف ۳، ۴ و ۵ در معیار تیر، ستون و طبقه قاب ۲۰ طبقه.



شکل ۸: مقایسه شاخص خرابی سینماتیکی و انگ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در خاک‌های متوسط ($V_s=200$) و سست ($V_s=100$) در سطوح شکل‌پذیری هدف ۳، ۴ و ۵ در معیار کلی سازه در قایبهای ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۰ طبقه.

۶- نتیجه گیری

- به طور کلی در این مطالعه به شاخص خرابی کرزینگ که بر اساس انرژی می باشد، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در دو نوع خاک متوسط ($V_s=200$) و سست ($V_s=100$) در حالات مختلف شکل‌پذیری پرداخته شده است.
- با افزایش ارتفاع قاب‌ها اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی کرزینگ افزایش می یابد، و یا به عبارتی با افزایش لاغری اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص‌های خرابی افزایش خواهد یافت.
- عدم در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه‌ها در سازه‌های کوتاه مرتبه در تمام شکل‌پذیری‌ها و سازه‌های میان مرتبه در شکل‌پذیری‌های کم که دارای لاغری کم و متوسط می باشند، می تواند در جهت اطمینان باشد ولی در سازه‌های میان مرتبه (لاغری متوسط) با شکل‌پذیری بالا و بلند مرتبه (لاغری زیاد) باید اثر اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه‌ها، به خصوص اثر آن در طبقات فوقانی دیده شود.
- در شاخص خرابی کرزینگ که شاخصی تجمعی بر مبنای انرژی می باشد اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی در تمامی قاب‌ها در المان تیر بیشتر از المان ستون می باشد.
- در خاک متوسط که دارای سرعت موج برشی $200 \frac{m}{s}$ می باشد، در اکثر موارد پاسخ‌ها به حالت صلب بسیار نزدیک می باشند. این موضوع نشان می دهد اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص‌های خرابی در خاک سست دارای اهمیت بیشتری می باشد.
- شاخص خرابی کلی سازه، در تمامی شاخص‌های خرابی تحت اثر اندرکنش خاک و سازه با کاهش خرابی روبرو می شود.

مراجع

- [1]Altoontash, A.; "Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints". 2004, Stanford University.
- [2]Ganjavi, B. and H. Hao.; "A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects". Engineering Structures, 2012. 43: p. 88-104.
- [3]Smith-Pardo, J.P.; "Design aids for simplified nonlinear soil-structure interaction analyses". Engineering structures, 2012. 34: p. 572-580.
- [4]Jeremić, B., S. Kunnath, and F. Xiong.; "Influence of soil-foundation-structure interaction on seismic response of the I-880 viaduct". Engineering Structures, 2004. 26(3): p. 391-402.
- [5]Ganjavi, B. and H. Hao.; "Elastic and inelastic response of single-and multi-degree-of-freedom systems considering soil structure interaction effects". in Australian Earthquake Engineering Society Conference. 2011.
- [6]Barcena, A. and L. Esteva.; "Influence of dynamic soil-structure interaction on the nonlinear response and seismic reliability of multistorey systems". Earthquake engineering & structural dynamics, 2007. 36(3): p. 327-346.
- [7]Chouw, N. and H. Hao.; "Significance of SSI and nonuniform near-fault ground motions in bridge response I: Effect on response with conventional expansion joint". Engineering Structures, 2008. 30(1): p. 141-153.
- [8]Chouw, N. and H. Hao.; "Significance of SSI and non-uniform near-fault ground motions in bridge response II: Effect on response with modular expansion joint". Engineering Structures, 2008. 30: p. 154-162.
- [9]Raychowdhury, P.; "Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI)". Engineering Structures, 2011. 33(3): p. 958-967.
- [10]Tang, Y. and J. Zhang.; "Probabilistic seismic demand analysis of a slender RC shear wall considering soil-structure interaction effects". Engineering Structures, 2011. 33(1): p. 218-229.
- [11]Nakhaei, M. and M.A. Ghannad.; "The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings". Engineering Structures, 2008. 30(6): p. 1491-1499.
- [12]Wolf, J.P.; "Foundation vibration analysis using simple physical models". 1994: Pearson Education.
- [13]Ganjavi, B. and H. Hao.; "Optimum lateral load pattern for seismic design of elastic shear-buildings incorporating soil-structure interaction effects". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013. 42(6): p. 913-933.
- [14]Bracci, J.M., A.M. Reinhorn, and J.B. Mander.; "Seismic retrofit of reinforced concrete buildings designed for gravity loads: performance of structural model". ACI Structural Journal, 1995. 92.
- [15]Bracci, J.M.; "Experimental and analytical study of seismic damage and retrofit of lightly reinforced concrete structures in low seismicity zones". 1992, State University of New York at Buffalo.
- [16]ATC, A., 40.; "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council", report ATC-40. Redwood City, 1996.

[۱۷] هاشمی، حسینی، خانلری، «تر P-Δ در تحلیل دینامیکی سازه ها "تحلیل مرتبه دوم سازه ها تحت بارهای دینامیکی"»؛ پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال ۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۸۰.