

تحقیق در مورد اثر تغییر زاویه المان‌های مورب بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های دیاگرید فولادی با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی

پدرام برزگر

خلاصه

سازه‌های دیاگرید با استفاده از المان‌های مورب شبکه‌ای، سیستمی کارآمد برای افزایش سختی و مقاومت جانبی ساختمان‌های بلندمرتبه در برابر بارهای لرزه‌ای هستند. این پژوهش به بررسی اثر تغییر زاویه المان‌های مورب بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های دیاگرید فولادی با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) پرداخته است. هدف این مطالعه، تحلیل تأثیر زوایای مختلف بر تنش‌ها، سختی، شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و دررفت طبقات است. پنج مدل با زوایای ۵۴، ۶۹، ۷۵، ۷۸ و ۸۱ درجه در یک ساختمان ۲۴ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳.۴ متر طراحی و با نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شدند. نتایج نشان داد که زاویه ۶۹ درجه با برش پایه نهایی ۵۴۸۴۶ کیلونیوتن، بالاترین مقاومت را دارد، در حالی که افزایش زاویه، تنش‌های نرمال و تعداد مفاصل پلاستیک را افزایش می‌دهد و زوایای کمتر، دررفت یکنواخت‌تری ایجاد می‌کنند. این یافته‌ها پتانسیل بالای سیستم دیاگرید را تأیید کرده و بر اهمیت انتخاب زاویه بهینه در طراحی لرزه‌ای تأکید دارد.

کلمات کلیدی: سازه دیاگرید، تحلیل استاتیکی غیرخطی، زاویه المان مورب، عملکرد لرزه‌ای، ساختمان بلندمرتبه، سختی الاستیک، شکل‌پذیری، دررفت طبقات

۱. مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و نیاز به استفاده بهینه از فضای محدود، باعث افزایش تقاضا برای ساختمان‌های بلندمرتبه شده است. این سازه‌ها تحت بارهای جانبی مانند زلزله و باد قرار دارند و به سیستم‌های باربر جانبی کارآمد نیاز دارند [1]. سیستم‌های دیاگرید، که از المان‌های مورب به صورت شبکه‌ای در نمای خارجی استفاده می‌کنند، به دلیل سختی بالا، شکل‌پذیری مناسب و انعطاف‌پذیری معماری، به عنوان جایگزینی نوین برای سیستم‌های سنتی مانند قاب‌های خمشی یا مهاربندی همگرا مطرح شده‌اند [2]. زاویه المان‌های مورب در این سیستم‌ها، پارامتری کلیدی است که می‌تواند بر توزیع نیروها، تنش‌ها و رفتار غیرخطی سازه تأثیر بگذارد [3]. تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) روشی است که با اعمال جابجایی هدف، امکان بررسی رفتار سازه در ناحیه غیرخطی، تشکیل مفاصل پلاستیک و ظرفیت نهایی را فراهم می‌کند. این روش به دلیل سادگی نسبی و دقت قابل قبول، در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مانند نشریه ۳۶۰ و FEMA356 توصیه شده است [4]. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر تغییر زاویه المان‌های

مورب بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های دیاگراید فولادی است. پنج مدل با زوایای مختلف طراحی و تحلیل شدند تا الگوهای تنش، سختی، شکل‌پذیری و دررفت طبقات ارزیابی شوند. نتایج این مطالعه می‌تواند به مهندسان در طراحی بهینه سازه‌های بلندمرتبه در مناطق لرزه‌خیز کمک کند و راهنمایی برای انتخاب زاویه مناسب ارائه دهد. در ادامه، ابتدا روش تحقیق تشریح شده و سپس نتایج و بحث ارائه می‌شود.

۲. روش تحقیق

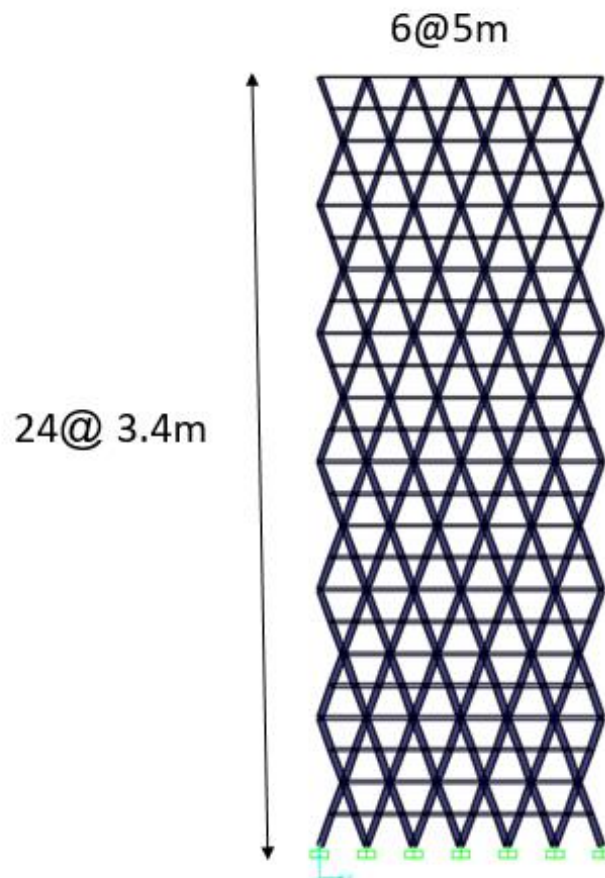
۲.۱ مشخصات سازه و مدل‌سازی

این مطالعه روی یک ساختمان ۲۴ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳.۴ متر (ارتفاع کل ۸۱.۶ متر) انجام شد. سیستم باربر جانبی شامل دیاگراید خارجی و قاب‌های داخلی با اتصالات گیردار است. مصالح از فولاد S235JR (ST37) انتخاب شدند [5] که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- مشخصات مصالح فولادی

واحد	مقدار	پارامتر
kg/cm^2	2.1×10^6	مدول الاستیسیته
kg/cm^2	۲۴۰۰	تنش تسلیم
kg/cm^2	۳۷۰۰	مقاومت نهایی
-	۰.۳	ضریب پواسون
kg/cm^2	۲۸۸۰	تنش تسلیم مورد انتظار

پنج مدل با زوایای المان‌های مورب ۵۴°، ۶۹°، ۷۵°، ۷۸° و ۸۱° طراحی شدند. این زوایا بر اساس تقسیم‌بندی المان‌ها در طبقات مختلف (۱ تا ۵ طبقه) تعیین شدند. به عنوان مثال، زاویه ۵۴° برای المان‌هایی است که در یک طبقه (۳.۴ متر) به هم می‌رسند و زاویه ۸۱° برای المان‌هایی که در پنج طبقه (۱۷ متر) الگوهای مثلثی تشکیل می‌دهند (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک سازه دیاگراید با زوایای مختلف

بارگذاری سازه بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و نشریه ۳۶۰ انجام شد. [6] بارهای ثقلی شامل بار مرده (QD 550) کیلوگرم بر متر

مربع و بار زنده (QL 200) کیلوگرم بر متر مربع بود. ترکیب بارها به صورت زیر اعمال شد.

$$Q_G = 1.1[Q_L + Q_D]$$

$$Q_G = 0.9Q_L$$

۲.۲ تحلیل استاتیکی غیرخطی

تحلیل پوش‌آور با نرم‌افزار SAP2000 انجام شد. مراحل تحلیل به شرح زیر است:

۱. تعیین نقطه کنترل: بام سازه به عنوان نقطه کنترل انتخاب شد، مطابق با نشریه ۳۶۰.
۲. محاسبه جابجایی هدف: جابجایی هدف اولیه بر اساس ASCE 7-16 (1.5% ارتفاع کل، معادل ۱.۲۲۴ متر) تعیین شد و با روش ضرایب نشریه ۳۶۰ به ۱.۱۸ متر اصلاح شد. رابطه زیر استفاده شد:

$$\Delta_t = c_0 \times c_1 \times c_2 \times c_3 \times S_a \times \frac{t_e^2}{4\pi^2} g$$

که در آن c_0 ضریب تبدیل سیستم تک درجه آزادی به چنددرجه آزادی

c_1 ضریب تبدیل جابجایی خطی به غیرخطی

c_2 اثر زوال سختی

c_3 اثر P-Delta

S_a شبه‌شتاب $0.4g$

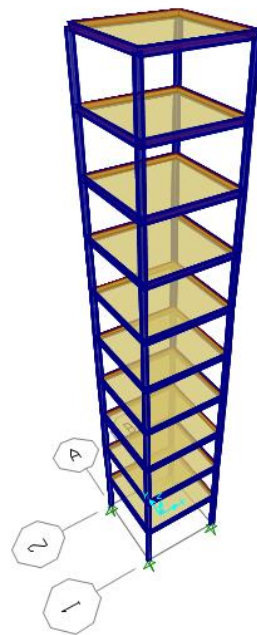
t_e دوره تناوب (۱.۲ ثانیه)

g شتاب گرانش 9.81 m/s^2 است.

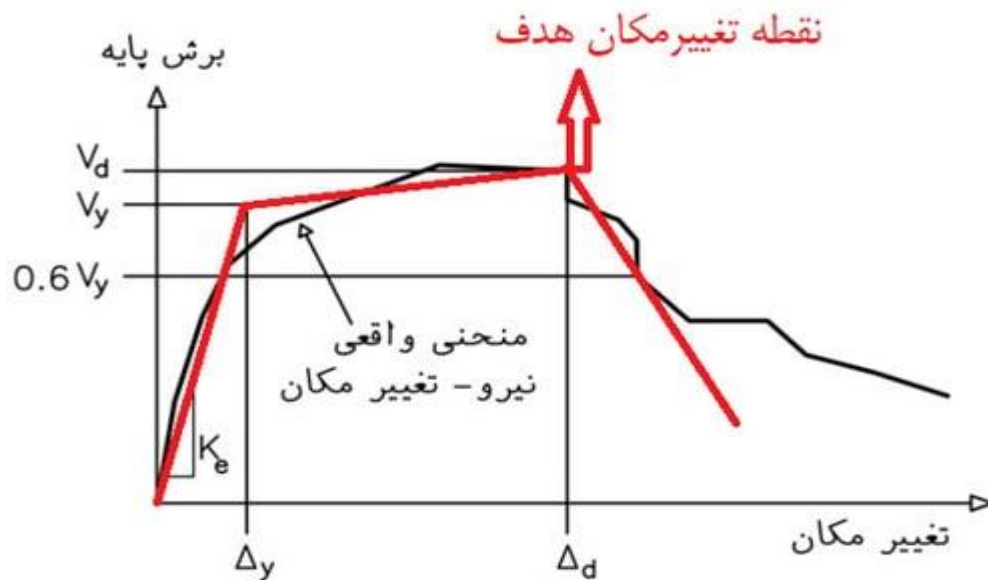
۳. اعمال الگوی بار: دو الگوی بار جانبی (مثلثی متناسب با مود اول و یکنواخت بر اساس وزن طبقات) اعمال شدند [7] (شکل ۲).

۴. مدل‌سازی رفتار غیرخطی: مفاصل پلاستیک در انتهای تیرها، ستون‌ها و میانه المان‌های مورب تعریف شدند. رفتار غیرخطی با نمودار

پنج‌خطی بر اساس FEMA356 مدل‌سازی شد (شکل ۳).



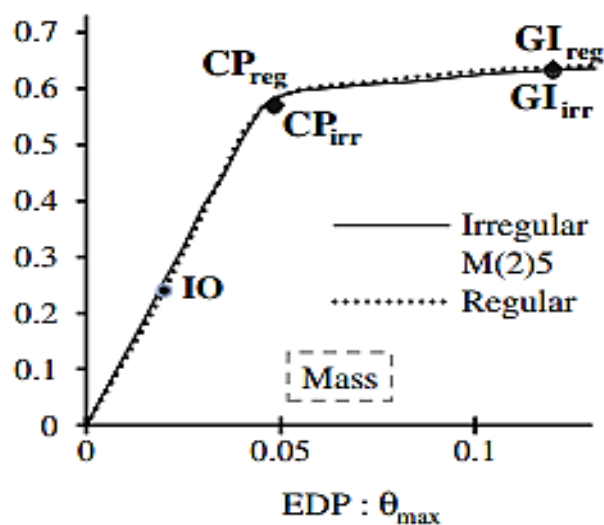
شکل ۲- الگوهای بار مثلثی و یکنواخت



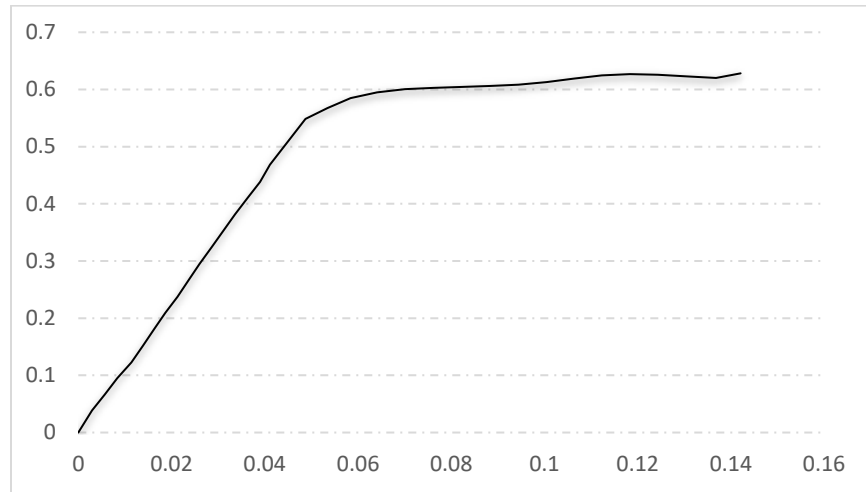
شکل ۳- نمودار رفتار غیر خطی مفصل پلاستیک

۲.۳ معیارهای ارزیابی و اعتبارسنجی

معیارهای ارزیابی شامل برش پایه تسلیم V_y ، برش پایه نهایی V_u ، سختی الاستیک، $K = V_y / \Delta_y$ ، نسبت شکل پذیری $m_u = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$ ضریب اضافه مقاومت $\delta = \frac{v_y}{v_s}$ و دریفت طبقات بودند. برای اعتبارسنجی، مدل با مقاله پیرزاده و همکاران [8] مقایسه شد و تطابق بالایی در منحنی‌های ظرفیت نشان داد (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴- منحنی ظرفیت از مقاله مرجع

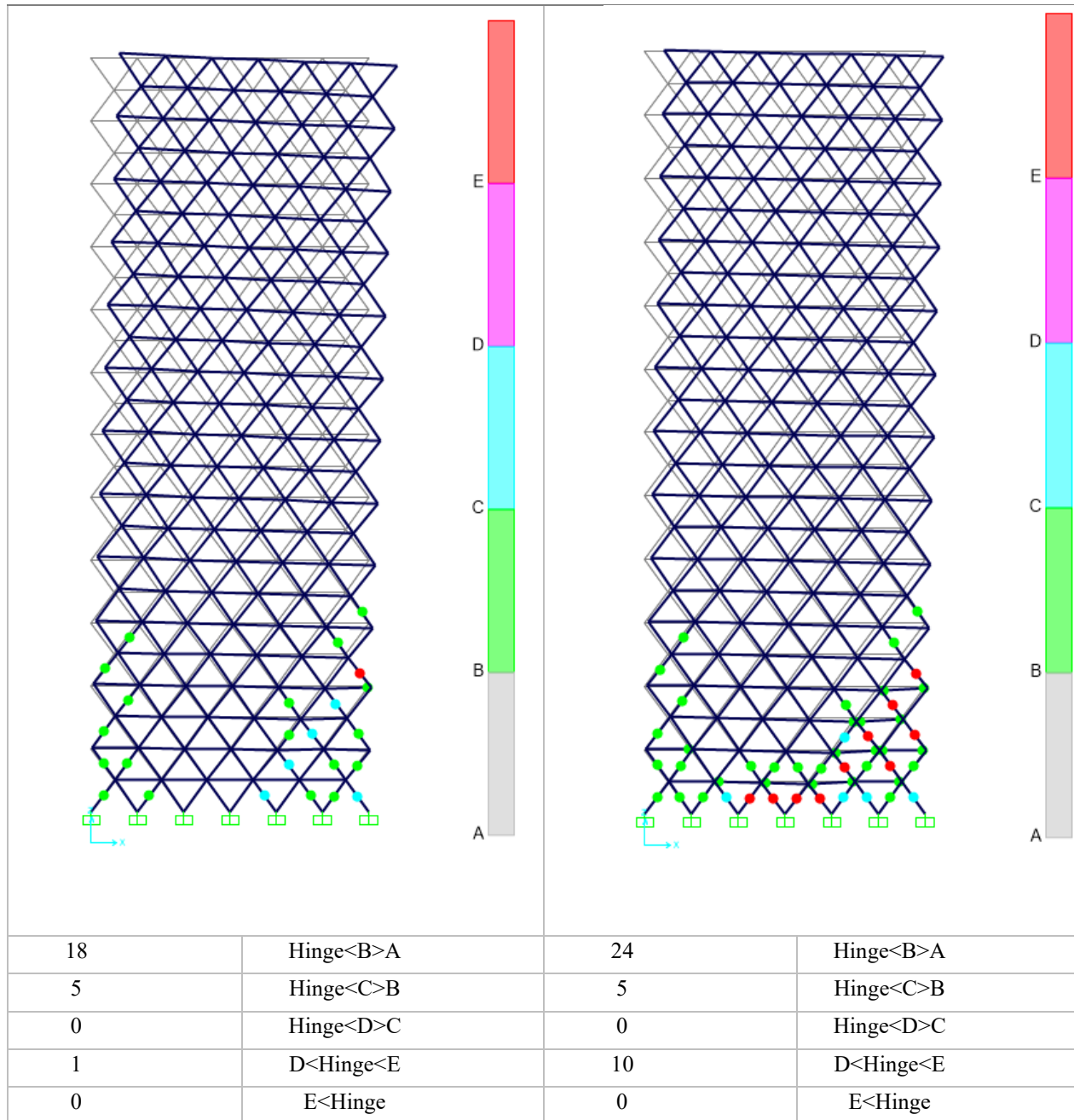


شکل ۵- منحنی ظرفیت استخراج شده از SAP2000

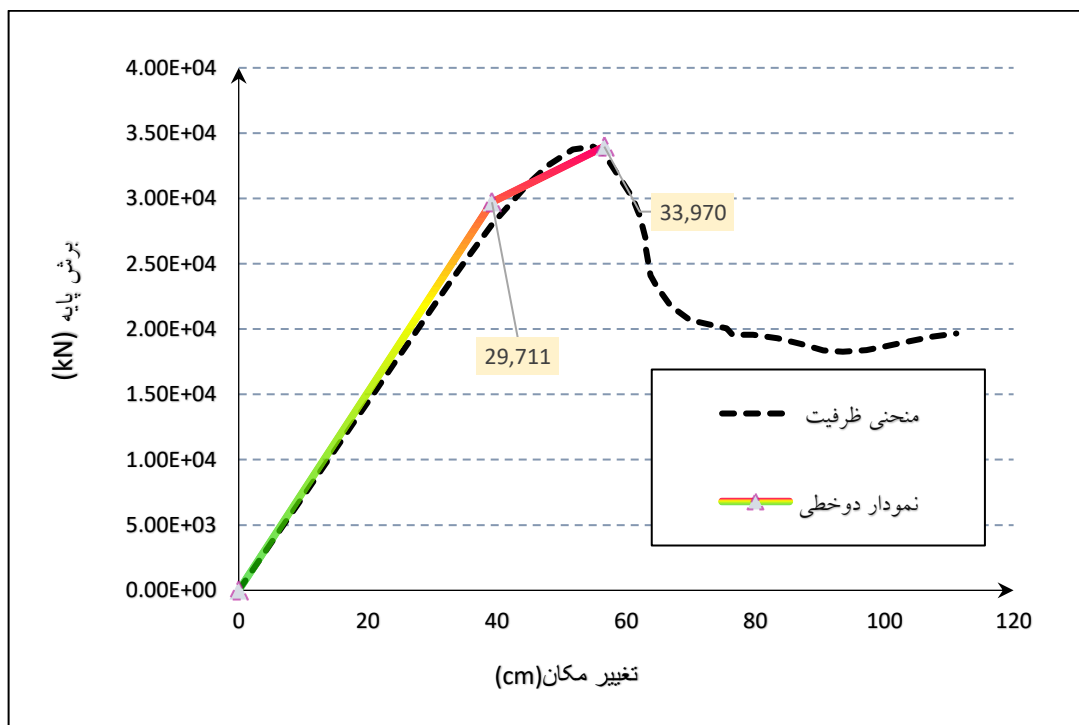
۳. نتایج

۳.۱ مدل D-54 (زاویه ۵۴ درجه)

المان‌های مورب در یک طبقه به هم می‌رسند. مفاصل پلاستیک ابتدا در نواحی فشاری طبقات پایین و سپس در نواحی کششی شکل گرفتند. تعداد مفاصل ۳۹ عدد بود که ۱۰ مفصل فراتر از ناحیه E (انهدام) قرار داشتند (شکل ۶). برش پایه تسلیم ۲۹۷۱۱ کیلونیوتن، برش پایه نهایی ۳۳۹۷۰ کیلونیوتن، سختی ۷۱۴ کیلونیوتن بر سانتی‌متر، شکل پذیری ۱.۴۴ و اضافه مقاومت ۱.۲۱ بود (شکل ۷). حداکثر دریفت ۰.۰۱۵ در طبقه ۱۸ بود.



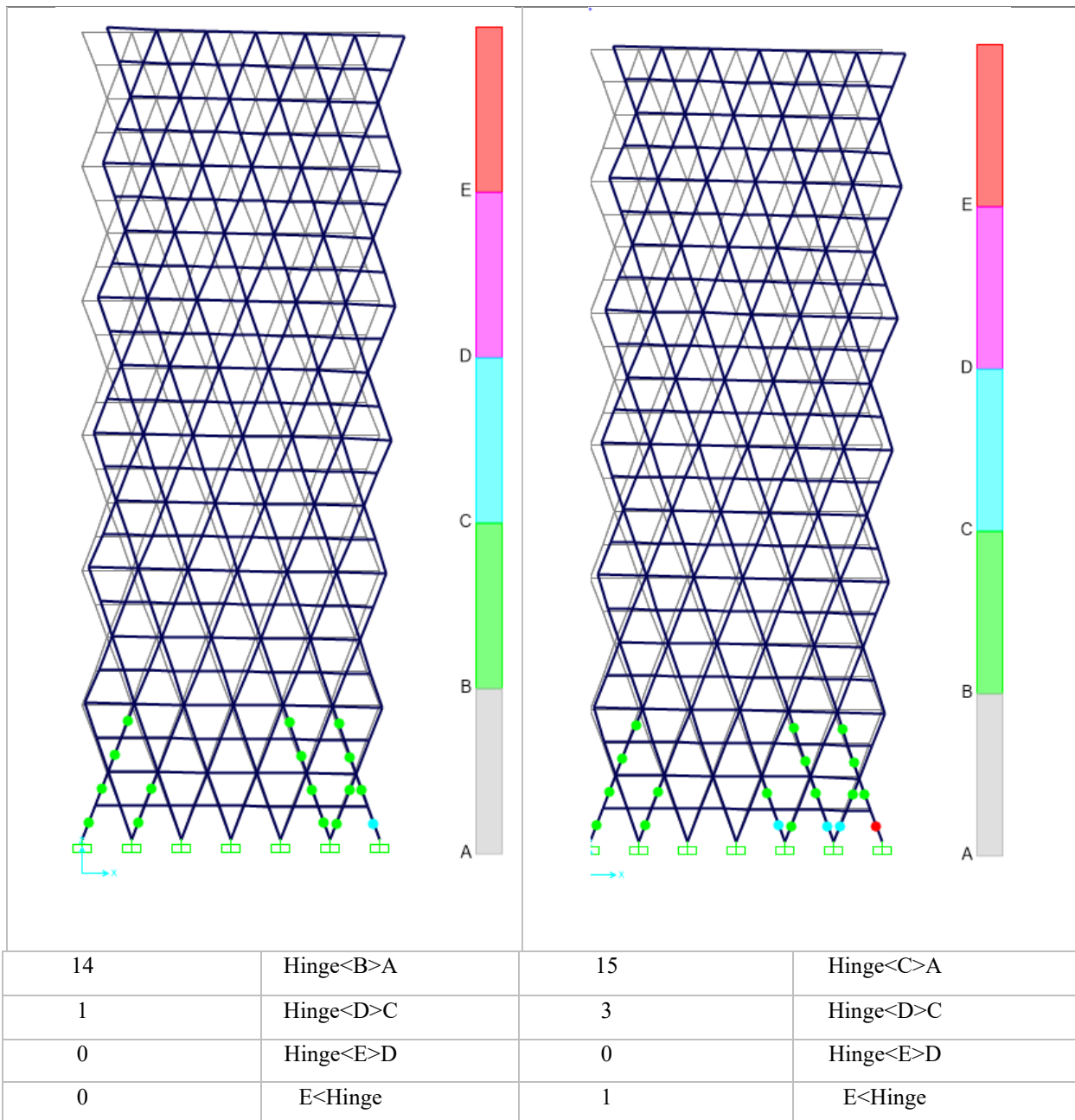
شکل ۶- توزیع مفاصل پلاستیک در مدل D-54



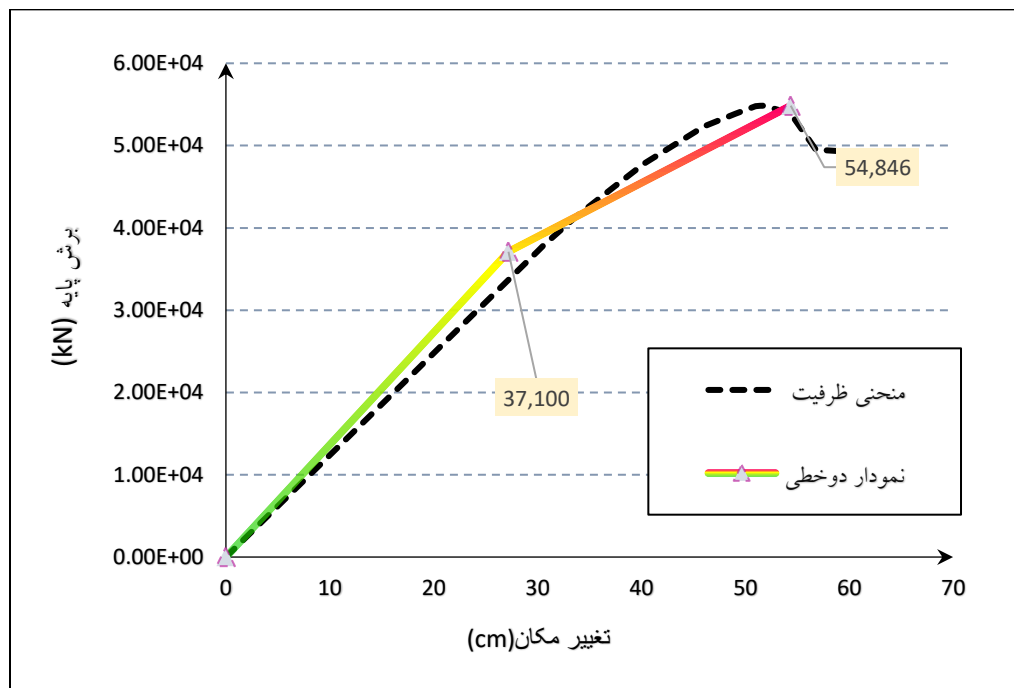
شکل ۷- منحنی ظرفیت مدل D-54

۳.۲ مدل D-69 (زاویه ۶۹ درجه)

المان‌ها در دو طبقه به هم می‌رسند. مفاصل ابتدا در طبقات تحتانی فشاری و سپس در طبقات میانی و کششی شکل گرفتند. تعداد مفاصل ۳۳ عدد بود که ۱ مفصل فراتر از E بود (شکل ۸). برش پایه تسلیم ۳۷۱۰۰ کیلونیوتن، برش پایه نهایی ۵۴۸۴۶ کیلونیوتن، سختی ۱۱۵۱ کیلونیوتن بر سانتی‌متر، شکل‌پذیری ۱.۸۰ و اضافه مقاومت ۱.۵۶ بود (شکل ۹). حداکثر دررفت ۰.۰۱۲ در طبقه ۲۰ بود.



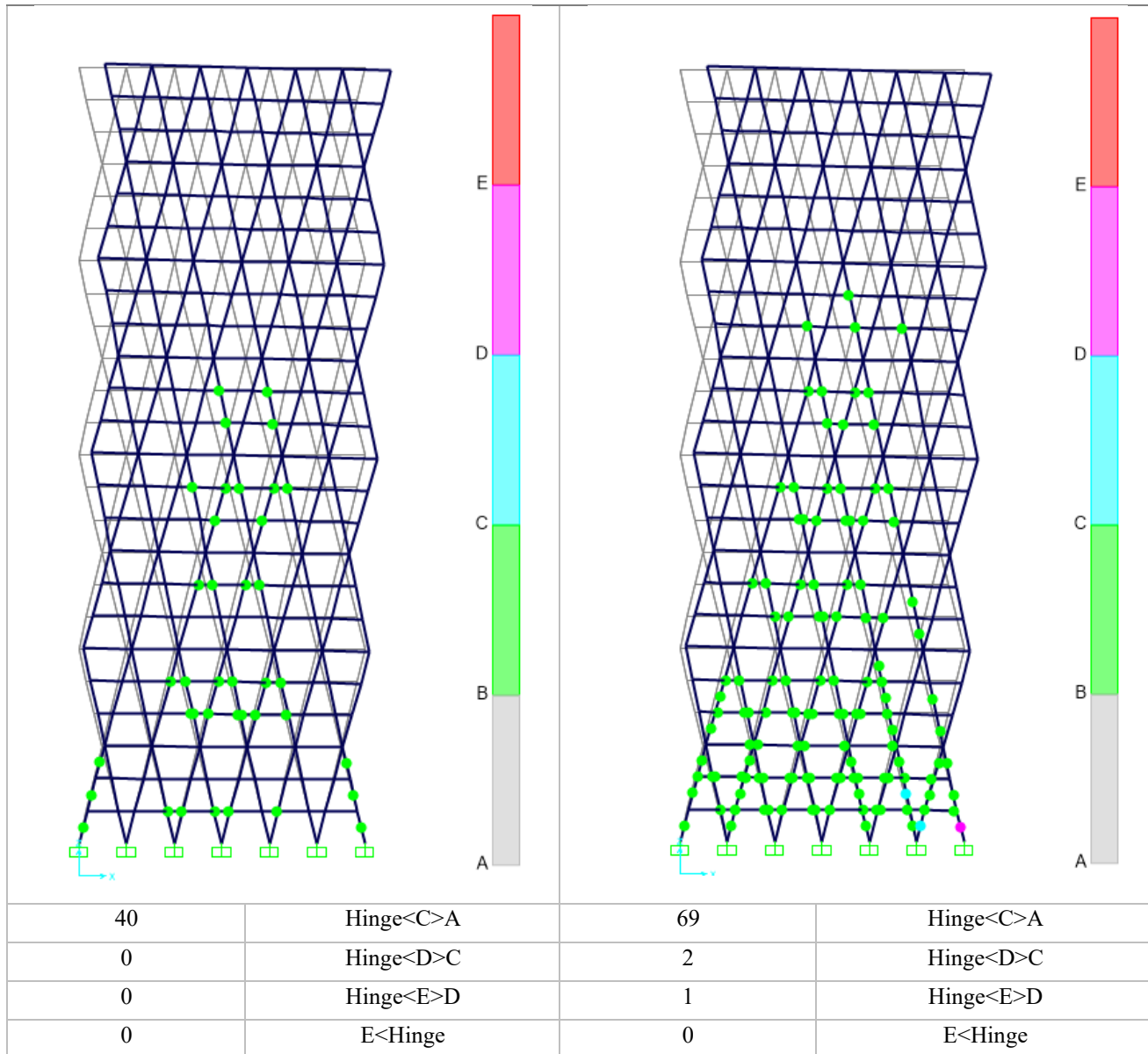
شکل ۸- توزیع مفاصل پلاستیک در مدل D-69



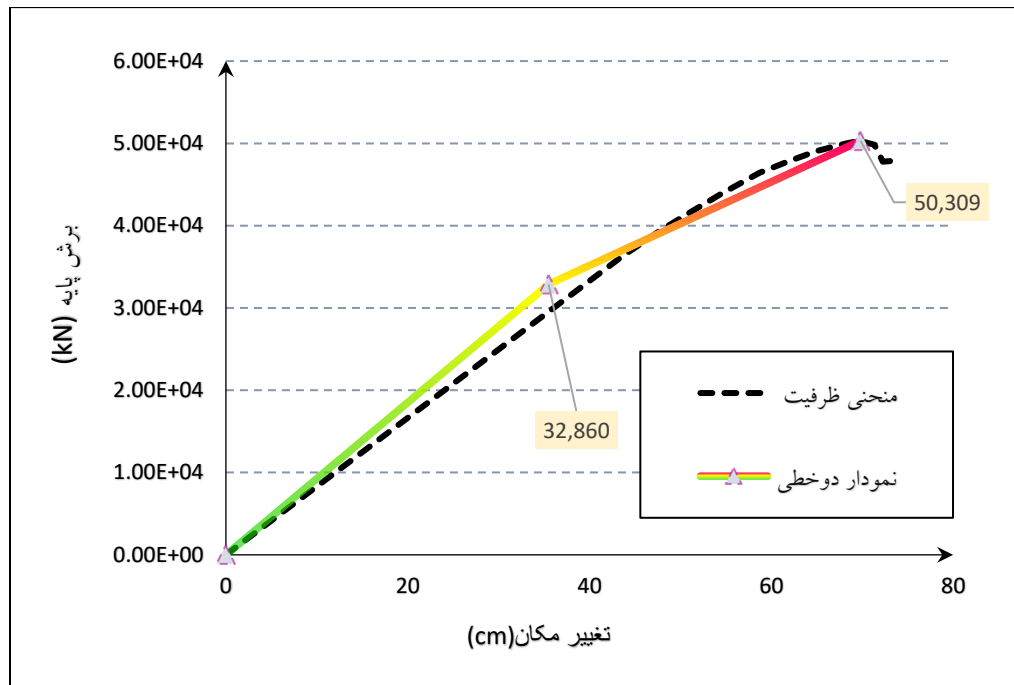
شکل ۹- منحنی ظرفیت مدل D-69

۳.۳ مدل D-75 (زاویه ۷۵ درجه)

المان‌ها در سه طبقه الگوهای مثلثی دارند. تعداد مفاصل ۱۱۲ عدد بود که ۱ مفصل در ناحیه D-E قرار داشت (شکل ۱۰). برش پایه تسلیم ۳۲۸۶۰ کیلونیوتن، برش پایه نهایی ۵۰۳۰۵ کیلونیوتن، سختی ۸۷۳ کیلونیوتن بر سانتی‌متر، شکل‌پذیری ۱.۹۶ و اضافه مقاومت ۱.۶۲ بود (شکل ۱۱). حداکثر دررفت ۰.۰۱۴ در طبقه ۱۹ بود.



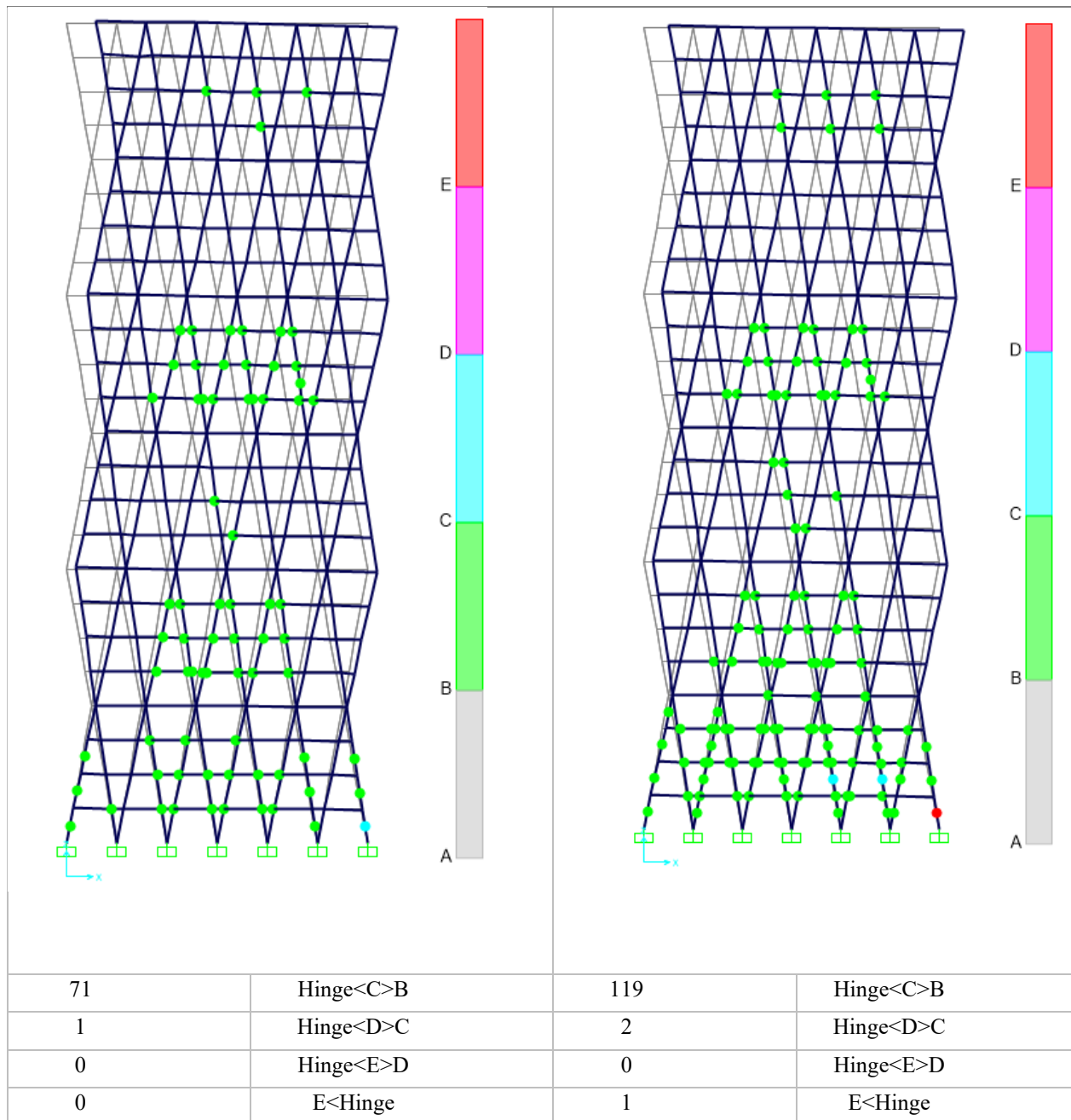
شکل ۱۰- توزیع مفاصل پلاستیک در مدل D-75



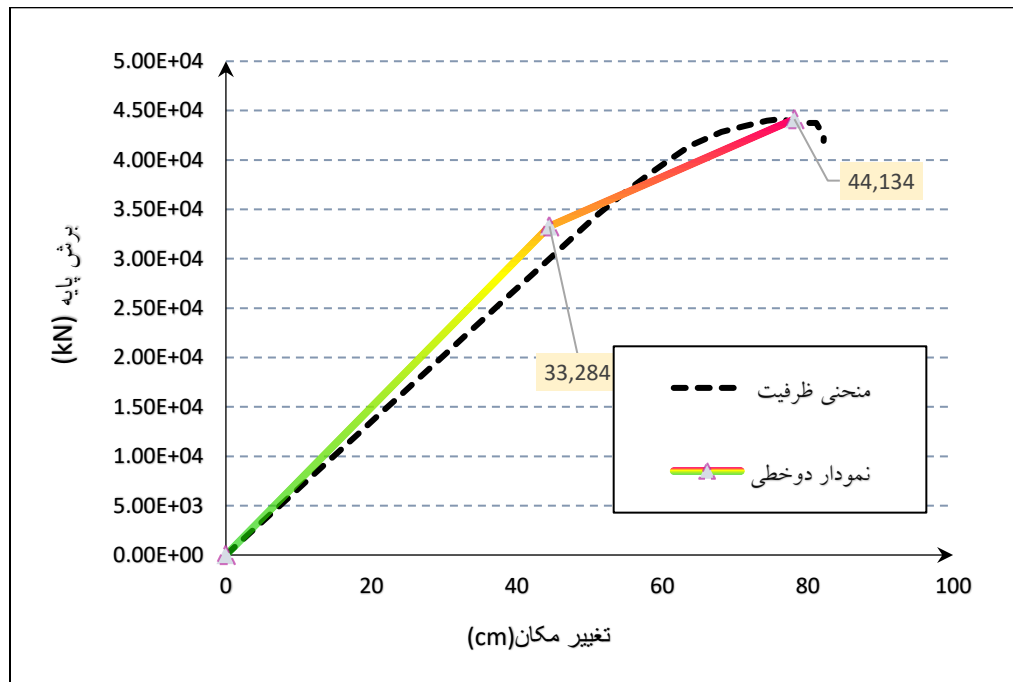
شکل ۱۱- منحنی ظرفیت مدل D-75

۳.۴ مدل D-78 (زاویه ۷۸ درجه)

المان‌ها در چهار طبقه به هم می‌رسند. تعداد مفاصل ۱۲۲ عدد (بیشترین) بود (شکل ۱۲). برش پایه تسلیم ۳۳۲۸۴ کیلونیوتن، برش پایه نهایی ۴۴۱۳۴ کیلونیوتن، سختی ۷۰۸ کیلونیوتن بر سانتی‌متر، شکل‌پذیری ۱.۷۵ و اضافه مقاومت ۱.۴۰ بود (شکل ۱۳). حداکثر دررفت ۰.۰۱۷ در طبقه ۲۱ بود.



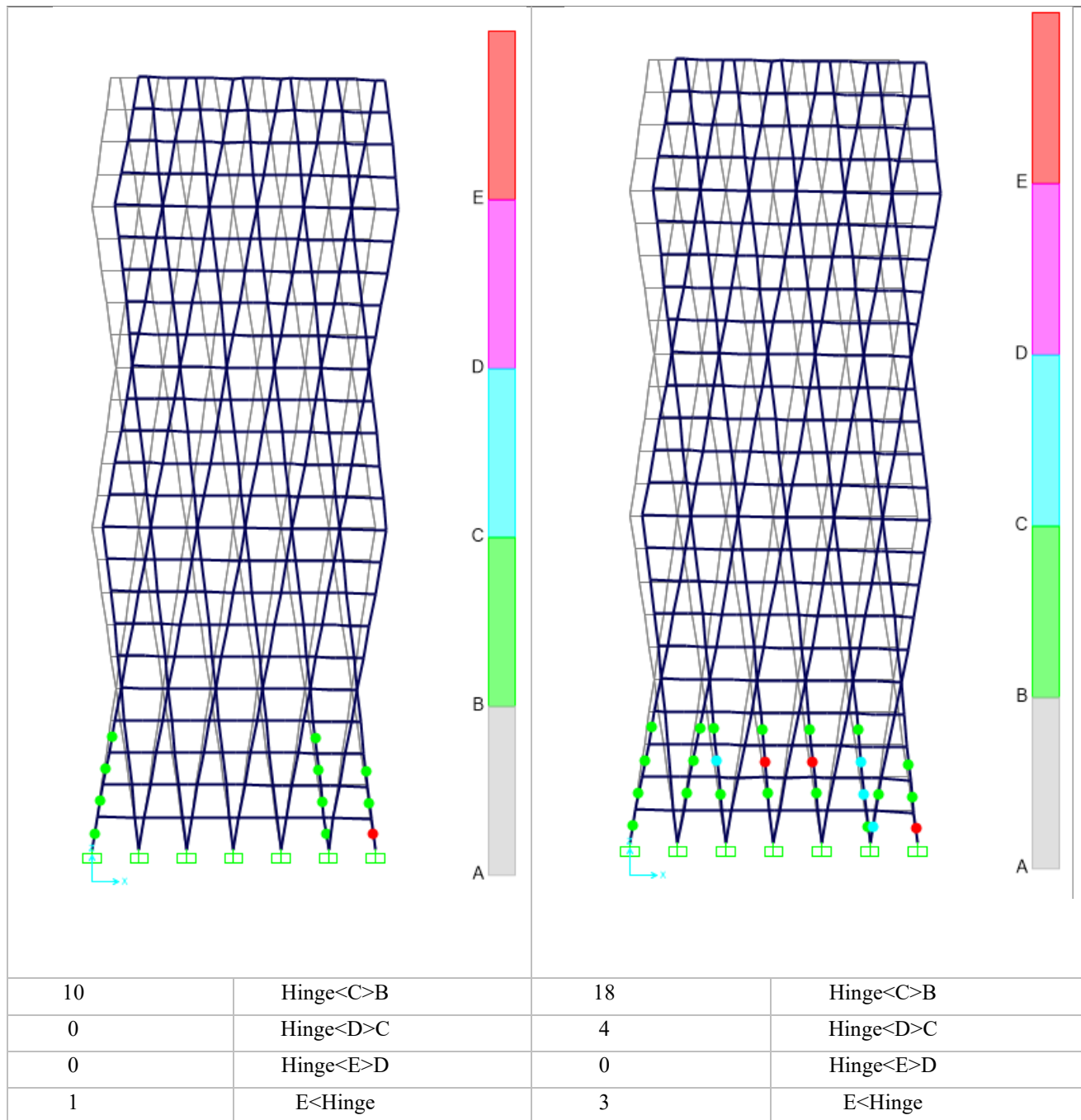
شکل ۱۲- توزیع مفاصل پلاستیک در مدل D-78



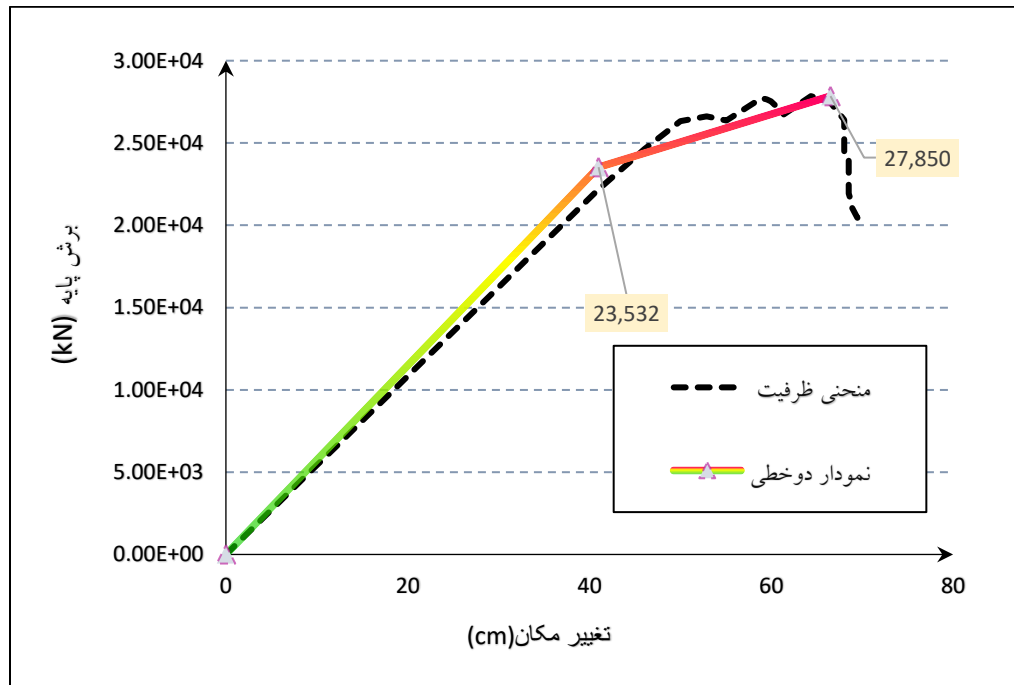
شکل ۱۳- منحنی ظرفیت مدل D-78

۳.۵ مدل D-81 (زاویه ۸۱ درجه)

المان‌ها در پنج طبقه الگوهای مثلی دارند. تعداد مفاصل ۳۵ عدد بود که ۳ مفصل فراتر از E بود (شکل ۱۴). برش پایه تسلیم ۲۳۵۳۲ کیلونیوتن، برش پایه نهایی ۲۷۸۵۰ کیلونیوتن، سختی ۵۶۱ کیلونیوتن بر سانتی‌متر، شکل پذیری ۱.۳۳ و اضافه مقاومت ۱.۲۱ بود (شکل ۱۵). حداکثر دریفت ۰.۰۱۹ در طبقه ۲۱ بود.



شکل ۱۴- توزیع مفاصل پلاستیک در مدل D-81



شکل ۱۵- منحنی ظرفیت مدل D-81

۳.۶ مقایسه کلی و دریافت

نام مدل	برش پایه اولین مفصل پلاستیک	برش پایه نهایی	سختی الاستیک	نسبت شکل پذیری	ضریب اضافه مقاومت
D-53	29711	33970	714	1.44	1.21
D-69	37100	54846	1151	1.8	1.56
D-75	32860	50305	873	1.96	1.62
D-78	33284	44134	708	1.75	1.40
D-81	23532	27850	561	1.33	1.21

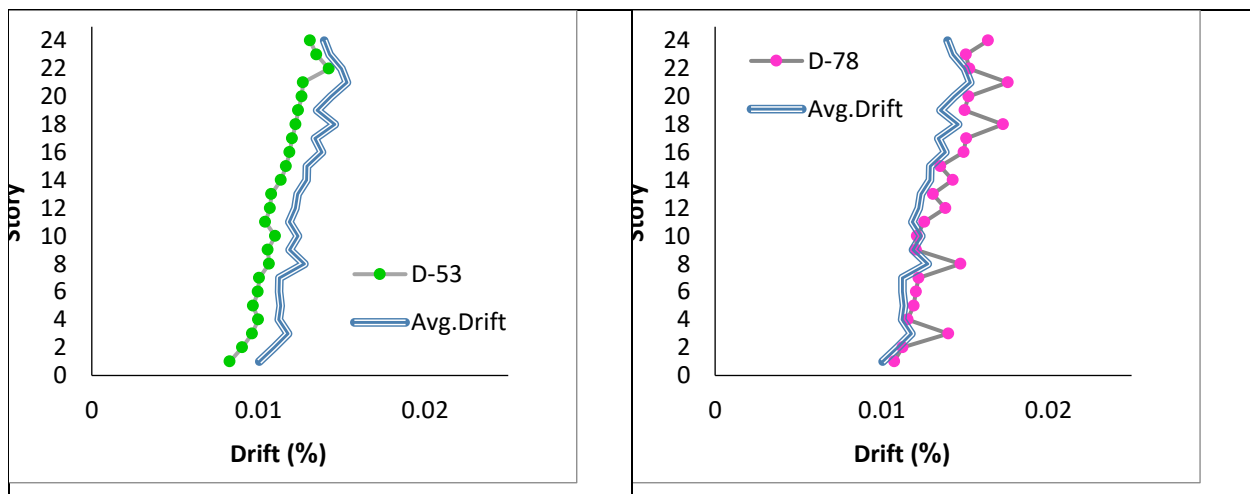
جدول ۲- مقایسه نتایج مدل ها

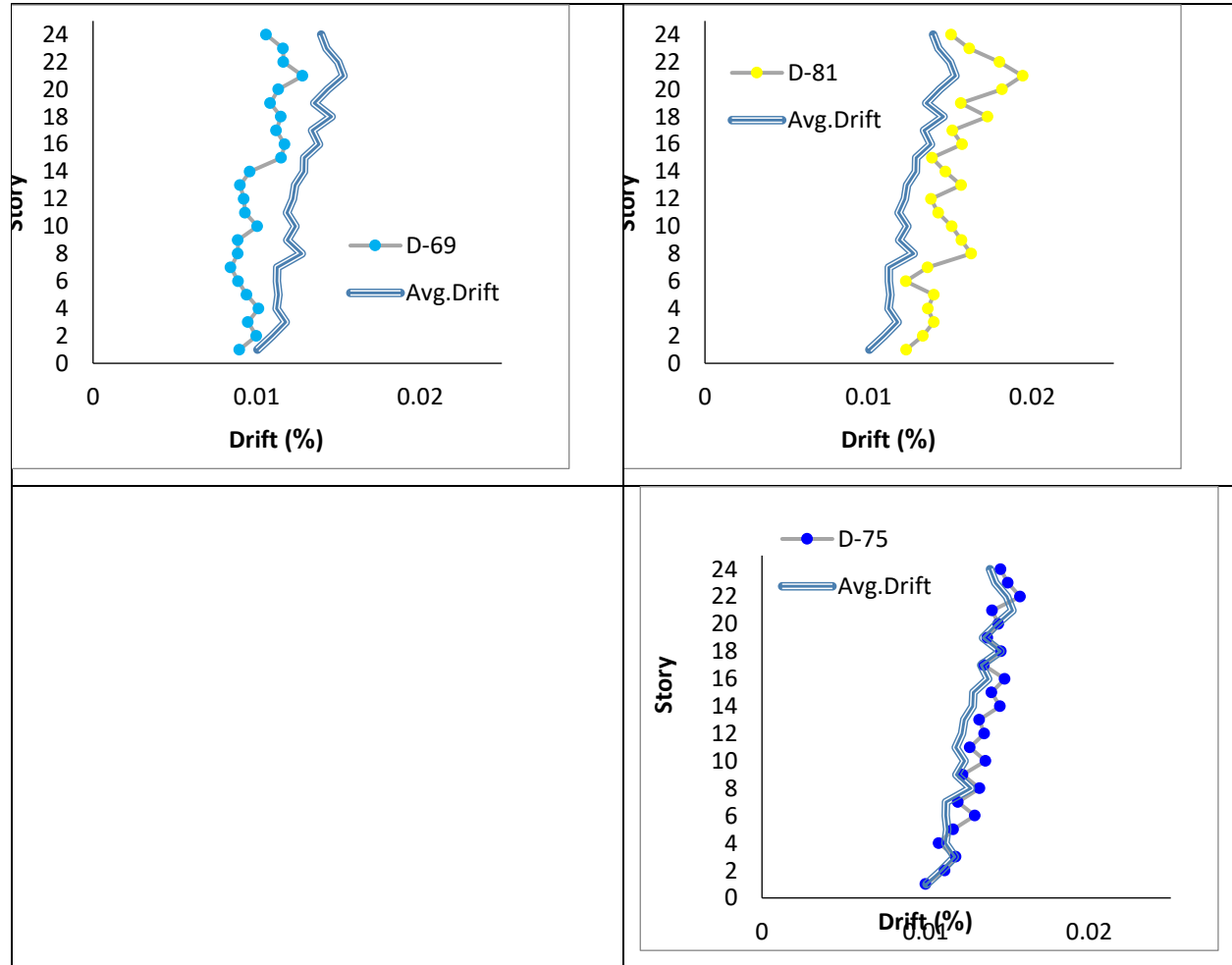
جدول ۳ دریفت حداکثر هر مدل را نشان می‌دهد:

نام مدل	حداکثر دریفت	طبقه مربوطه
D-54	0.015	18
D-69	0.012	20
D-75	0.014	19
D-78	0.017	21
D-81	0.019	21

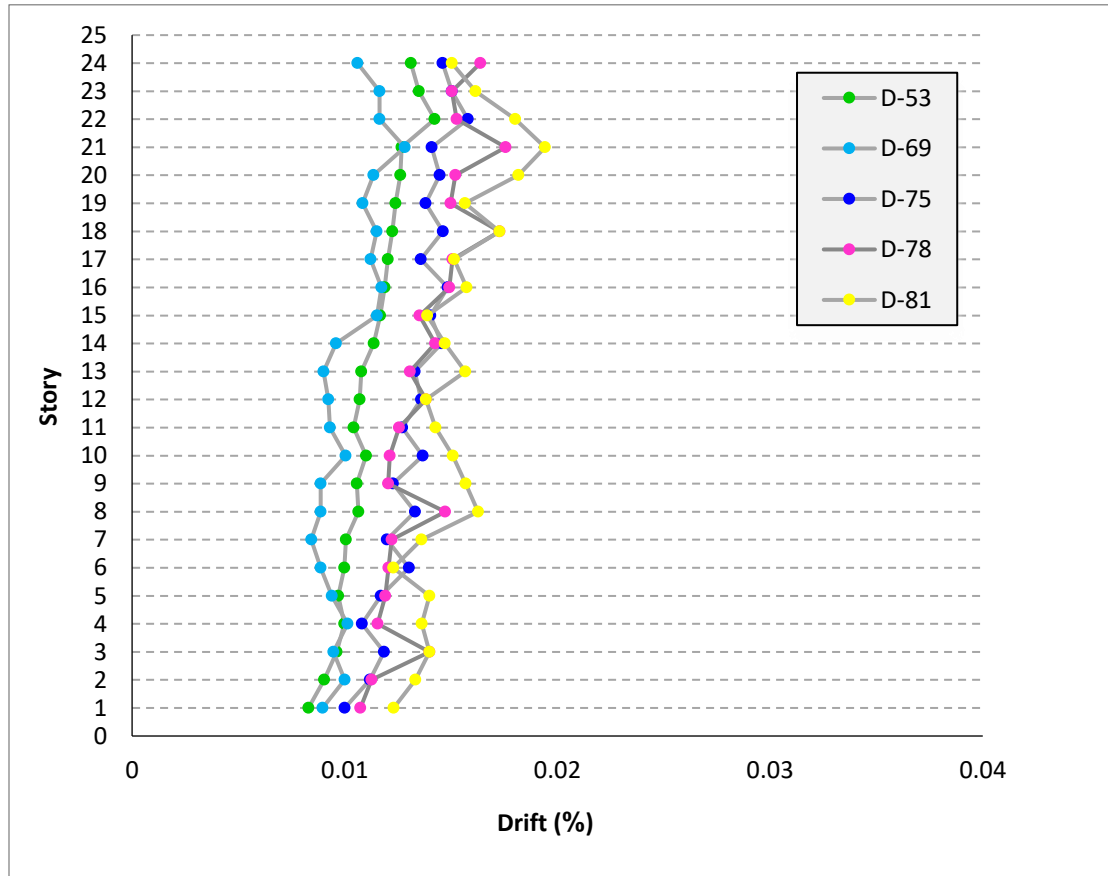
جدول ۳- حداکثر دریفت طبقات

شکل ۱۶ و ۱۷ دریفت را نشان می‌دهند:





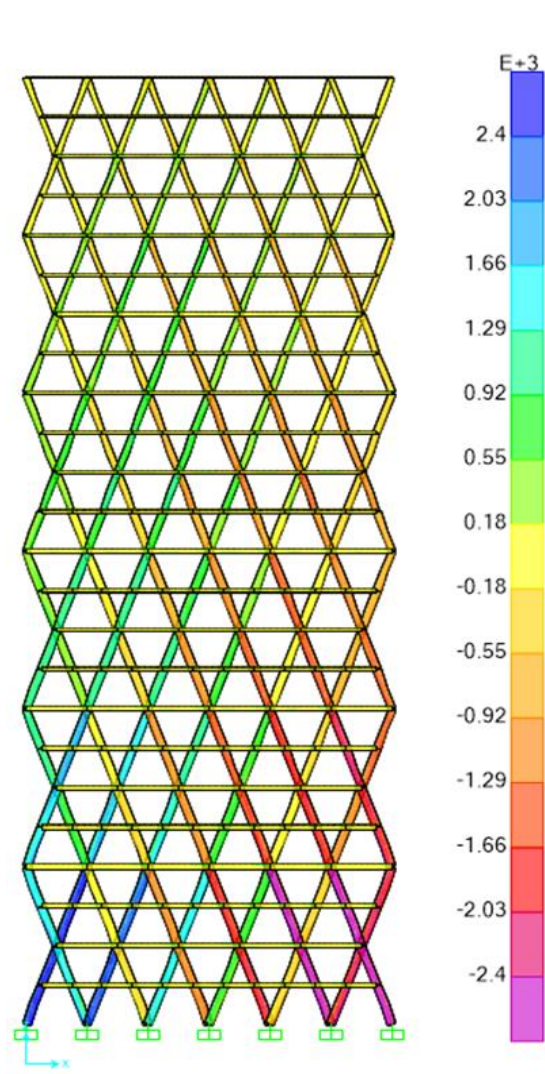
شکل ۱۶- دریفت طبقات در مدل‌ها



شکل ۱۷- مقایسه دریفیت طبقات

۳.۷ تنش‌ها

تنش‌های نرمال با افزایش زاویه بیشتر شدند و تنش‌های خمشی کاهش یافتند (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- توزیع تنش در مدل D-69

۴. بحث و نتیجه گیری

۴.۱ تحلیل مقاومت و سختی

مدل D-69 با برش پایه نهایی ۵۴۸۴۶ کیلونیوتن و سختی ۱۱۵۱ کیلونیوتن بر سانتی متر بهترین عملکرد را داشت [9]. زوایای بالاتر (مثل ۸۱°) مقاومت را کاهش دادند.

۴.۲ رفتار غیرخطی

افزایش زاویه تعداد مفاصل پلاستیک را بیشتر کرد ۱۲۲ در (D-78) [10]

۴.۳ دریفت

زوایای کمتر دریفت یکنواخت تری داشتند ۰.۰۱۲ در (D-69)

۴.۴ نتیجه گیری

دیالگ‌ریدها پتانسیل بالایی دارند و زاویه ۶۹ درجه بهینه بود. پیشنهاد می‌شود تحلیل دینامیکی انجام شود.

۵. قدردانی

به یاد پدرم، که غیابش حضور قاطع اعجاز است.

۶. مراجع

- ۱- مهدی فضیلتی، داود مستوفی‌نژاد. (۱۳۸۴)، "بارگذاری و سیستم‌های باربر"، ارکان.
- ۲- Di Sarno, L., & Elnashai, A. S. (2009), "Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames," Journal of Constructional Steel Research, 65(2), pp. 452-46
- ۳- Shen, J., Wen, R., Akbas, B., Doran, B., & Uckan, E. (2014), "Seismic demand on brace-intersected beams in two-story X-braced frames," Engineering Structures, 76, pp. 295-31
- ۴- FEMA356. (2000), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Federal Emergency Management Agency, Washington, D.
- ۵- sizemore, J. G., Fahnestock, L. A., Hines, E. M., & Bradley, C. R. (2017), "Parametric study of low-ductility concentrically braced frames under cyclic static loading," Journal of Structural Engineering, 143(6), 04017032.
- ۶- استاندارد ۲۸۰۰. (۱۳۹۳)، "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله"، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۷-), "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers

۸- پیرزاده، م. و همکاران. (۱۳۹۸)، "ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی با نامنظمی در ارتفاع"، نشریه مهندسی سازه، شماره ۲۵.

۹- Sheikh, H., & Massumi, A. (2014), "Effects of bracing configuration on seismic behavior of tall steel structures subjected to earthquake ground motions," Proc. of the 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska

۱۰- Khandelwal, K., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2009), "Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames," Journal of Constructional Steel Research, 65(3), pp. 69