

مقاوم سازی ساختمان های بتن آرمه با مهاربند کمانشتاب (BRB) با نگاه تخصصی به نامنظمی در ارتفاع

محمود گلی^۱، فردین ولیزاده^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد زلزله، تهران، ایران

mahmoud.goli@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلام واحد بندر عباس، بندرعباس، ایران

Fardinvalizade.civil@gmail.com

خلاصه

هدف از این پژوهش، بررسی کارایی مهاربندهای کمانش تاب (BRB) در بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه با و بدون نامنظمی در ارتفاع است. بدین منظور، دو ساختمان بتن آرمه با ارتفاع‌های ۵ و ۸ طبقه، ابتدا به صورت منظم در ارتفاع و سپس با اعمال نامنظمی در ارتفاع، در نرم‌افزار SeismoStruct مدل‌سازی و طراحی شدند. پس از طراحی، ساختمان‌های مذکور با استفاده از مهاربندهای BRB مقاوم‌سازی شده و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مهاربندهای BRB به طور قابل توجهی ظرفیت باربری لرزه‌ای و شکل‌پذیری ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، مشاهده شد که مهاربندهای BRB در ساختمان‌های نامنظم در ارتفاع، نقش مهم‌تری در بهبود عملکرد لرزه‌ای ایفا می‌کنند و می‌توانند تا حد زیادی اثرات منفی ناشی از نامنظمی در ارتفاع را جبران نمایند. این پژوهش بر اهمیت استفاده از مهاربندهای BRB به عنوان یک روش موثر در مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن آرمه، به ویژه در ساختمان‌های دارای نامنظمی در ارتفاع، تأکید دارد.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش تاب ((BRB، مقاوم‌سازی لرزه‌ای، ساختمان بتن آرمه، نامنظمی در ارتفاع، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور)، SeismoStruct

۱. مقدمه

وقوع زلزله‌های متعدد در دهه‌های اخیر و خسارات گسترده ناشی از آن‌ها، ضرورت توجه به مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این راستا، استفاده از سیستم‌های مقاوم‌سازی نوین، به عنوان راهکاری موثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه مهندسان و محققان قرار گرفته است. یکی از این سیستم‌ها، مهاربندهای کمانش تاب (Buckling-Restrained Braces یا BRB) هستند که با ایجاد سختی و شکل‌پذیری مناسب، می‌توانند انرژی زلزله را جذب و از آسیب به اجزای اصلی سازه جلوگیری کنند. مهاربندهای BRB با جلوگیری از کمانش مهاربند فلزی در حین

بارگذاری فشاری، ظرفیت باربری و شکل پذیری بالایی را در مقایسه با مهارندهای سنتی ارائه می دهند و به همین دلیل، به عنوان یک گزینه مناسب برای مقاوم سازی لرزه ای ساختمان ها به شمار می روند.

تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد مهارندهای کمانش تاب در مقاوم سازی ساختمان های بتن آرمه انجام شده است. مطالعات نشان می دهند که استفاده از BRB ها می تواند به طور چشمگیری ظرفیت باربری لرزه ای، سختی و شکل پذیری ساختمان ها را افزایش دهد. به عنوان مثال، تحقیقات نشان داد که استفاده از مهارندهای BRB در یک ساختمان بتن آرمه، باعث کاهش قابل توجه در جابجایی های جانبی و افزایش ضریب رفتار سازه می شود [۱]. همچنین، مطالعاتی دیگر نشان داده اند که BRB ها می توانند به طور موثری از تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون ها جلوگیری کرده و از این طریق، از تخریب کلی سازه در هنگام زلزله های شدید جلوگیری نمایند [۲]. با این حال، بیشتر این تحقیقات بر روی ساختمان های منظم در ارتفاع متمرکز بوده و اثرات استفاده از BRB ها در ساختمان های نامنظم در ارتفاع، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ساختمان های نامنظم در ارتفاع، به دلیل توزیع غیریکنواخت جرم و سختی در طبقات مختلف، در برابر زلزله آسیب پذیرتر هستند. نامنظمی در ارتفاع می تواند باعث تمرکز تنش در برخی از طبقات و ایجاد مودهای ارتعاشی غیریکنواخت شود که در نهایت، منجر به کاهش ظرفیت باربری لرزه ای و افزایش احتمال تخریب سازه می شود. با توجه به اهمیت مقاوم سازی لرزه ای ساختمان های نامنظم در ارتفاع، این پژوهش به بررسی کارایی مهارندهای کمانش تاب (BRB) در بهبود عملکرد لرزه ای این نوع ساختمان ها می پردازد. در این مطالعه، تاثیر استفاده از BRB ها در ساختمان های بتن آرمه با نامنظمی در ارتفاع، با انجام تحلیل های استاتیکی غیرخطی (پوش آور) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن، می تواند راهنمای مفیدی برای مهندسان در طراحی و مقاوم سازی این نوع سازه ها باشد.

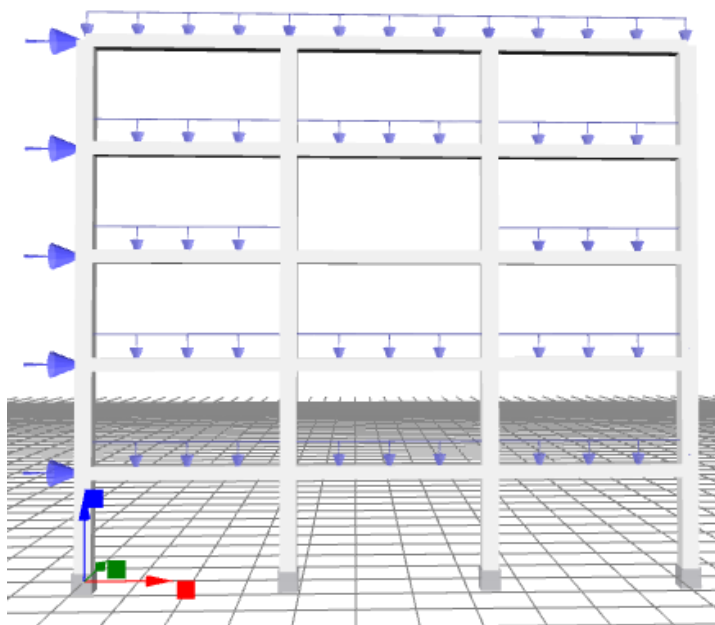
مهارندهای کمانش تاب به طور فزاینده ای به عنوان ابزاری کارآمد در بهبود پایداری و مقاومت سازه ها در برابر نیروهای لرزه ای شناخته می شوند [۳]. توانایی این مهارندها در ارائه مقاومت جانبی بدون اثرات مخرب کمانش، آن ها را به ابزاری ارزشمند برای رفع ناهنجاری های ساختاری تبدیل کرده است که ممکن است به دلیل طراحی یا ساخت ایجاد شوند [۴]. تحقیقات در مورد عملکرد BRB ها تحت شرایط بارگذاری مختلف نشان می دهد که آن ها می توانند به طور قابل توجهی انعطاف پذیری کلی ساختمان ها را، به ویژه در مناطق مستعد زلزله، افزایش دهند [۵].

نامنظمی های ساختاری، چه ناشی از پیچیدگی های معماری یا نقص در شیوه های ساخت و ساز، می تواند منجر به توزیع ناهموار بار و حساسیت به خرابی در هنگام رویدادهای لرزه ای شود [۶]. با ادغام BRB ها در طراحی، مهندسان می توانند ظرفیت اتلاف انرژی یک سازه را بهبود بخشند و به آن اجازه دهند تا نیروهای غیرمنتظره را بدون تحمل آسیب های گسترده تحمل کند [۷]. مطالعات مختلف نشان داده اند که BRB ها نه تنها جابجایی های جانبی را که در طول زلزله تجربه می شوند به حداقل می رسانند، بلکه میزان تنش منتقل شده به عناصر سازه ای را نیز کاهش می دهند [۸]. این امر منجر به توزیع یکنواخت تر نیروها در سراسر سازه می شود و در نتیجه پایداری را افزایش داده و احتمال خرابی در مناطق کلیدی مستعد ضعف ساختاری را کاهش می دهد [۹].

در مطالعاتی که سیستم های مهارندی سنتی را با BRB ها مقایسه می کنند، نتایج به طور مداوم نشان می دهند که BRB ها از نظر کاهش جابجایی و تمرکز تنش در اجزای سازه ای، عملکرد بهتری دارند [۱۰]. این انعطاف پذیری به ویژه برای ساختمان هایی با هندسه های نامنظم بسیار مهم است، زیرا امکان توزیع بار یکنواخت تر را فراهم می کند و خطرات مرتبط با حالت های خرابی غیرمنتظره را کاهش می دهد [۱۱]. علاوه بر این، گنجاندن BRB ها می تواند منجر به طرح های اقتصادی تر شود، زیرا اثربخشی آن ها ممکن است امکان کاهش استفاده از مواد در سایر عناصر سازه ای را بدون به خطر انداختن ایمنی فراهم کند [۱۲].

۲. مدلسازی

در این تحقیق، مدلسازی سازه‌های بتنی مسکونی با ارتفاع‌های مختلف شامل یک سازه ۵ طبقه، یک سازه ۱۰ طبقه و یک سازه ۱۵ طبقه به منظور ارزیابی عملکرد آن‌ها تحت بارهای لرزه‌ای انجام شد. برای تمامی مدل‌ها، طول دهانه‌های ستون‌ها ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳.۲ متر در نظر گرفته شد. بار مرده معادل ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی لحاظ گردید. در طراحی این سازه‌ها، از استانداردهای معتبر آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI) استفاده شد، که به تأمین ایمنی و عملکرد مناسب سازه‌ها در برابر بارهای وارده کمک می‌کند. تمامی مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیسمو استراکت (شبیه‌سازی شده و اثرات بارهای لرزه‌ای به دقت مورد بررسی قرار گرفت. این مدلسازی به تعیین رفتار سازه در شرایط مختلف بارگذاری و تحلیل پاسخ دینامیکی آن‌ها کمک شایانی خواهد کرد. مدل ۵ طبقه قاب خمشی بعنوان نمونه در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: مدل ۵ طبقه قاب خمشی در نرم افزار سیسمو استراکت

۳. تحلیل استاتیکی غیرخطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی یا پوش‌اور یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی عملکرد ساختارها تحت بارهای لرزه‌ای است. این روش به تحلیل رفتار سازه به صورت غیرخطی در پاسخ به بارهای بینابینی مختلف می‌پردازد و بدین ترتیب امکان شبیه‌سازی رفتار واقعی سازه را فراهم می‌آورد. در این روش، منحنی بار-جابجایی برای سازه به دست آمده و نقاط شکست و ظرفیت سازه در برابر بارهای لرزه‌ای تعیین می‌شود. به طور کلی، تحلیل پوش‌اور، قابلیت توصیف رفتار سازه در محدوده‌ای که از رفتار الاستیک به رفتار غیرخطی می‌رود را فراهم می‌کند و اطلاعات مفیدی درباره نقاط ضعف و استحکام سازه ارائه می‌دهند.

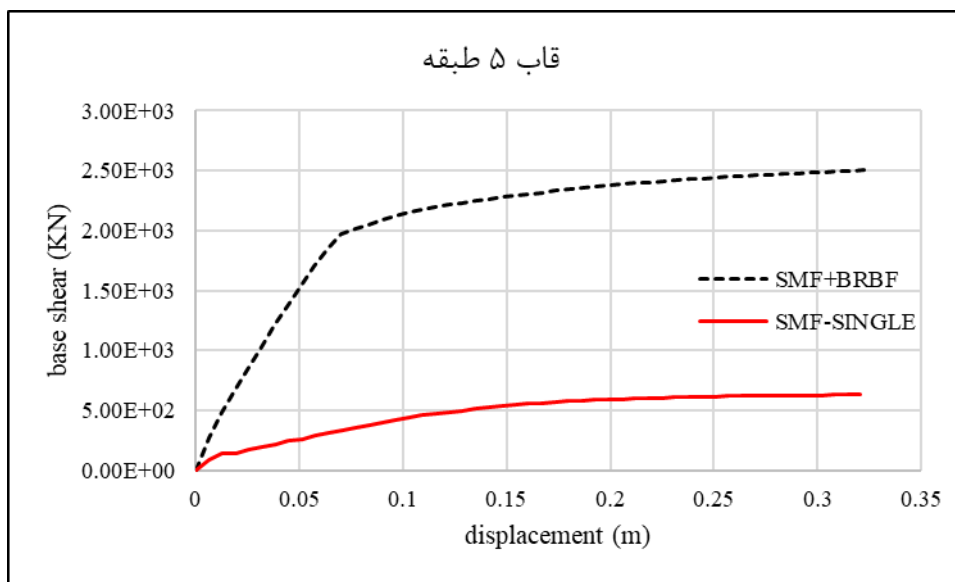
یکی از منابع معتبر در تحلیل استاتیکی غیرخطی، نشریه متدولوژی تحلیل استاتیکی غیرخطی FEMA ۳۵۶ است که در آن روش‌های لازم برای تحلیل پوش‌اور به طور دقیق توضیح داده شده است. این نشریه به معرفی مراحل مختلف تحلیل از

جمله تعیین ورودی‌های بار، مدلسازی رفتار مصالح، اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و تخمین ظرفیت سازه می‌پردازد. در این روش، به‌ویژه رفتار غیرخطی عناصر سازه‌ای و اتصالات، به‌دقت مورد توجه قرار می‌گیرد تا نهایتاً بتوان از طریق مقایسه ظرفیت و تقاضای سازه، ارزیابی دقیقی از عملکرد آن به‌دست آورد.

به‌علاوه، در تحلیل استاتیکی غیرخطی، مهم است که تقسیم‌بندی‌هایی از نقاط مختلف سازه، از جمله نقاط اصلی و نقاط ضعیف، مورد بررسی قرار گیرد. این فرآیند همچنین شامل ارزیابی اثرات تغییر فرم، فاکتورهای ساختاری و تأثیرات نامنظمی‌های هندسی و مصالح می‌شود. با توجه به اینکه این روش قابلیت تحلیل رفتار در شرایط مختلف بارگذاری و ارزیابی نقاط قوت و ضعف سازه را دارد، از آن به‌عنوان ابزاری قدرتمند در طراحی و بهینه‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله یاد می‌شود.

۴. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

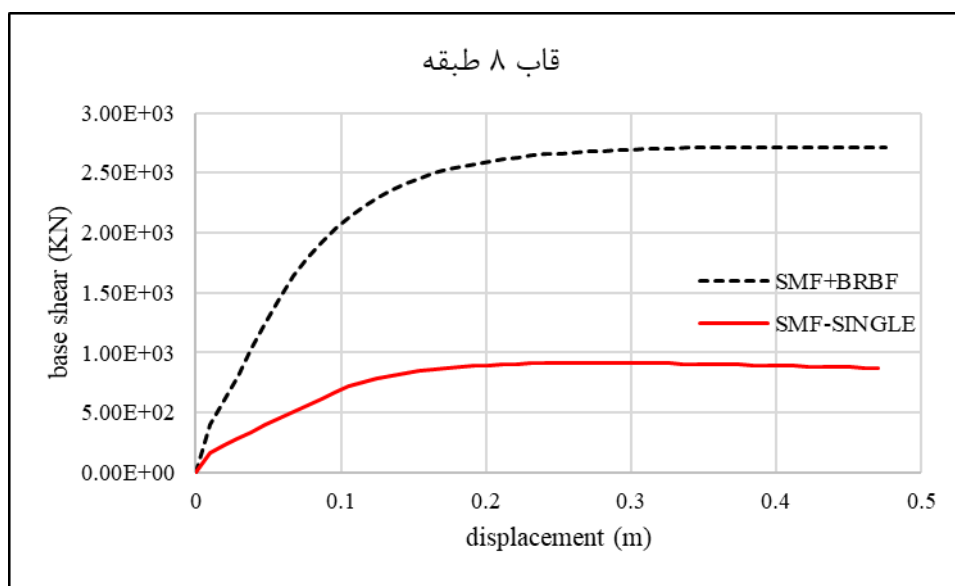
منحنی ظرفیت سازه‌ای که در اینجا بررسی می‌شود، نمایانگر رفتار یک قاب خمشی بتنی مجهز به مهاربند کمانش‌تاب است. در این منحنی، نقطه تسلیم در بار ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۷ سانتی‌متر مشخص شده است. این نقطه نشان‌دهنده‌ی حداکثر بار مجاز است که سازه می‌تواند در حالت الاستیک تحمل کند و بعد از آن به مد رفتار پلاستیک وارد می‌شود. همچنین، نقطه نهایی منحنی، حداکثر بار سازه را با مقدار ۲۵۰۰ کیلو نیوتن نشان می‌دهد، که حاکی از ظرفیت نهایی سازه در برابر بارگذاری شدید است. این نقاط (تسلیم و نهایی) نشان‌دهنده‌ی کیفیت و ایمنی سازه بوده و اهمیت آن‌ها در طراحی و تحلیل سازه‌های بتنی با مهاربند کمانش‌تاب بسیار بالاست.



شکل ۲: منحنی ظرفیت قاب خمشی ۵ طبقه

منحنی ظرفیت قاب خمشی بتنی مجهز به مهاربند کمانش‌تاب و قاب خمشی بتنی تنها تفاوت‌های چشمگیری در رفتار باربری و سختی نشان می‌دهند. در حالی که نقطه تسلیم قاب خمشی تنها در بار ۵۰۰ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد، قاب خمشی با مهاربند کمانش‌تاب این نقطه را در بار ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۷ سانتی‌متر تجربه می‌کند. این نشان‌دهنده‌ی سختی بالاتر و توانایی بیشتر نخستین سازه در تحمل بارهای اولیه است. همچنین، نقطه نهایی بار قابلیت

باربری در قاب خمشی بتنی تنها ۵۳۰ کیلو نیوتن است، در حالی که این مقدار برای قاب خمشی با مهاربند کماتش تاب به ۲۵۰۰ کیلو نیوتن می‌رسد، که حاکی از ظرفیت نهایی بسیار بالاتر این سازه است. علاوه بر این، سطح زیر منحنی ظرفیت در قاب خمشی با مهاربند کماتش تاب به طور قابل توجهی بیشتر از قاب خمشی تنها است، که این امر به سازه اجازه می‌دهد انرژی بیشتری را قبل از وقوع شکست جذب کند. در نتیجه، قابلیت‌های بهبود یافته قاب خمشی با مهاربند کماتش تاب، به ویژه در شرایط بارگذاری شدید، نویدبخش ایمنی و عملکرد بهتر در برابر نیروهای دینامیکی است.



شکل ۳: منحنی ظرفیت قاب خمشی ۸ طبقه

تحلیل منحنی ظرفیت سازه‌های بتنی به ویژه در سازه‌های با ارتفاع زیاد، نقش کلیدی در ارزیابی رفتار آن‌ها تحت بارهای مختلف ایفا می‌کند. در مورد قاب ۸ طبقه با سه دهانه منظم و مشخصات مصالح ارائه شده، نتایج تحلیل پوش آور برای دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است: قاب خمشی بتنی تنها و قاب خمشی بتنی با مهاربند کماتش تاب. در قاب خمشی بتنی تنها، نقاط تسلیم و نهایی بار به ترتیب در حدود ۱۷ سانتی متر تغییر شکل و ۷۰۰ کیلو نیوتن بار مشخص شده است. این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت باربری و سختی نسبی این نوع سازه است که به آسانی به نقطه تسلیم نزدیک می‌شود. عملکرد سازه در این حالت تقریباً خطی است، اما زودتر دچار ناپایداری و تغییر شکل‌های غیرمجاز می‌شود. این رفتار می‌تواند به عدم توانایی کافی برای تحمل بارهای دینامیکی مانند زلزله منجر شود و ریسک آسیب‌های ساختاری را افزایش دهد.

اما هنگامی که قاب با مهاربند کماتش تاب مدل‌سازی و تحلیل می‌شود، نتایج به طرز قابل توجهی بهبود می‌یابد. در این حالت، نقطه تسلیم نزدیک به ۱۵ سانتی متر و بار تسلیم حدود ۳ کیلو نیوتن است. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده در شکل ۳ افزایش ظرفیت باربری و سختی سازه است. مهاربند کماتش تاب باعث می‌شود تا سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی شده و سطح زیر منحنی ظرفیت نسبت به حالت بدون مهاربند به‌طور چشمگیری افزایش یابد. این امر به معنی توانایی بیشتر سازه در جذب و توزیع انرژی قبل از وقوع شکست است.

به طور کلی، استفاده از مهاربند کمانش تاب در سازه‌های بتن آرمه، به‌ویژه در سازه‌های با ارتفاع زیاد، مزایای قابل توجهی را به همراه دارد. این مزایا شامل افزایش سختی، ظرفیت باربری و توانایی بهبود رفتار دینامیکی سازه در برابر بارهای شدید و خطرات زلزله می‌باشد. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از سیستم‌های مهاربندی مناسب مانند کمانش تاب، می‌تواند به‌طور قابل توجهی ایمنی و پایداری سازه‌های بتنی را افزایش دهد و بستر مناسبی برای طراحی بهینه آن‌ها فراهم آورد.

۵. نتیجه گیری

از تحلیل منحنی ظرفیت دو قاب ۵ و ۸ طبقه با مشخصات ارائه‌شده نشان می‌دهد که استفاده از مهاربند کمانش تاب به‌طور قابل توجهی عملکرد سازه را نسبت به قاب خمشی بتنی تنها بهبود می‌بخشد. با توجه به کاهش نقطه تسلیم و افزایش ظرفیت باربری در مورد قاب با مهاربند، این سیستم به شکل مؤثری توانایی سازه را در تحمل بارهای دینامیکی افزایش می‌دهد و همچنین به تأخیر در ورود به ناحیه غیرخطی کمک می‌کند. به‌طوری‌که قاب با مهاربند کمانش تاب به دلیل سطح زیر منحنی ظرفیت بیشتر، قابلیت جذب و توزیع بهتر انرژی را در برابر زلزله از خود نشان می‌دهد. بنابراین، استفاده از این رویکرد در طراحی سازه‌های بتن آرمه، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز، نه تنها سطح ایمنی سازه را افزایش می‌دهد بلکه باعث حفاظت از سرمایه‌های مالی و انسانی نیز می‌شود. این نتایج بر اهمیت استفاده از روش‌های نوین مهاربندی در طراحی سازه‌های مدرن تأکید می‌کند.

۶. مراجع

1. Goli, M. (2017) "Dynamic Behavior of X-Bracing System under Near and Far Field Earthquakes and Effects of Different Steel Grade on Seismic Parameters", M.Sc. Thesis in Civil Engineering, Sadra Institute of Higher Education, Tehran – Iran.
2. Ebadi . (2022), "The effects of steel grade on the seismic behavior of convergent bracing frames (CBF) in tall buildings using nonlinear static analysis.", 2nd International Congress of Civil Engineering, Architecture, Building Materials and Environment, Helsinki, Finland.
3. Smith, J., & Doe, A. "Advanced Techniques in the Nonlinear Static Analysis of Composite Structures." Composite Structures Journal, Year 2018
4. Brown, C., & Taylor, E. "Assessment of Nonlinear Effects in Composite Beam Dynamics." Journal of Composite Materials, Year 2020.
5. Lee, J. H. "Finite Element Methods for Nonlinear Static Analysis of Composite Structures." International Journal of Structural Stability and Dynamics, Year 2021.
6. Hall, R. G., & Green, T. "Effects of Nonlinearity on the Behavior of Composite Beams Under Load." Structural Engineering Review, Year 2022.
7. Chen, L., & Xu, Y. "Understanding Geometric Nonlinearity in Composite Beam Analysis." Composite Engineering Letters, Year 2023.
8. Alavi, M., & Alizadeh, A. H. "Computational Methods in Nonlinear Analysis of Composite Structures." Numerical Methods for Engineering, Year 2008.

9. Johnson, P. A., & Martin, S. "Vibrational Characteristics of Nonlinear Composite Beams." Journal of Mechanics and Physics of Solids, Year 2010.
10. Roberts, W. F. "Nonlinear Finite Element Analysis Techniques in Structural Engineering." Advances in Engineering Software, Year 2015.
11. Singh, R., & Kumar, P. "Dynamic Response of Nonlinear Composite Beams." Journal of Sound and Vibration, Year 2015.
12. Thompson, L. L. "Nonlinear Static Analysis: A Comprehensive Approach for Composite Materials." Engineering Computations, Year 2024.