

# بررسی عددی عملکرد سازه‌ی ترکیبی ۶ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی و کاربرد CLT به عنوان پل کف و دیوار برشی

امیرحسین حسینی\* (کارشناس ارشد)

سعیدرضا صباغ یزدی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مهندسی عمران شریف، (پیاپی ۱۴۰۹)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۳۳-۲۳، (پژوهشی)

پژوهشگران اخیراً پل‌های چندلایه‌ی متشکل از الوارهای متقاطع چوبی (CLT) را به عنوان یکی از مناسب‌ترین ماده‌های ساختمانی دارای کمترین اثرات منفی زیست محیطی معرفی کرده‌اند. در طرح سازه‌ی ترکیبی فولادی - چوبی ارائه شده در پژوهش حاضر، قاب ساختمان از نوع فولادی بوده و برای کف‌ها و دیوارهای برشی سازه از پل‌های افقی و قائم CLT استفاده شده است. در پژوهش حاضر، جهت بررسی عملکرد سیستم سازه‌ای پیشنهادی، یک ساختمان ۶ طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی شامل: الف) سیستم قاب خمشی متوسط فولادی با دیافراگم کف ترکیبی بتنی فولادی و ب) سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیوار برشی CLT با دیافراگم کف ترکیبی چوبی-فولادی به کمک نرم‌افزار ایتبس طراحی شده است. در ادامه، دو قاب ساختمانی از سازه با دو نوع سیستم یاد شده با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود شدند و سپس رفتار آنها تحت تحلیل بارافزون مقایسه شده است. در مطالعه‌ی حاضر نتیجه گرفته شد که در صورت استفاده از پل‌های افقی و قائم CLT در سازه با سیستم قاب خمشی متوسط فولادی، علاوه بر عملکرد لرزه‌ی مناسب سازه، وزن ساختمان نیز ۱/۲۲٪ کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** الوارهای چندلایه‌ی متقاطع چوبی (CLT)، سازه‌ی ترکیبی چوبی - فولادی، قاب خمشی فولادی، دیوار برشی CLT، کف کامپوزیت چوبی - فولادی.

a.hassani@email.kntu.ac.ir  
syazdi@kntu.ac.ir

## ۱. مقدمه

در مناطق زلزله‌خیز مثل اغلب شهرهای ایران، استفاده از مصالح فولادی و بتنی با نسبت وزن زیاد به مقاومت کم، باعث افزایش جرم واحد سطح ساختمان می‌شود و این موضوع، افزایش انرژی جذب شده از نیروهای جانبی مثل زلزله را در پی دارد. با استفاده از سیستم‌های سازه‌ی مصالح کم‌وزن ولی مقاوم، تأثیر نیروی زلزله کاهش داده می‌شود، راهبرد اخیر، کاربرد مصالح سبک را به عنوان اعضاء سازه‌ی می‌طلبید و به اقتصادی شدن اجرای ساختمان منجر می‌شود.

همچنین ساخت و بهره‌برداری ساختمان‌های فولادی و بتنی فعلی به عنوان عاملی مهم در تولید گازهای گلخانه‌ی و سایر پسماندهای جامد و گازی هستند. بنابراین در صنعت ساختمان‌سازی، مصالح ساختمانی و روش ساختی باید انتخاب شوند که علاوه بر تأمین خصوصیات سازه‌ی مورد نظر، مصرف انرژی در تولید مصالح و ساخت ساختمان در آنها به میزان کمینه بوده و همچنین تولید گازهای گلخانه‌ی و

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۴۰۰/۷/۱۷، پذیرش ۱۴۰۰/۷/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2021.57620.2920

آثار زیست محیطی کمتری داشته باشد. پل CLT<sup>۱</sup> نوعی چوب مهندسی شده<sup>۲</sup> است، که با اتصال لایه‌های متعامد الوارهای چوبی بر روی یکدیگر و تشکیل یک پل چندلایه ساخته می‌شود. پل‌های CLT نسبت مقاومت به وزن بالایی دارند، در نتیجه با آن می‌توان به ساختمان‌های سبک‌تر با عملکرد سازه‌ی قابل رقابت با ساختمان‌های فولادی و بتنی دست یافت. از پل‌های CLT می‌توان در سازه‌ها به عنوان دیوارهای باربر و غیرباربر، کف‌ها و سقف‌ها استفاده کرد.

به طور کلی با استفاده از پل‌های CLT به جای مصالح متداول فولادی و بتنی، می‌توان به سازه‌های با تولید گازهای گلخانه‌ی و آلودگی زیست محیطی و صوتی کمتر برای تولید مصالح و ساخت سازه، مصرف انرژی کمتر، وزن کمتر، سرعت اجرای بالا، نیاز به ماشین‌آلات و پرسنل متخصص کمتر و قابلیت تجدیدپذیری منابع دست یافت. پژوهش‌های زیادی درباره‌ی عملکرد پل‌های CLT طی دهه‌ی اخیر در دنیا انجام شده است. در ادامه، به مهم‌ترین پژوهش‌ها در رابطه با پل‌های CLT و مرتبط با پژوهش حاضر پرداخته شده است. سکوتی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، جهت

بررسی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های بلندمرتبه‌ی چوبی، سازه‌ی ۷ طبقه با استفاده از پنل‌های CLT ساختند و آن را روی میز لرزه‌ی در مرکز تحقیقاتی مهندسی زلزله در ژاپن آزمایش کردند. با آزمایش اخیر، هیچ خرابی سازه‌ی در هیچ کدام از اجزاء سازه مشاهده نشده است.<sup>[۱]</sup>

پوپسکی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، جهت بررسی عملکرد لرزه‌ی سیستم متشکل از پنل قائم CLT و اتصال‌های مرتبط، چند آزمایش با اعمال بارگذاری چرخه‌ی طبق پروتکل بارگذاری CUREE<sup>۵</sup> با کنترل جابه‌جایی، روی پنل‌های قائم CLT با ابعاد و اتصال‌های مختلف انجام دادند. اتصال‌ها در محل اتصال قسمت پایینی پنل‌های قائم به تیر فولادی به کار برده شده بودند. طبق نتایج، تغییر شکل اتصال‌ها و رفتار راکینگ<sup>۶</sup> دیوار بیشترین سهم را در اتلاف انرژی سیستم داشته است. از مطالعه‌ی اخیر نتیجه گرفته شد که می‌توان رفتار پنل‌های قائم CLT را با تقریب مناسبی نسبتاً صلب در نظر گرفت. بنابراین اتصال‌ها، نقش اصلی در شکل‌پذیری و استهلاک انرژی سیستم دیوار CLT را دارند.<sup>[۲]</sup>

اشنایدر<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، نیز جهت بررسی رفتار سیستم‌های دیوار برشی CLT در طول زلزله، عملکرد لرزه‌ی اتصال‌های بین پنل‌های دیوار برشی و قاب فولادی را تحت بارهای زلزله و در دو حالت بارگذاری قائم و افقی بررسی کردند. شش اتصال شامل ترکیب ۲ براکت و ۵ نوع اتصال‌دهنده تحت بارگذاری تک‌جهته و چرخه‌ی در جهت‌های موازی و عمود بر جهت الوار لایه‌ی خارجی پنل‌های CLT آزمایش شدند و منحنی‌های بار-لغزش تک‌جهته و حلقه‌های هیستریزیس به دست آورده شدند.<sup>[۳]</sup> شن<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، رفتار لرزه‌ی دیوار برشی CLT را به صورت عددی بررسی و با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه کرده‌اند. طبق مطالعه‌ی اخیر، بین مدل‌های پیشنهادی برای در نظر گرفتن رفتار اتصال‌ها، مدل تحلیلی<sup>۴</sup> Pinching در مدل‌سازی رفتار اتصال‌ها تحت هر دو بارگذاری چرخه‌ی و استاتیکی رفتار مناسبی نشان داده است.<sup>[۵]</sup>

حسینی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، رفتار بار-لغزش، ظرفیت باربری بیشینه، سختی و مدهای شکست اتصال‌های کف ترکیبی فولاد و CLT را با انجام آزمایش کششی متقارن بر روی سه نوع اتصال مختلف مطالعه کردند.<sup>[۶]</sup>

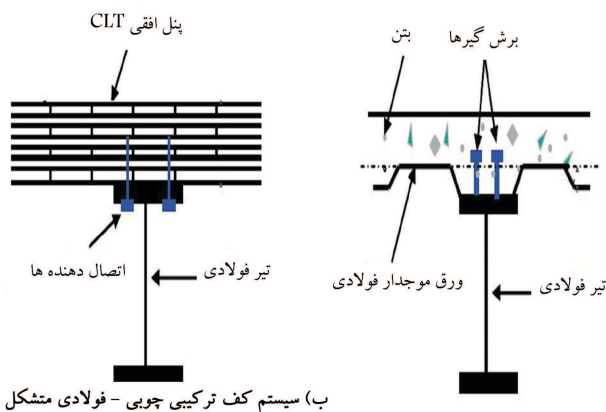
بیشتر مطالعات پیشین جهت بررسی رفتار اتصال‌ها یا بررسی عملکرد سازه‌ی تمام چوبی انجام شده است. در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه‌ی چوبی به علت کرنش جمعی ناشی از خزش<sup>۱۰</sup> چوب، به خصوص در طبقات تحتانی، نشست جمعی رخ می‌دهد. لذا ساختمان چندطبقه نمی‌تواند تمام چوبی باشد.<sup>[۷]</sup> یکی از ایده‌های ارائه شده جهت رفع محدودیت‌های پیش‌روی بلندمرتبه‌سازی در سازه‌های ساخته شده با پنل‌های CLT، طراحی و اجرای یک سیستم ترکیبی فولادی-چوبی بوده است. طرح ارائه شده در پژوهش حاضر به این صورت است که قاب سازه از نوع خمشی فولادی و دیافراگم از پنل CLT بوده است. یعنی تیر و ستون سازه، از نوع فولادی و دیافراگم‌ها، که شامل کف و دیوارهای برشی می‌شوند، از نوع پنل‌های افقی و قائم CLT بوده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، هدف این بوده است که رفتار سازه‌ی ترکیبی با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی فولادی و دیوار برشی CLT در برابر نیروی جانبی بررسی و میزان مصالح مصرفی اعضاء سازه‌ی و رفتار سازه ترکیبی با سیستم مذکور با یک ساختمان با سیستم باربر جانبی قاب خمشی مقایسه شود. به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر، سازه با پلان متقارن سه‌دهانه در دو راستای متعامد در ۶ طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی مختلف به شرح: (الف) سیستم قاب خمشی متوسط و (ب) سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط با دیوار برشی CLT، ابتدا در نرم‌افزار ایتبس<sup>۱۱</sup> طراحی شده است. در ادامه، نیز یک قاب ساختمانی از هر سازه با دو نوع سیستم باربر جانبی مختلف در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱۲</sup> مدل‌سازی و رفتار قاب ۶

طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی مذکور تحت تحلیل بارافزون مقایسه شده است.

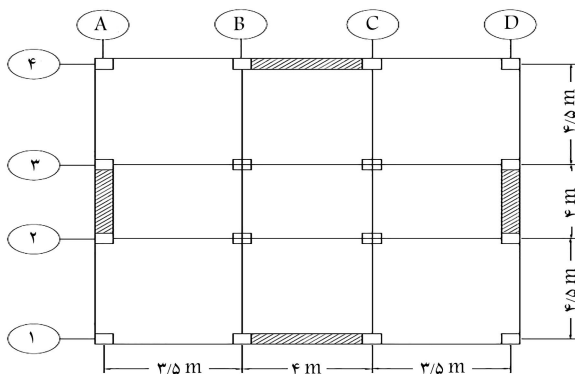
## ۲. مشخصات مدل انتخابی و طراحی آن

مدل استفاده شده در پژوهش حاضر، ساختمان اسکلت فولادی ۶ طبقه بوده است، که با دو نوع سیستم باربر جانبی مختلف به شرح: (الف) سیستم قاب خمشی متوسط فولادی و (ب) سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیوار برشی CLT در دو جهت متعامد طولی و عرضی، با استفاده از نرم‌افزار ایتبس<sup>۱۱</sup>، ۱۵، ۱۰، طراحی شده است. لازم به ذکر است که در کف سازه‌ی نوع الف، از کف کامپوزیت بتنی و در کف و دیوار برشی سازه‌ی نوع ب، از پنل‌های افقی و قائم CLT استفاده شده است. کف کامپوزیت بتن مسلح<sup>۱۳</sup> و سیستم کف ترکیبی چوبی-فولادی<sup>۱۴</sup> به ترتیب استفاده شده در سازه‌های الف و ب در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

مکان ساختمان‌های مورد مطالعه در شهر تهران و کاربری طبقه‌ی همکف ساختمان‌ها، پارکینگ و کاربری طبقات دیگر مسکونی بوده است. ارتفاع کف تا کف طبقات پارکینگ برابر ۲/۸m و ارتفاع طبقات مسکونی برابر ۳/۲m بوده است. پلان ساختمان و موقعیت ستون‌ها و دیوار برشی CLT در شکل ۲ مشاهده می‌شود. برای طراحی قاب سازه‌ها در هر دو سازه‌ی نوع الف و ب از فولاد ST۳۷ و برای طراحی کف کامپوزیت بتنی در ساختمان نوع الف از بتن رده‌ی C۲۵ استفاده شده است. سازه‌ی مذکور در منطقه با خطر نسبی لرزه‌ی بسیار زیاد و روی خاک نوع II استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۸]</sup> واقع شده بود. این ساختمان مطابق میحث ششم مقررات ملی



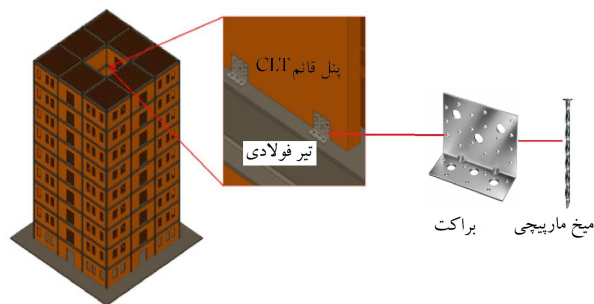
شکل ۱. سیستم‌های سازه‌ی کف ترکیبی.



شکل ۲. پلان سازه‌های مورد مطالعه و موقعیت دیوار برشی در سازه‌ی ب.

جدول ۱. خلاصه‌ی بارهای ثقلی اعمال شده در سازه‌ها.

موقعیت	شدت بار مرده‌ی کف‌سازی ( $\frac{Kg}{m^2}$ )	بار مرده‌ی خطی دیوارهای پیرامونی ( $\frac{Kg}{m}$ )	بار زنده ( $\frac{Kg}{m^2}$ )	بار معادل تیغه‌ها ( $\frac{Kg}{m^2}$ )
بام	۲۵۰	-	۱۵۰	-
طبقات مسکونی	۲۱۰	-	۲۰۰	۱۱۰
پارکینگ	-	-	۳۰۰	۱۰۰
دیوار جانبی بدون نما	-	۶۵۰	-	-
دیوار جانبی با نما	-	۵۷۰	-	-
جان پناه	-	۲۴۵	-	-



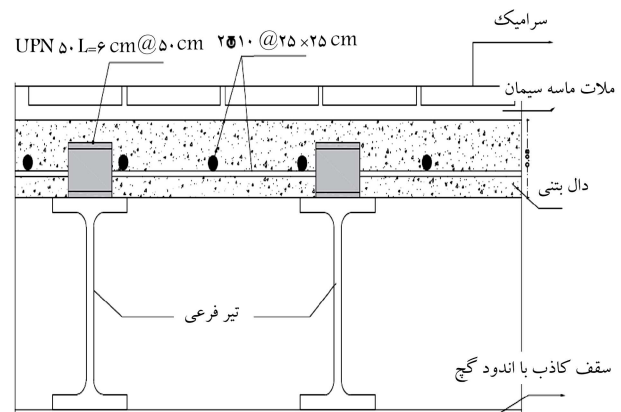
شکل ۵. نحوه‌ی اتصال قاب فولادی به پنل قائم CLT.<sup>[۴]</sup>

باید توسط اتصال‌های بین پنل‌های قائم CLT و قاب فولادی تأمین شود.<sup>[۱۰]</sup> با توجه به نتایج آزمایش‌های پوبوسکی،<sup>[۲]</sup> اشنایدر<sup>[۴]</sup> و مطالعه‌ی شن،<sup>[۵]</sup> بر روی پنل‌های قائم CLT با اتصال‌های مختلف، سیستم پنل قائم CLT با اتصال براکت فولادی L شکل با نام تجاری SIMPSON StrongTie و به ابعاد  $۹۰ \times ۴۸ \times ۳ \times ۱۱۶$  و با میخ‌های مارپیچی به قطر  $۳/۸$  mm و طول ۸۹ mm در مقایسه با سایر اتصال‌های شکل‌پذیری، مقاومت، انرژی جذب شده و در نتیجه عملکرد لرزه‌یی مناسب‌تری داشته و همچنین نوع خرابی اتصال مذکور شکل‌پذیر بوده است.<sup>[۵]</sup> بنابراین در پژوهش حاضر، از اتصال اخیر برای متصل کردن قاب فولادی به پنل قائم CLT استفاده شده است، که در آن، یک طرف براکت با ۱۸ میخ مارپیچی به پنل قائم CLT و طرف دیگر براکت با سه پیچ مهره‌دار به قطر  $۱۲/۷$  mm به قاب فولادی متصل شده است. نحوه‌ی اتصال براکت مذکور به قاب فولادی و پنل قائم CLT در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

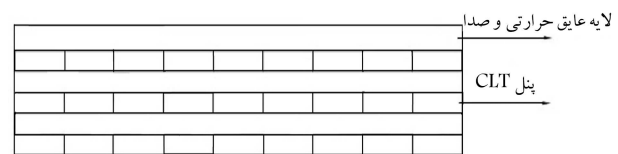
همچنین یک فاصله<sup>۱۶</sup> بین پنل قائم CLT و قاب فولادی جهت تغییرشکل براکت و شکل‌پذیری در نظر گرفته شده است. لذا جهت تعیین فاصله‌ی اتصال مذکور در سازه و همچنین فاصله میان قاب فولادی و پنل قائم CLT، روی قاب یک طبقه‌ی یک‌دهانه، تحلیل پارامتریک انجام شده است.

مشخصات پنل‌های افقی و قائم CLT استفاده شده در سازه‌های با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی فولادی متوسط و دیواربرشی CLT بر اساس آیین‌نامه‌ی NDS ۲۰۱۵ و الوار پنل‌ها از نوع SPF<sup>۱۷</sup> بوده است. در سازه‌ی مذکور برای کف از پنل سه‌لایه‌ی CLT نوع  $V_2$  با ضخامت ۱۰۵ mm، برای دیواربرشی طبقه‌های اول تا سوم از پنل پنج‌لایه‌ی CLT نوع  $E_1$  با ضخامت ۱۷۵ mm و برای دیواربرشی طبقه‌های چهارم تا ششم از پنل سه‌لایه‌ی CLT نوع  $E_1$  با ضخامت ۱۰۵ mm استفاده شده است. مقادیر مشخصات مکانیکی دو نوع الوار چوبی مذکور پنل CLT بر اساس آیین‌نامه‌ی NDS در جدول ۲ ارائه شده است، که در آن،  $E$  مدول کشسانی،  $f_t$  مقاومت کششی و  $f_c$  مقاومت فشاری است.

همچنین در مطالعه‌ی حاضر برای طراحی سازه‌های متشکل از پنل‌های CLT



شکل ۳. جزئیات اجرایی کف کامپوزیت بتنی.



شکل ۴. جزئیات اجرایی کف طبقات متشکل از پنل افقی CLT.

ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ بارگذاری شده است. جزئیات اجرایی کف کامپوزیت بتنی و کف متشکل از پنل افقی CLT به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. بارهای ثقلی اعمال شده در سازه، شامل: بار زنده‌ی طبقات، بار مرده‌ی کف‌سازی، بار مرده‌ی دیوارهای پیرامونی و همچنین بار معادل دیوارهای جداکننده بر اساس جزئیات متداول اجرایی در کشور در هر دو سیستم باربر جانبی مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. آیین‌نامه‌های استفاده شده در طراحی سازه‌ها، شامل: مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه‌های تحلیل و طراحی سازه‌های چوبی از جمله آیین‌نامه‌ی NDS<sup>۱۵</sup> آمریکا<sup>[۹]</sup> و آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های چوبی ایران هستند.

در پژوهش حاضر، طراحی سازه‌ی فولادی طبق روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD)، بر اساس روش تحلیل مستقیم و طیف طرح استاندارد تحلیل طیفی برای آنالیز دینامیکی طبق استاندارد ۲۸۰۰ و با استفاده از نرم‌افزار ایتبس ۱۵، انجام شده است.<sup>[۹-۷]</sup>

در مطالعه‌ی حاضر، برای اتصال کف متشکل از پنل افقی CLT به قاب فولادی با توجه به نتایج آزمایش‌های حسنیه و همکاران،<sup>[۶]</sup> از پیچ‌های خودکار شش ضلعی S ۱۶ با قطر ۱۶ mm استفاده شده است.

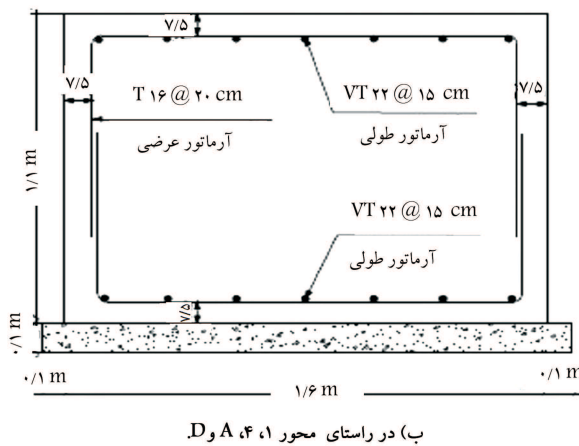
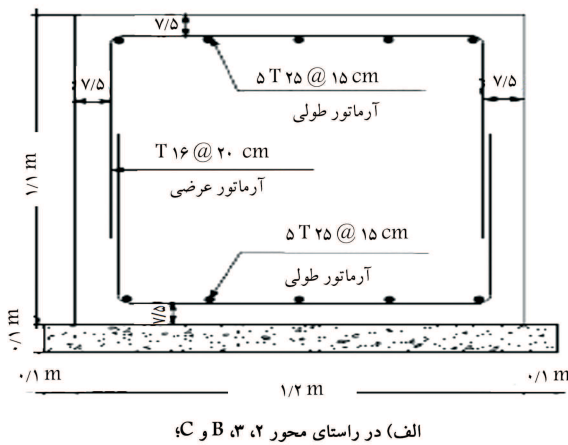
با توجه به این‌که در سازه‌های متشکل از پنل‌های CLT، پنل‌های قائم رفتار نسبتاً صلبی دارند، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی سازه جهت عملکرد لرزه‌یی مناسب

جدول ۲. مقادیر مشخصات مکانیکی دو نوع الوار پل CLT [۹]

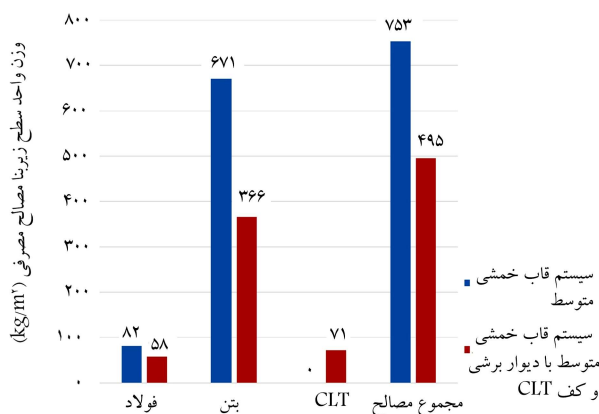
مشخصات مکانیکی در جهت موازی با جهت الوار				
نوع الوار چگالی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$E_o$ (MPa)	$f_{t,o}$ (MPa)	$f_{c,o}$ (MPa)	
$E_1$	۵۶۰	۱۵/۴	۱۹/۳	
$V_2$	۴۲۰	۵/۵	۱۱/۵	
مشخصات مکانیکی در جهت عمود بر جهت الوار				
نوع الوار چگالی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$E_o$ (MPa)	$f_{t,o}$ (MPa)	$f_{c,o}$ (MPa)	
$E_1$	۵۶۰	۳/۲	۹	
$V_2$	۴۲۰	۳/۲	۹	

جدول ۳. مقادیر مشخصات مکانیکی پل‌های چندلایه‌ی CLT

پل CLT	$f_{t,o}$ (MPa)	$f_{c,o}$ (MPa)
پل سه لایه با الوار $E_1$	۳۰/۷۰	۳۸/۴۸
پل پنج لایه با الوار $E_1$	۳۱/۲	۳۸/۸۵
پل سه لایه با الوار $V_2$	۱۱/۸۶	۲۴/۷۹
پل CLT	$f_{t,o}$ (MPa)	$f_{c,o}$ (MPa)
پل سه لایه با الوار $E_1$	۲۸/۱۴	۳۵/۲۷
پل پنج لایه با الوار $E_1$	۲۸/۶۷	۳۵/۹۴
پل سه لایه با الوار $V_2$	۳۵/۸۲	۴۶/۶۶



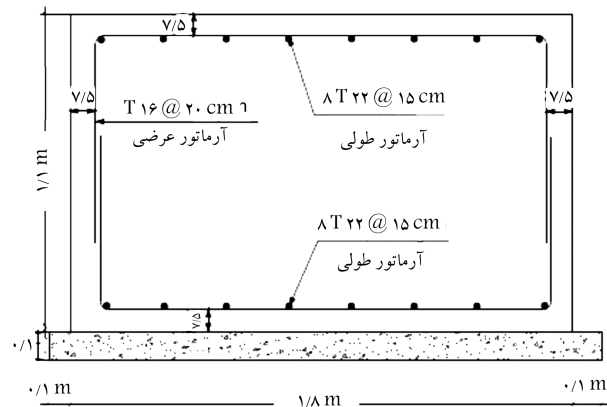
شکل ۷. مقطع پی نواری در سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی.



شکل ۸. میزان مصالح مصرفی در طراحی اعضاء سازه‌ی سازه‌ی ۶ طبقه با دو نوع سیستم مختلف.

Box و در طبقه‌های چهارم تا ششم از نوع مقطع  $20 \times 20 \times 1/2$  بوده است. مقطع تیرهای اصلی فولادی سازه با دو نوع سیستم مذکور با توجه به شماری دهانه‌های پلان شکل ۲ در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. مقطع تمام تیرهای کامپوزیت فولادی در سازه با هر دو سیستم مذکور IPE۱۴۰ بوده است.

میزان مصالح مصرفی در واحد سطح زیرینا در اعضاء سازه‌ی ساختمانی ۶ طبقه با سیستم‌های باربر جانبی مذکور در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. مقطع پی نواری در سازه با سیستم قاب خمشی.

از روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) آیین‌نامه‌ی NDS آمریکا و مشخصات مکانیکی پل‌های چندلایه‌ی CLT از روش مقاومت و سختی مؤثر، که بر اساس بسط تئوری مرکب<sup>۱۸</sup> است، مطابق جدول ۳ محاسبه شده است.<sup>[۹]</sup>

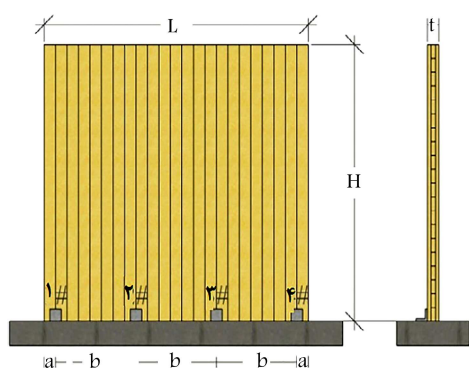
مقطع پی‌های نواری طراحی شده در هر دو جهت در سازه با دو نوع سیستم باربر مذکور در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.

مقطع ستون‌های فولادی طراحی شده در سازه با سیستم قاب خمشی متوسط در طبقه‌های اول و دوم از نوع مقطع  $30 \times 30 \times 2/5$ ، در طبقه‌های سوم و چهارم از نوع مقطع  $25 \times 25 \times 2$  و در طبقه‌های پنجم و ششم از نوع مقطع  $20 \times 20 \times 2$  و در سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیوار برشی CLT در طبقه‌های اول تا سوم از نوع مقطع  $25 \times 25 \times 2$



جدول ۴. مقاطع طراحی شده تیرهای اصلی سازه ۶ طبقه با سیستم قاب خمشی متوسط.

شماره دهانه	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم	طبقه ششم
A۱-B۱	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۱۸۰
B۱-C۱	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۴۰
C۱-D۱	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۱۸۰
A۲-B۲	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
B۲-C۲	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
C۲-D۲	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
A۳-B۳	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
B۳-C۳	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
C۳-D۳	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
A۴-B۴	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۱۸۰
B۴-C۴	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۴۰
C۴-D۴	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۱۸۰
A۱-A۲	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
A۲-A۳	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۰۰	IPE۲۰۰	IPE۲۰۰	IPE۱۸۰
A۳-A۴	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
B۱-B۲	IPE27۰	IPE27۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰
B۲-B۳	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰	IPE۱۸۰
B۳-B۴	IPE27۰	IPE27۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰
C۱-C۲	IPE27۰	IPE27۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰
C۲-C۳	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰	IPE۱۸۰
C۳-C۴	IPE27۰	IPE27۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۴۰	IPE۲۰۰
D۱-D۲	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰
D۲-D۳	IPE۲۲۰	IPE۲۲۰	IPE۲۰۰	IPE۲۰۰	IPE۲۰۰	IPE۱۸۰
D۳-D۴	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۷۰	IPE۲۲۰	IPE۱۸۰



$L=2300 \text{ mm}$  ,  $H=2300 \text{ mm}$  ,  $b=710 \text{ mm}$  ,  $a=85 \text{ mm}$

شکل ۹. مشخصات و ابعاد پنل CLT و مکان اتصالها.[۵]

### ۳. درستی آزمایشی و مدل سازی عددی

در بخش حاضر، صحت سنجی رفتار سیستم متشکل از پنل قائم CLT و اتصالات آن به قاب فولادی ارائه شده است. اساس صحت سنجی حاضر بر مبنای منحنی رفتاری هیستریزیس سیستم پنل قائم CLT حاصل از آزمایش پوپسکی و همکاران،<sup>[۲]</sup> با اتصال براکت با ابعاد  $90 \times 48 \times 3 \times 116$  و با میخ های مارپیچی به قطر  $3/8 \text{ mm}$  و طول  $89 \text{ mm}$  تحت بارهای گسترده ی یکنواخت قائم مختلف با سه حالت بدون بار قائم، بارهای  $10$  و  $20 \text{ (kN/m)}$  بوده است. در آزمایش مذکور، پنل قائم CLT به طول و عرض  $2/3 \text{ m}$  و ضخامت  $94 \text{ mm}$  با ۴ اتصال در طول تیر فولادی پایین دیوار بوده است، که در شکل ۹ مشاهده می شود.<sup>[۲]</sup>

پنل سه لایه ی CLT با المان پوسته یی SFR<sup>۱۹</sup>،<sup>[۲]</sup> در نرم افزار آباکوس

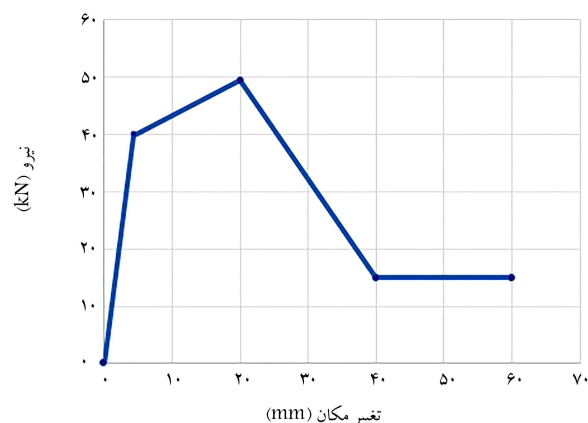
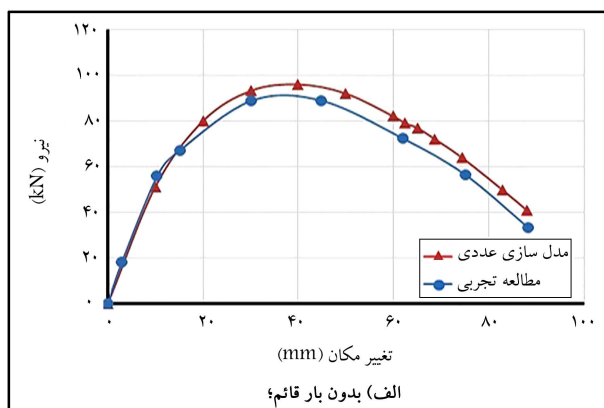
جدول ۵. مقاطع طراحی شده‌ی تیرهای اصلی سازه‌ی ۶ طبقه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیواربرشی CLT.

شماره دهانه	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم	طبقه ششم
A۱-B۱	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۱-C۱	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
C۱-D۱	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
A۲-B۲	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۲-C۲	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
C۲-D۲	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
A۳-B۳	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۳-C۳	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
C۳-D۳	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
A۴-B۴	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۴-C۴	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰
C۴-D۴	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
A۱-A۲	IPE۱۴۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
A۲-A۳	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰
A۳-A۴	IPE۱۴۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۱-B۲	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۶۰
B۲-B۳	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
B۳-B۴	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۶۰
C۱-C۲	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۶۰
C۲-C۳	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
C۳-C۴	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۸۰	IPE۱۶۰
D۱-D۲	IPE۱۴۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰
D۲-D۳	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰	IPE۱۴۰
D۳-D۴	IPE۱۴۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۶۰	IPE۱۴۰

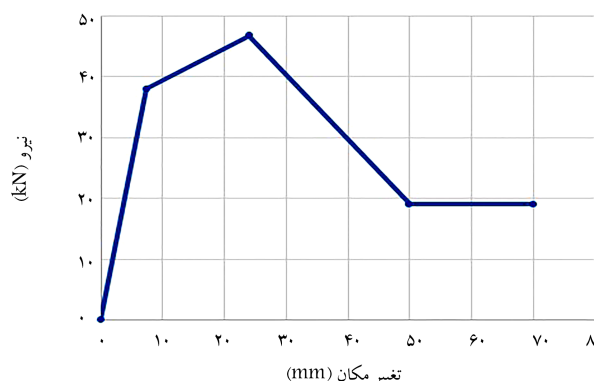
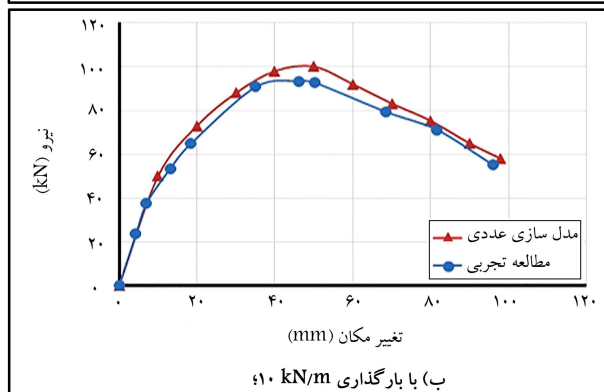
آزمایش‌های اشنایدر و همکاران،<sup>[۴]</sup> روی اتصال به ترتیب تحت بارگذاری‌های قائم و افقی و همچنین براساس ربع اول مدل رفتاری پیشنهادی ۴ Pinching توسط شن و همکاران،<sup>[۵]</sup> بوده است.

مشخصات مدل چهارخطی فنرهای محوری و برشی با یک فرایند سعی و خطا طوری به دست آورده شده است، که پوش سیستم پانل قائم CLT با اتصال مدل‌سازی شده، بیشترین مطابقت را با backbone منحنی هیستریزس آزمایش دیوار با اتصال مورد نظر تحت بارهای گسترده‌ی یک‌نواخت قائم مختلف داشته باشد.

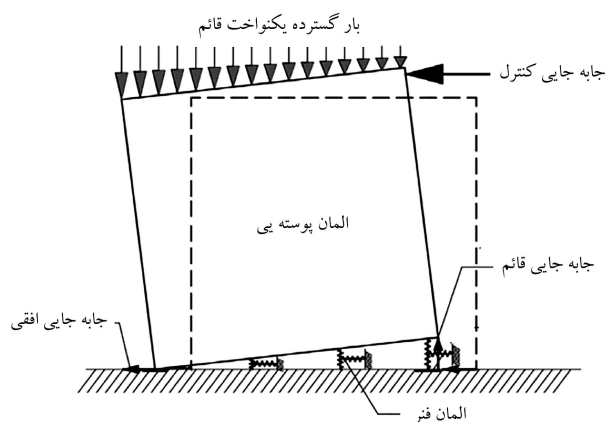
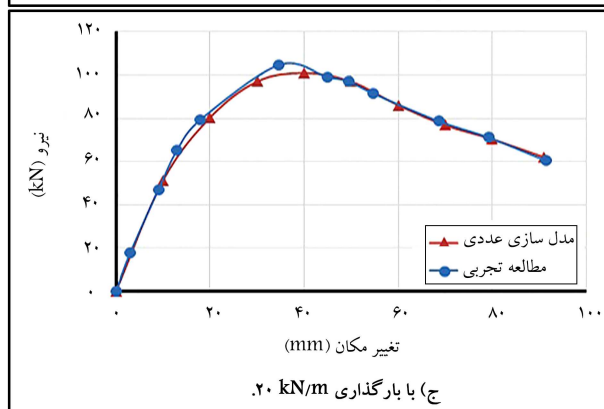
مدل‌سازی شده است. راهکار پیشنهادی جهت مدل‌سازی اتصال‌های بین پانل قائم CLT و قاب فولادی، معادل‌سازی رفتار اتصال‌ها با استفاده از فنرهای غیرخطی بوده است. برای مدل‌سازی رفتار اتصال از فنر دورانی به دلیل قرارگیری اتصال‌دهنده‌ها، مانند پیچ‌ها و میخ‌ها نزدیک به هم در اتصال و نیز ابعاد کوچک اتصال‌ها نسبت به اندازه‌ی پانل‌ها، صرف‌نظر و برای مدل‌سازی رفتار هر اتصال از دو فنر محوری و برشی استفاده شده است. مدل رفتاری فنر محوری و برشی اتصال مورد نظر با توجه به منحنی backbone ربع اول چرخه‌ی اول منحنی هیستریزس حاصل از نتایج



شکل ۱۰. نمودار چهارخطی مدل رفتار کششی اتصال.



شکل ۱۱. نمودار چهارخطی مدل رفتار برشی اتصال.



شکل ۱۲. نحوه ی مدل سازی سیستم پنل قائم CLT به همراه اتصال [۵]

شکل ۱۳. مقایسه ی نمودار بارافزون پنل CLT حاصل از مدل سازی عددی و مطالعه ی تجربی [۲]

از مطالعه ی تجربی با سه حالت بارگذاری گسترده ی یکنواخت قائم مشاهده می شود، که مطابق آن نتایج به دست آمده از نرم افزار، با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارد، که بیانگر صحت نتایج به دست آمده از مدل سازی در نرم افزار است.

#### ۴. مدل سازی عددی و تحلیل سازه ها

##### ۴.۱. تحلیل پارامتریک قاب فولادی یک طبقه ی یک دهانه با پنل

##### قائم CLT

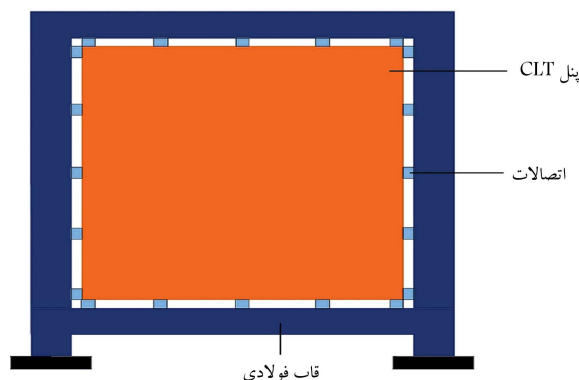
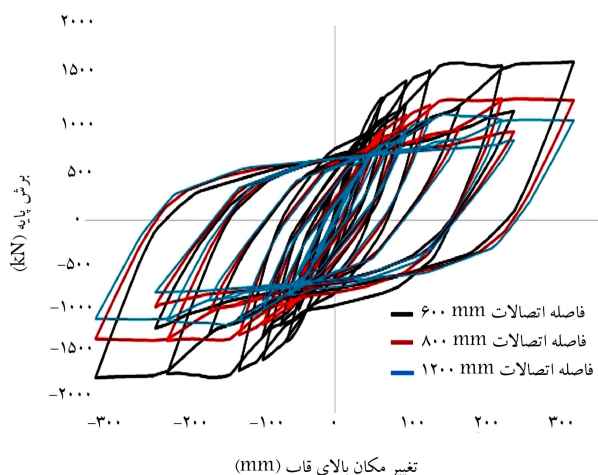
در بخش حاضر، رفتار جانبی سیستم ترکیبی قاب خمشی فولادی با پنل قائم CLT بررسی شده است. تحلیل پارامتریک روی مدل عددی قاب فولادی یک طبقه ی یک

نمودار چهارخطی مدل رفتاری فشر محوری و برشی جهت مدل سازی رفتار کششی و برشی اتصال مورد نظر به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ و نیز نحوه ی مدل سازی سیستم پنل قائم CLT به همراه اتصال مورد نظر در نرم افزار آباکوس در شکل ۱۲ مشاهده می شوند.

پس از مدل سازی پنل قائم CLT به همراه اتصال در نرم افزار آباکوس، تحلیل بارافزون به صورت جابه جایی کنترل انجام و نمودار بارافزون پنل قائم CLT تحت بارگذاری گسترده ی یکنواخت قائم مختلف استخراج و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۱۳، مقایسه ی نمودار بارافزون سیستم پنل قائم CLT حاصل از مدل سازی عددی حاضر و نمودار backbone منحنی هیستریزیس حاصل

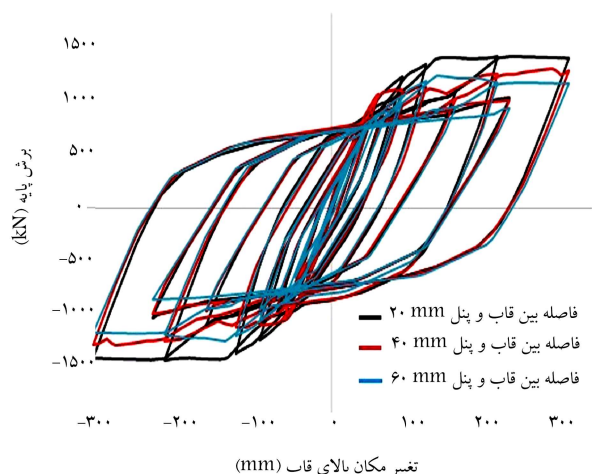
جدول ۶. مقادیر پارامترهای بررسی شده در تحلیل پارامتریک.

فاصله‌ی اتصال‌ها (mm)	فاصله‌ی بین قاب فولادی CLT و پنل (mm)
۶۰۰	۲۰
۸۰۰	۴۰
۱۲۰۰	۶۰



شکل ۱۴. قاب فولادی یک طبقه‌ی یک دهانه با پنل قائم CLT.

شکل ۱۵. اثر فاصله‌ی اتصال‌های قاب و پنل CLT روی منحنی هیستریزس قاب.



شکل ۱۶. اثر فاصله بین قاب و پنل CLT روی منحنی هیستریزس قاب.

فاصله‌ی اتصال‌های پنل قائم CLT به قاب فولادی برابر ۶۰۰ mm و فاصله‌ی بین قاب فولادی و پنل قائم CLT برابر ۲۰ mm بوده است.

## ۲.۴. تحلیل سازه‌ها و مشخصات مدل‌های عددی مطالعه شده

در بخش کنونی به تبیین مشخصات، نحوه‌ی مدل‌سازی، و نتایج تحلیل بارافزون مدل‌های عددی مورد مطالعه در نرم‌افزار آباکوس ۲، ۱۴، ۶ پرداخته شده است. سازه‌های طراحی شده، شامل ساختمان اسکلت فولادی ۶ طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی مختلف بودند، که در بخش حاضر مورد تحلیل بارافزون قرار گرفته‌اند. به دلیل حجم بالای مدل سازه و با توجه به تقارن پلان سازه تصمیم گرفته شد یک قاب از هر سازه با دو نوع سیستم مذکور با موقعیت ردیف شماره‌ی یک پلان شکل ۲ تحلیل شود. در نهایت، منحنی‌های بارافزون هر یک از سازه‌ها با دو نوع سیستم باربر

دهانه با پنل قائم CLT به طول و عرض ۲۴۰ cm مطابق شکل ۱۴ به صورت جابه‌جایی کنترل تیر بالای قاب تحت بار چرخه‌ی ۲° با تغییر در مقادیر پارامترهای مدل، مانند فاصله‌ی اتصال‌ها و فاصله‌ی بین قاب فولادی و پنل CLT، مطابق جدول ۶ با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

در مطالعه‌ی پارامتریک حاضر، اتصال پنل CLT به قاب مطابق شکل ۵ و پنل CLT مطابق آیین‌نامه‌ی NDS، پنج‌لایه نوع E۱ و با ضخامت ۱۷۵ mm بوده است. تیر و ستون به ترتیب از نوع پروفیل‌های IPE۲۴۰ و IPB۳۰۰ از نوع فولاد ST ۳۷ بوده است، که با آیین‌نامه‌ی S۴R [۱۲] و پنل CLT با آیین‌نامه‌ی C۳DAR [۲۱]، [۱۲] به صورت یک آیین‌نامه‌ی شش‌وجهی ۸ گره‌ی در نرم‌افزار مدل‌سازی، همچنین رفتار کششی و برشی اتصال‌های پنل CLT به قاب با فنرهای غیرخطی محوری و برشی مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ معادل‌سازی شده است.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب اثر تغییر در فاصله‌ی اتصال‌ها و اثر تغییر در فاصله‌ی بین قاب و پنل CLT روی منحنی هیستریزس قاب مورد نظر مشاهده می‌شود. در بخش کنونی، ابتدا تحلیل قاب با مقدار ثابت فاصله بین قاب و پنل CLT به اندازه‌ی ۲۰ mm و تغییر در فاصله‌ی اتصال‌ها انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل با فاصله‌ی اتصال‌های ۶۰۰ mm، ظرفیت باربری بالاتر، قابلیت جذب انرژی بیشتر و رفتار مناسب‌تری دارد. در ادامه، برای بررسی اثر فاصله بین قاب و پنل، تحلیل قاب با مقدار ثابت فاصله‌ی اتصال‌ها برابر ۶۰۰ mm و تغییر در فاصله بین قاب و پنل انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی هیستریزس مدل با فاصله بین قاب و پنل CLT برابر ۲۰ mm، حلقه‌های هیستریزس پایدارتر، قابلیت جذب انرژی بیشتر و رفتار مناسب‌تری دارد.

با توجه به نتایج تحلیل پارامتریک مشاهده شد که فاصله‌ی اتصال‌ها و فاصله‌ی بین قاب فولادی و پنل قائم CLT در عملکرد لرزه‌ی، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سیستم ترکیبی قاب با پنل CLT تأثیر می‌گذارد و بهترین رفتار را از بین قاب‌های بررسی شده، سیستم با فاصله‌ی اتصال‌های ۶۰۰ mm و فاصله‌ی بین قاب و پنل CLT به میزان ۲۰ mm داشته است. در سازه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر،

جدول ۷. مقادیر تغییرمکان هدف سازی ۶ طبقه با دو نوع سیستم مختلف.

نوع سیستم باربر جانبی سازه	دوره تناوب (s)	تغییرمکان هدف (cm)
سیستم قاب خمشی متوسط	۱/۶۵	۴۳
سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی	۰/۵۳	۱۳

لازم به ذکر است که بارگذاری ثقلی سازه‌های مدل شده جهت تحلیل بارافزون طبق نشریه‌ی ۳۶۰ و برایش ۹۲ برابر  $(q_d + q_l)$  است، که در آن،  $q_d$  و  $q_l$  به ترتیب بارهای زنده و مرده هستند. تغییرمکان اعمالی جهت تحلیل بارافزون به میزان تغییرمکان هدف به بالاترین طبقه و تغییرمکان‌های اعمالی به سایر طبقات با توزیع مثالی لحاظ شده است. تغییرمکان هدف براساس رابطه‌ی ۱ نشریه‌ی شماره‌ی ۳۶۰، مطابق جدول ۷ محاسبه شده است.

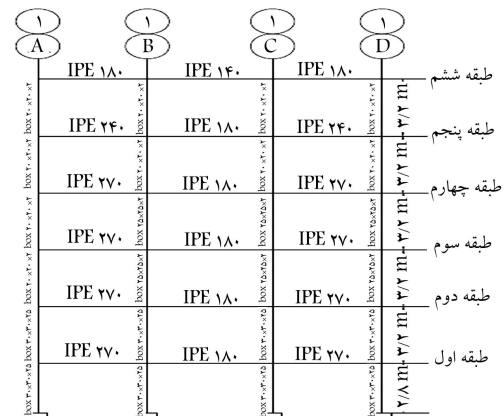
$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_a \cdot \frac{T_e}{4 \pi^2} g \quad (۱)$$

همان‌طور که قبلاً بیان شد، نقش اصلی در شکل‌پذیری و استهلاک انرژی سازه‌های متشکل از پل‌های CLT، بر عهده‌ی اتصال‌هاست و پل‌های قائم CLT در مقابل رفتار اتصال‌های فولادی پل قائم CLT و قاب فولادی، رفتار نسبتاً صلبی دارند؛ بنابراین فرض رفتار کشسان پل‌ها تأثیر چندانی در شکل‌پذیری نخواهد داشت. پس از انجام تحلیل نیز با بررسی و کنترل مقادیر بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در پل‌های CLT با مقادیر تنش مجاز جدول ۳ مشاهده شد که رفتار پل‌ها در محدوده‌ی کشسان قرار دارد. طراحی سازه به صورتی بوده است که اتلاف انرژی در اتصال‌های پل قائم CLT به قاب فولادی رخ دهد و آسیب ماندگاری در پل‌های CLT ایجاد نشود، به همین منظور از محدوده‌ی خمیری اتصال‌هایی که وظیفه‌ی استهلاک انرژی را بر عهده دارند، به گونه‌ای که مانع از آسیب ماندگار به پل‌ها شوند، استفاده شده است. کنترل عدم خرابی اتصال‌های پل قائم CLT و قاب فولادی براساس بررسی معیار بیشینه‌ی جابه‌جایی محوری و برشی اتصال‌ها به ترتیب به میزان ۱۷ و ۲۲ میلی‌متر صورت گرفته است.

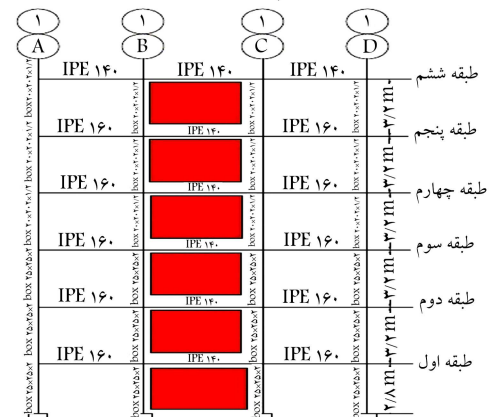
خروجی تنش فون میسر در پایان تحلیل بارافزون مدل عددی قاب ۶ طبقه با دو نوع سیستم با اعمال جابه‌جایی به میزان ۱۵٪ تغییرمکان هدف در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

همچنین به منظور بررسی رفتار دیوار برشی CLT و با توجه به این‌که بیشینه‌ی تنش در دیوار برشی طبقه‌ی اول رخ می‌دهد، توزیع تنش فون میسر دیوار برشی طبقه‌ی اول قاب ۶ طبقه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی CLT با اعمال جابه‌جایی به میزان ۱۵٪ تغییرمکان هدف در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. به علت تماس دو نقطه‌ی گوشه‌ی دیوار برشی با قاب، تنش فشاری بیشینه در قطر دیوار برشی رخ داده و پل قائم CLT به مانند عضو قطری فشاری رفتار کرده است. نمودار بارافزون قاب ۶ طبقه با سیستم قاب خمشی متوسط و با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، سختی اولیه‌ی نمودار بارافزون قاب با سیستم باربر جانبی دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT کمتر از سختی اولیه‌ی نمودار بارافزون قاب با سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط است؛ به دلیل این‌که در سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی، ابعاد مقطع اعضاء فولادی کوچک‌تر بوده و همچنین در تغییرمکان‌های کم، هنوز دیوار برشی CLT به علت فاصله‌ی میان قاب فولادی و دیوار برشی تأثیر چندانی در رفتار سازه نداشته است. ولی با افزایش تغییرمکان و تماس دیوار برشی CLT



الف) با سیستم قاب خمشی متوسط؛



ب) با سیستم دوگانه قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT.

شکل ۱۷. مشخصات قاب فولادی تحلیل شده در آباکوس.

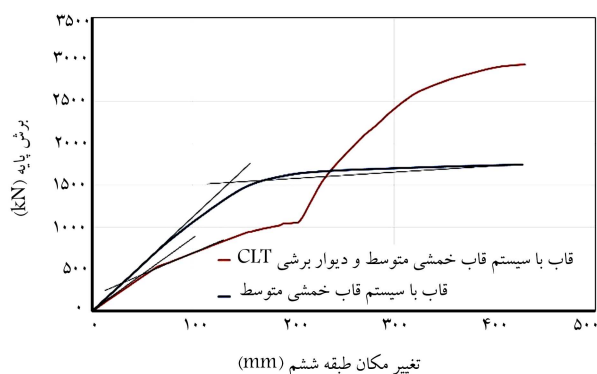
جانبی مختلف رسم و با هم مقایسه شده است. رفتار کششی و برشی اتصال‌های پل قائم CLT به قاب فولادی با توجه به صحت‌سنجی انجام شده، با فرهای غیرخطی محوری و برشی با رفتار مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ معادل‌سازی شده است.

در مدل‌سازی عددی سازه‌های مورد نظر، مشخصات اعضاء سازه‌ی همچون تیر و ستون فولادی و دیوار برشی براساس طراحی صورت گرفته در بخش طراحی سازه‌ها مطابق شکل ۱۷ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی تیر و ستون فولادی با مشخصات فولاد ST۳۷ از آلمان S۴۲R با اندازه‌ی شبکه‌بندی ۱۰۰ mm در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. پل‌های قائم CLT با آلمان C۳۲DAR [۱۲] با اندازه‌ی شبکه‌بندی ۱۰۰ mm و با مشخصات طبق آیین‌نامه‌ی NDS۲۰۱۵، به صورت کشسان در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی تماس بین پل قائم CLT با قاب فولادی با اختصاص رفتار از نوع Hard Contact در جهت عمود بر صفحات در تماس با هم و نوع Tangential در راستای مماسی دو صفحه با ضریب اصطکاک ۰/۳ انجام شده است.



جدول ۸. پارامترهای حاصل از نمودار ایده‌آل شده‌ی دوخطی منحنی بارافزون.

پارامتر	سیستم قاب خمشی	سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی
$V_y$ (KN)	۱۵۵۰	۴۱۰
$\Delta_y$ (mm)	۱۴۵	۵۰
$K_e$ (KN/mm)	۱۰/۶۹	۸/۲
$V_d$ (KN)	۱۷۴۸	۸۳۰
$\mu = \Delta_t / \Delta_y$	۲/۹۷	۲/۶



شکل ۲۰. نمودار بارافزون قاب ۶ طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی مختلف.

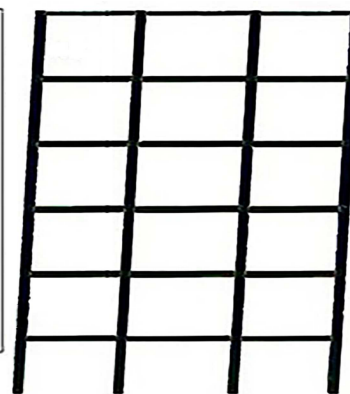
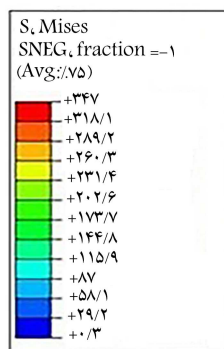
با قاب فولادی، رفتار سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و دیوار برشی به علت سختی پل CLT تغییر یافته و سختی و برش پایه‌ی سازه، افزایش محسوسی داشته است.

پارامترهای حاصل از نمودار ایده‌آل شده‌ی دوخطی منحنی بارافزون با توجه به تغییرمکان هدف، مطابق جدول ۸ محاسبه شده است. با توجه به اینکه اتصال‌ها در سازه‌های متشکل از پل‌های CLT، نقش مهمی در تأمین شکل‌پذیری سازه دارند، نسبت شکل‌پذیری قابل قبولی در سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT مطابق جدول ۸ به دست آمده است.

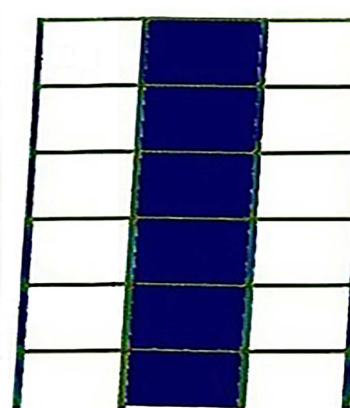
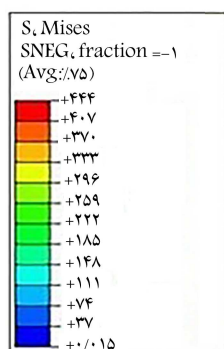
## ۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، ساختمان ۶ طبقه با دو نوع سیستم باربر جانبی، شامل سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی با دیوار برشی CLT و سیستم قاب خمشی متوسط فولادی طراحی و میزان مصالح مصرفی اعضا سازه‌ها با دو نوع سیستم باربر جانبی مذکور مشخص شد. همچنین در ادامه، یک قاب ساختمانی از هر سازه با سیستم‌های باربر جانبی مختلف مدل‌سازی و رفتار قاب ۶ طبقه با هر دو نوع سیستم باربر جانبی مذکور تحت تحلیل بارافزون مقایسه شدند. در ادامه، خلاصه‌ی نتایج مهم به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر در جهت بهره‌گیری از سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیوار برشی CLT ارائه شده است.

۱. وزن مجموع فولاد و بتن مصرفی به عنوان مصالح با آلودگی‌های زیست‌محیطی زیاد در سازه‌ی ۶ طبقه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیوار برشی CLT نسبت به سازه با سیستم قاب خمشی متوسط فولادی ۴۳/۶۷٪ کمتر شده است؛ بنابراین، در سازه با اسکلت فولادی استفاده از سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط با دیوار برشی CLT به جای سیستم

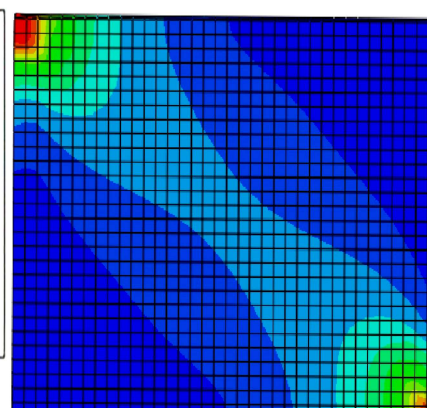
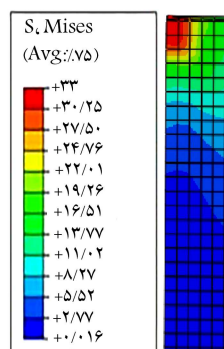


الف) با سیستم قاب خمشی متوسط؛



ب) با سیستم دوگانه قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT.

شکل ۱۸. خروجی تنش فون میسز مدل عددی قاب ۶ طبقه.



شکل ۱۹. توزیع تنش فون میسز دیوار برشی طبقه‌ی اول مدل عددی قاب ۶ طبقه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیوار برشی CLT.

ماشین‌آلات، کارگر متخصص و جلوگیری از خطاهای ساختمانی در محل کارگاه بالا می‌رود.

۴. در سازه‌ی ترکیبی فولادی - چوبی پیشنهادی، با توجه به این‌که پنل‌های قائم CLT به عنوان دیواربرشی داخل دهانه‌های قاب خمشی فولادی قرار می‌گیرند، رفتار شکل‌پذیر قاب خمشی فولادی با رفتار پنل‌های CLT با مقاومت مناسب و سبک ترکیب می‌شود. سیستم سازه‌ی دوگانه‌ی قاب خمشی فولادی متوسط با دیواربرشی CLT نوعی سیستم دوگانه است که در هر جهت سازه به طور هم‌زمان متشکل از قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط همراه با دیوارهای برشی CLT برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی است. بدین ترتیب سختی جانبی این‌گونه سیستم‌ها، مجموع سختی جانبی سیستم قاب خمشی و دیواربرشی CLT است، که این امر باعث کاهش تغییرشکل جانبی سازه خواهد شد، این‌گونه سیستم‌ها برای سازه‌هایی که مشکل کنترل جابه‌جایی طبقات را دارند، بسیار مفید خواهند بود.

۵. اتصال‌ها در سازه‌های متشکل از پنل‌های CLT، نقش اصلی در تأمین شکل‌پذیری و استهلاک انرژی سازه دارند و در مطالعه‌ی حاضر نسبت شکل‌پذیری مناسبی در سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط و دیواربرشی CLT حاصل شد.

۶. با توجه به نیاز روزافزون ایران به استفاده از مصالح جدید، همچون پنل‌های CLT در صنعت ساختمان به دلیل مزایایی همچون عملکرد مناسب، سبکی و آثار زیست‌محیطی از جمله کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی و همچنین وجود مزارع مخصوص تولید چوب مناسب از درختان با قابلیت رشد سریع مانند صنوبر با قابلیت تجدیدپذیری منابع در شمال و شمال غرب کشور، می‌توان با حمایت دولت و توسعه‌ی کارخانه‌های تولیدکننده‌ی چوب‌های مهندسی شده، هزینه‌ی تهیه‌ی پنل‌های CLT را کاهش داد.

قاب خمشی متوسط، از نظر زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به مزایای زیست‌محیطی ساختمان‌های متشکل از پنل‌های CLT، از جمله کاهش مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی همچون تولید گازهای گلخانه‌ای برای تولید مصالح و ساخت سازه، بهبود عملکرد حرارتی ساختمان، قابلیت تجدیدپذیری منابع، کاهش آلودگی صوتی در طول مدت ساخت سازه و کاهش تولید نخاله‌های ساختمانی نسبت به ساختمان‌های فولادی و بتنی متداول، سازه‌های مذکور می‌توانند جایگزین مناسبی برای ساختمان‌های فولادی و بتنی متداول موجود در ایران باشند.

۲. در سازه‌های با سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط و دیواربرشی CLT، با کنترل صلیبیت دیافراگم کف و کنترل ضابطه‌های ۲۵ و ۵۰ درصد طبق استاندارد ۲۸۰۰ نتیجه گرفته شد که کف متشکل از پنل افقی CLT صلب و همچنین سیستم باربر جانبی سازه‌های ذکر شده، از نوع دوگانه‌ی قاب خمشی و دیواربرشی CLT است و پنل‌های قائم CLT به صورت دیواربرشی عمل می‌کنند.

۳. در صورت استفاده از CLT در اعضاء سازه‌ی همچون کف و دیوار برشی در قاب ساختمانی فولادی، علاوه بر تأمین مقاومت ساختمان در مقابل بارهای جانبی لرزه‌ی، وزن ساختمان نیز کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مطالعه‌ی حاضر وزن سازه با سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط فولادی و دیواربرشی CLT نسبت به سازه با سیستم قاب خمشی متوسط فولادی ۲۲/۰۱ درصد کاهش یافته است، در نتیجه نیروی زلزله بر ساختمان به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند. با کاهش وزن ساختمان به کمک استفاده از پنل‌های پیش‌ساخته‌ی CLT به جای عناصر سازه‌ی وزین مانند کف و دیوار، سرعت اجرای ساختمان با حذف بخش‌های قابل توجهی از عناصر نما، نازک‌کاری، و کف‌سازی، کاهش مصالح،

## پانویس‌ها

1. Cross Laminated Timber
2. Engineered Wood Product
3. Ceccotti
4. Popovski
5. consortium of universities for research in earthquake engineering
6. Rocking
7. Schneider
8. Shen
9. Hassanieh
10. Creep
11. ETABS
12. ABAQUS
13. reinforced concrete composite
14. Timber-Steel Composite Floor
15. national design specification for wood construction
16. Gap
17. spruce-pine-fir
18. composite theory

19. 4- node general-purpose shell, with reduced integration
20. cyclic loading
21. 8-node linear brick element, with reduced integration

## منابع (References)

1. Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M. and et al. "SOFIE project -3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(13), pp. 2003-2021 (2013).
2. Popovski, M. and Karacabeyli, E. "Seismic behaviour of cross-laminated timber structures", *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering* (2012).
3. Krawinkler, H., Parisi, F., Ibarra, L. and et al. "Development of a testing protocol for wood frame structures", *CA: CUREE*, **102**, Richmond (2001).

4. Schneider, J., Karacabeyli, E., Popovski, M. and et al. "Damage assessment of connections used in cross-laminated timber subject to cyclic load", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **28**(6), A4014008 (2013).
5. Shen, Y.L., Schneider, J., Tesfamariam, S. and et al. "Hysteresis behavior of bracket connection in cross-laminated-timber shear walls", *Construction and Building Materials*, **48**, pp. 980-991 (2013).
6. Hassanieh, A., Valipour, H.R. and Bradford, M.A. "Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections?", *Journal of Constructional Steel Research*, **122**, pp. 110-121 (2016).
7. Gagnon, S. and Pirvu, C. "CLT handbook-canadian edition", *Library and Archives Canada Cataloguing in Publication*, Quebec, Canada (2011).
8. "Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings: Standard No. 2800", *4rd edition, Building and Housing Research Center* (2014).
9. American national standards institute, and American forest & paper association, "NDS: national design specification for wood construction", *2015 edition (revised standard): American forest & paper association* (2015).
10. Schneider, J., Shen, Y., Stierner, S.F. and et al. "Assessment and comparison of experimental and numerical model studies of cross-laminated timber mechanical connections under cyclic loading", *Construction and Building Materials*, **77**, pp. 197-212 (2015).
11. Blass, H.J. and Fellmoser, P. "Design of solid wood panels with cross layers", *In 8th World Conference on Timber Engineering* (2004).
12. ABAQUS Version 6.14, "Analysis User's Manual, Dassault Systemes", SIMULIA (2014).