دانشگاه سمنان

سیستم های مقاوم سازه ای در ساختمان های بلند

مؤلفان:

دکتر علی خیرالدین

استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

مهندس سیما آرامش

چاپ دوم

پیشگفتار

امروزه با توجه به کمبود زمین در شهرهای بزرگ و افزایش روز افزون جمعیت، ساختمان های بلند جایگاه ویژه ای پیدا کرده اند. از طرفی شکل و نمای ساختمان های بلند با گذشته تفاوت دارد و اگر این تغییرات در آینده نیز ادامه یابد، دیری نمی پاید که بشر رؤیای ساخت ساختمان هایی به ارتفاع یک مایل را تحقق بخشد.

از نظر سازه ای، تعاریف متفاوتی برای ساختمان های بلند وجود دارد. عده ای ساختمانی را بلند می گویند که ارتفاع آن باعث شود، نیروهای جانبی (باد و زلزله) بر طراحی آن اثر قابل توجهی گذارند و یا سازه‌ای را که پریود آن از ۰/۷ ثانیه بیشتر باشد؛ سازه بلند می‌دانند. برخی هم نسبت ارتفاع به بعد سازه را ملاک این طبقه‌بندی دانسته و نسبتهای ارتفاع به بعد $1/5\pi$، π، $\pi/2$ و $\pi/3$ را به ترتیب مربوط به سازه بسیار بلند، بلند، متوسط و کوتاه می‌دانند. لذا باید تأثیر این عوامل از ابتدای مراحل طراحی در نظر گرفته شود.

سازه های بلند باید علاوه بر اینکه از نظر ایمنی، شرایط کارائی، بهره برداری و آسایش تأمین باشند، باید از نظر فضایابی و زیبایی نیز مشکل نداشته و به گونه ای باشند که ابتدا فرم سازه از طریق معماران و مهندسین ارائه شود و سپس طبق آن فرم، طراحی آغاز گردد. اهمیت اثر نیروهای جانبی با افزایش ارتفاع ساختمان به سرعت افزایش می یابد. در سازه های بلند تغییر مکان جانبی ساختمان چنان زیاد می شود که ملاحظات سختی کنترل کننده طرح می گردند تا این که مقاومت مصالح سازه ای. میزان سختی اساساً بستگی به نوع سیستم سازه ای دارد. به علاوه بازده هر سیستم سازه ای مستقیماً با مقدار مصالح مصرف شده ارتباط دارد؛ بنابراین جهت بهینه کردن سازه باید با حداقل وزن، حداکثر سختی حاصل گردد. این امر منجر به ابداع سیستم های سازه ای مناسب برای هر محدوده ارتفاعی معین می گردد.

یک دیدگاه مهم در طراحی ساختمان های بلند، تغییر فرم ساختمان ها به شکل های صلب تر و پایدار تر است که تغییرمکان را محدود می کند و پایداری را افزایش می دهد. به طور کلی رفتار ساختمان ها و آسیب پذیری آنها در طول زلزله به شکل، اندازه، فرم کلی و همچنین نحوه انتقال نیروهای جانبی به زمین بستگی دارد. با توجه به مطالعات انجام گرفته بر روی آسیب پذیری ساختمان ها با فرم های متفاوت در پلان و ارتفاع، مشخص می شود که هر چه پیکربندی سازه، ساده تر و متقارن تر باشد، در اثر زلزله عملکرد مطلوب تری داشته و در نتیجه آسیب پذیری کمتری خواهد داشت. از طرفی با توجه به اهمیت و ارتباط خصوصیات معماری با سیستم سازه ای در ایفای عملکرد لرزه ای مطلوب ساختمان، انتخاب طرح معماری و سیستم سازه ای سازگار با آن در ساختمان های بلند اهمیت ویژه ای دارد.

در طول قرون گذشته، سیستم های متعددی برای سازه های بلند طراحی و بر مبنای آن ها ساختمان های بلند متعددی اجرا شده اند. با بکارگیری مصالح بتن آرمه در ساخت و ساز، استفاده از آن در سازه های بلند مرتبه به طور وسیعی گسترش یافته است؛ اگرچه تا قبل از جنگ جهانی اول بیشتر ساختمان های بلند دارای اسکلت فولادی بودند و تنها فونداسیون ها و دال های کف آنها بتنی بوده؛ اما بعد از جنگ جهانی اول ساختمان های بلند مرتبه بتن آرمه به صورت پراکنده به وجود آمدند. در ابتدا سیستم های سازه ای در ساختمان های بلند تنها شامل ستون ها، شاه تیرها، تیرها و دال ها بودند و بیشتر المان های باربر درون ساختمان قرار می گرفتند. به این دسته از سیستم های سازه ای، سازه های داخلی گفته می شود زیرا بیشتر المان های باربر درون ساختمان قرار دارند. اما به مرور زمان یک انقلاب عظیم در ساختمان های بلند در حال شکل گیری بود و سیستم های نوینی همچون سیستم های لوله ای، لوله های مهاربندی شده، لوله های دسته شده، سیستم های شبکه ای و شبکه خارجی تحولی در ساختمان های بلند هم از نظر معماری و هم از نظر سازه ای به وجود آورده اند. این دسته از سیستم های سازه ای، سازه های خارجی نام دارند زیرا المان های باربر در پیرامون ساختمان قرار می گیرند.

هدف از چاپ این کتاب، بررسی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند و درک بهتر از رفتار آنها می باشد. به علاوه سیر تکاملی سیستم های لرزه ای و نکات جانبی هر یک از آنها مطرح شده است. مجموعه حاضر دارای مثالهای متعددی می باشد به گونه ای که قسمت های ابتدایی هر بخش، مسائل خاص سازه های بلند را مورد بررسی قرار داده و انتهای هر بخش یک مطالعه موردی بر یک سازه بلند ارائه می دهد. لازم به ذکر است علاقه نویسندگان آن بوده است که جزئیات بیشتری از معماری و سازه بسیاری از برج های بلند برجسته و زیبای جهان ارائه گردد.

این کتاب شامل سیزده فصل می باشد. در فصل اول، ابتدا تعریف ساختمان های بلند و تاریخچه آنها و سپس انواع سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند و طبقه بندی آنها مطرح شده است. فصل دوم به معرفی سیستم های سازه ای داخلی که المان های باربر آنها درون ساختمان توزیع می گردند؛ اختصاص دارد. در این فصل سیستم هایی همچون قاب خمشی، قاب مهاربندی شده و دیوار برشی مورد توجه قرار می گیرند و در هر مورد نمونه ای از ساختمان های بلند که با این سیستم ها ساخته شده اند؛ ذکر می گردند. فصل سوم به بررسی سایر سیستم های داخلی همانند کمربندهای خرپایی و هسته های مقاوم می پردازد.

فصل چهارم به بررسی اولین دسته از سیستم های مقاوم سازه ای خارجی که المان های باربر آنها در خطوط پیرامونی ساختمان توزیع می گردند، تخصیص یافته است. در این فصل سیستم لوله قابی مورد مطالعه قرار می گیرد و همچنین به معایب و مزایای سیستم های سازه ای لوله ای همچون پدیده لنگی برش اشاره می شود. در فصل پنجم سیستم های لوله مهاربندی شده تشریح می گردد و در فصل ششم سیستم های لوله در لوله و لوله دسته بندی شده بررسی می شود. همچنین در پایان این فصل مقایسه ای بر روی انواع سیستم های سازه ای لوله ای انجام می گردد.

در فصل هفتم سیستم های مقاوم سازه ای شبکه قطری که تکامل یافته سیستم های لوله ای اند، تشریح شده اند. در فصل هشتم خواننده با جدیدترین سیستم سازه ای برای ساختمان های بلند آشنا می شود. این سیستم که شبکه خارجی نام دارد؛ هم در سازه های فولادی و هم در سازه های بتنی به کار می رود و تکامل یافته سیستم شبکه قطری است.

در فصل نهم به بررسی سیستم های مقاوم جانبی برای سازه های بسیار بلند پرداخته می شود. در این فصل سیستم هایی همچون قاب با خرپای فضایی و ابرسازه ها مطرح می گردد. فصل دهم اثرات نیروهای باد بر روی ساختمان های بلند را مورد بررسی قرار می دهد. با توجه به آن که اثرات نیروهای جانبی به ویژه نیروهای باد با افزایش ارتفاع به سرعت افزایش می یابد؛ می توان با اصلاحات ایرودینامیک بر روی فرم ساختمان های بلند و سطح مقطع آنها، اثرات باد را کاهش داد. در این فصل بسیاری از روش های کاهش اثرات باد بر روی ساختمان های بلند برجسته دنیا مطرح شده است. در فصل یازدهم مباحث سازه و معماری بلندترین برج دنیا در حال حاضر (برج خلیفه) مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل دوازدهم به معرفی ساختمان های بلند هزاره سوم (آینده) می پردازد. مشخصات بیست برج بسیار بلند و ویژه دنیا که در قرن سوم ساخته خواهند شد؛ مورد مطالعه قرار گرفته اند. اگرچه بعضی از ساختمان های مذکور تخیلی و رویایی به نظر می رسند؛ ولی با پیشرفت چشمگیر در بخش های آنالیز، طراحی، مصالح و روش های ساخت، اجرای اینگونه ساختمان ها دور از دسترس نیست. همچنین در فصل سیزدهم ۲۰ ساختمان بلندی که تا سال ۲۰۲۰ معرفی می گردند. در انتها منابع و مراجعی که در تهیه این کتاب از آنها استفاده گردیده است، ذکر شده اند.

نویسندگان ضمن استقبال از دریافت نقطه نظرات و پیشنهادات ارزنده کلیه اندیشمندان، اساتید، مهندسین و دانشجویان رشته های مهندسی عمران و معماری، امیدوارند چاپ این مجموعه گامی هرچند کوچک در زمینه ارتقاء سطح علمی و به روز رسانی دانش متخصصین

ذیربط باشد. بدیهی است این اثر خالی از اشتباه نیست، لذا از همکاران گرامی، اساتید ارجمند و دانشجویان عزیز انتظار می رود که اشتباهات و کاستی ها را یادآوری فرمایند.

مؤلفین در اینجا برخود لازم می دانند تشکر ویژه خود را به جناب آقای دکتر مرتضی زاهدی عضو هیأت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران به خاطر ویرایش و بازنگری فصل یازدهم کتاب که در خصوص معرفی بلندترین ساختمان جهان برج خلیفه (برج دبی) می باشد، ابراز نمایند. همچنین از جناب آقای دکتر حسین نادرپور، آقای دکتر علیرضا مرتضایی و دانشجویان دکترا آقایان مهندس علی همتی، مهندس سید روح الله حسینی واعظ، مهندس احمد دالوند، مهندس عباس سیوندی، مهندس روزبه ظهیری و دانشجویان کارشناسی ارشد آقایان مهندس سلیم کریم پور، مهندس سید مهدی حاجی میراسمعیلی، مهندس حسین جمشیدی، مهندس سعید محب شاهدین، مهندس سید جلال موسوی، مهندس سهیل آصف و سرکار خانم مهندس نیلوفر مشهدی علی تشکر و قدردانی می گردد.

از معاونت پژوهشی دانشگاه سمنان و آقای مهندس حمیدرضا مولایی، مسئول انتشارات دانشگاه سمنان که در جهت چاپ و انتشار کتاب همکاری داشته اند، سپاسگزاری می شود. همچنین از زحمات آقای اسماعیل شجاعی در مورد طرح روی جلد و صفحه آرایی تقدیر می شود.

دکتر علی خیرالدین - مهندس سیما آرامش

زمستان ۱۳۹۳

عنوان **فهرست مطالب** **صفحه**

فصل اول: طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند

۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ تعریف ساختمان های بلند ۱
۱-۳ تاریخچه ساختمان های بلند ۳
۱-۴ مفاهیم سازه ای ۱۵
۱-۴-۱ شاخص صلبیت برشی و خمشی ۱۷
۱-۵ اثر افزایش ارتفاع بر روی وزن مصالح مصرفی ۲۲
۱-۵-۱ فاکتورهایی برای کاهش وزن سازه های بلند ۲۳
۱-۶ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند ۲۷
۱-۶-۱ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی بر اساس مصالح مصرفی ۲۷
۱-۶-۲ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی بر توزیع المان های باربر ۲۸

فصل دوم: معرفی سیستم های سازه ای داخلی (قاب صلب-قاب مهاربندی شده و دیوارهای برشی)

۲-۱ مقدمه ۳۳
۲-۲ قاب صلب ۳۳
۲-۲-۱ قاب صلب با شاه تیرهای ماهیچه ای ۳۶
۲-۲-۲ مطالعات موردی ۳۸
۲-۳ قاب مهاربندی شده ۴۲
۲-۳-۱ مطالعه موردی (ساختمان ACT در شهر هاماماتسو در کشور ژاپن) ۴۷
۲-۳-۲ سیستم خرپای پله ای ۵۱
۲-۳-۲-۱ بررسی عملکرد اجزای سیستم خرپای پله ای ۵۴
۲-۳-۲-۲ مطالعه موردی (تاج محل در شهر آتلانتیک، نیوجرسی، ایالت متحده آمریکا) ۵۵
۲-۳-۳ بادبندهای نچسبیده ۵۹
۲-۳-۳-۱ تاریخچه بادبندهای نچسیده ۶۰
۲-۳-۳-۲ آزمایشات انجام شده ۶۵
۲-۳-۳-۳ آزمایشات طراحی ۶۵

۲-۳-۳-۴ نتیجه گیری ۶۵
۲-۴ سیستم دیوار برشی ۶۷
۲-۴-۱ دیوارهای برشی کوپله ۶۸
۲-۴-۲ رفتار دیوار برشی کوپله ۷۱
۲-۴-۳ مطالعات موردی ۷۲
۲-۵ سیستم ترکیبی قاب خمشی و خرپای برشی ۷۷
۲-۵-۱ مطالعه موردی ۷۸
۲-۶ سیستم ترکیبی قاب خمشی و دیوار برشی ۸۴
۲-۶-۱ اندرکنش دیوار برشی و قاب ۸۵
۲-۶-۲ مطالعات موردی: برج South Walker، شیکاگو، ایلینویز ۹۹

فصل سوم: سیستم های سازه ای کمربندهای خرپایی و هسته های مقاوم

۳-۱ مقدمه ۱۰۱
۳-۲ سیستم سازه ای با مهار بازویی (کمربندهای خرپایی) ۱۰۱
۳-۲-۱ ساختمان های احداث شده با مهاربازویی و کمربند خرپایی..... ۱۰۶
۳-۲-۲ رفتار سیستم با مهارهای بازویی..... ۱۱۰
۳-۲-۳ محل بهینه مهارهای بازویی..... ۱۱۴
۳-۲-۴ تعیین موقعیت بهینه مهار بازویی با در نظر گرفتن سختی های خمشی، برشی و محوری تحت بار ذوزنقه ای ۱۱۶
۳-۲-۴-۱ فرضیات ۱۱۷
۳-۲-۴-۲ آنالیز سازگاری سازه با یک مهار بازویی ۱۱۸
۳-۲-۴-۳ آنالیز نیرو ها ۱۲۵
۳-۲-۴-۴ آنالیز تغییر مکان های افقی ۱۲۶
۳-۲-۴-۵ موقعیت بهینه مهار بازویی ۱۲۶
۳-۲-۴-۶ حل عمومی نیرو ها و تغییر مکان ها ۱۳۱
۳-۲-۴-۷ لنگرهای گیرداری ۱۳۱
۳-۲-۴-۸ تغییر مکان های افقی ۱۳۲
۳-۲-۴-۹ موقعیت بهینه مهارهای بازویی ۱۳۲
۳-۲-۴-۱۰ نتیجه گیری ۱۳۳
۳-۲-۵ مطالعات موردی ۱۳۵

۳-۲-۵-۱ ساختمان City Spire، کشور نیویورک ۱۳۵
۳-۲-۵-۲ مرکز تجاری جزیره Greenland در ایالت نانجینگ در کشور چین ۱۳۷
۳-۲-۵-۲-۱ معرفی برج نانجینگ در کشور چین ۱۳۷
۳-۲-۵-۲-۲ سیستم سازه ای برج نانجینگ ۱۳۹
۳-۲-۵-۲-۳ ارزیابی زلزله بر اساس سطح عملکرد ۱۴۳
۳-۲-۵-۲-۴ مدلسازی سه بعدی و غیر خطی ۱۴۷
۳-۲-۵-۲-۵ خواص مصالح بتنی ۱۴۸
۳-۲-۵-۲-۶ خواص مصالح فولادی ۱۴۹
۳-۲-۵-۲-۷ توصیف المان ها ۱۵۰
۳-۲-۵-۲-۸ تعریف مفاصل پلاستیک ۱۵۱
۳-۲-۵-۲-۹ آنالیز الاستو پلاستیک ۱۵۲
۳-۲-۵-۲-۱۰ آنالیز تاریخچه زمانی ۱۵۲
۳-۲-۵-۲-۱۱ ارزیابی آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی ۱۵۴
۳-۳ هسته های مقاوم ۱۵۶
۳-۳-۱ تئوری تابیدگی گیردار هسته های یکنواخت تحت اثر پیچش ۱۶۱
۳-۳-۱-۱ معادلات دیفرانسیل حاکم ۱۶۱
۳-۳-۱-۲ حل پیچش گسترده یکنواخت ۱۶۳
۳-۳-۱-۳ تنش های تابیدگی ۱۶۵
۳-۳-۲ بررسی تأثیر کوپله کردن هسته های مقاوم بتنی و بررسی نتایج خطی ۱۶۶
۳-۳-۲-۱ مشخصات و خصوصیات سازه ها ۱۶۷
۳-۳-۲-۲ تحلیل و بررسی نتایج ۱۶۹
۳-۳-۲-۳ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۸۳
۳-۳-۳ مطالعات موردی ۱۸۴

فصل چهارم: معرفی سیستم سازه ای لوله قابی

۴-۱ مقدمه ۱۹۱
۴-۲ معرفی سیستم های سازه ای لوله ای ۱۹۱
۴-۳ سیستم لوله قابی ۱۹۴
۴-۳-۱ رفتار سیستم لوله قابی ۱۹۸
۴-۳-۲ لوله بی قاعده ۲۰۴

۴-۴ لنگی برش ۲۰۴
۴-۵ بررسی پدیده لنگی برش در ساختمان های بلند بتن آرمه با سیستم سازه ای لوله ای ۲۱۱
۴-۵-۱ بررسی پدیده لنگی برش در سازه های لوله ای با پلان مربعی..... ۲۱۱
۴-۵-۱-۱ بررسی و مطالعه پدیده لنگی برش در سازه ۲۰ طبقه..... ۲۱۲
۴-۵-۱-۱-۱ بررسی تأثیر افزایش ابعاد ستون های کتابی در میزان لنگی برش در ساختمان ۲۰ طبقه.....۲۱۳
۴-۵-۱-۱-۲ بررسی تأثیر افزایش سختی تیرها بر اندیس لنگی برش در یک ساختمان ۲۰ طبقه.....۲۱۴
۴-۵-۱-۲ بررسی و مطالعه پدیده لنگی برش در سازه ۴۰ طبقه.....۲۱۵
۴-۵-۱-۲-۱ بررسی تأثیر افزایش سختی تیرهای سازه ۴۰ طبقه در لنگی برش.....۲۱۶
۴-۵-۱-۳ بررسی پدیده لنگی برش در سازه ۶۰ طبقه.....۲۱۷
۴-۵-۱-۳-۱ بررسی تأثیر افزایش سختی تیرها در لنگی برش.....۲۱۸
۴-۵-۲ بررسی پدیده لنگی برش در سازه های لوله ای با پلان مستطیلی.....۲۱۹
۴-۵-۲-۱ سازه ۲۰ طبقه با پلان مستطیلی..... ۲۲۰
۴-۵-۲-۲ سازه ۴۰ طبقه با پلان مستطیلی.....۲۲۲
۴-۵-۲-۳ بررسی سازه ۶۰ طبقه با پلان مستطیلی.....۲۲۳
۴-۵-۴ نتیجه گیری ۲۲۵
۴-۶ مطالعات موردی ۲۲۶
۴-۶-۱ ساختمان Georgia Pacific در آتلانتا، جورجیا، ایالت متحده آمریکا ۲۲۶
۴-۶-۲ ساختمان ۴۵۰Lexington Avenue در نیویورک، ایالت متحده آمریکا ۲۲۹
۴-۶-۳ برج NCNB، کارولینای شمالی ۲۳۲
۴-۶-۴ برج تراست سنت، میامی، فلوریدا ۲۳۴
۴-۶-۵ ساختمان دو پلازای محتاط ، شیکاگو، ایلینویز..... ۲۳۸
۴-۶-۶ مرکز Hope Well، هونگ کونگ..... ۲۴۰

فصل پنجم: معرفی سیستم سازه ای لوله مهاربندی شده

۵-۱ مقدمه ۲۴۵
۵-۲ لوله مهاربندی شده یا لوله خرپایی ۲۴۵
۵-۲-۱ رفتار لوله های مهاربندی شده ۲۵۱

۵-۲-۲ تخمین تعداد بهینه بادبندهای چند طبقه ای در سازه های لوله بادبندی ۲۵۳
۵-۲-۲-۱ فرضیات مدلسازی ۲۵۴
۵-۲-۲-۲ اثر حالات مختلف بادبندی بر لنگی برش ۲۵۶
۵-۲-۲-۳ رابطه بادبند بهینه از نظر لنگی برش ۲۵۸
۵-۲-۲-۴ اثر حالات مختلف بادبندی بر تغییرمکان جانبی طبقات ۲۵۹
۵-۲-۲-۵ اثر حالات مختلف بادبندی بر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات (دریفت) ۲۶۰
۵-۲-۲-۶ نتایج نهایی مطالعات تخمین تعداد بهینه بادبند در سازه های لوله بادبندی ۲۶۱
۵-۳ بررسی پارامترهای مؤثر بر لنگی برشی در سیستم های لوله بادبندی ۲۶۱
۵-۴ نتایج نهایی مطالعات خیرالدین و ظهیری هاشمی (۱۳۸۶) ۲۶۸
۵-۵ مطالعات موردی ۲۷۱
۵-۵-۱ ساختمان First International، دالاس، تگزاس، ایالت متحده آمریکا ۲۶۹
۵-۵-۲ برج های دبی ۲۷۱
۵-۵-۲-۱ معرفی برج های دبی ۲۷۱
۵-۵-۲-۲ طرح معماری برج های دبی ۲۷۳
۵-۵-۲-۳ طرح معماری برج ۲۹ ..... ۲۷۷
۵-۵-۲-۴ اثر متقابل معماری و سازه در برج ۲۹ ..... ۲۷۷
۵-۵-۲-۵ بررسی سازه برج های دبی ۲۷۹
۵-۵-۲-۶ نتایج آنالیز سازه برج های دبی ۲۸۵
۵-۵-۲-۷ بهینه سازی هندسه برج های دبی ۲۸۷
۵-۵-۲-۸ بهینه سازی طرح سازه ای برج های دبی ۲۹۰
۵-۵-۲-۹ قابلیت ساخت برج های دبی ۲۹۲
۵-۵-۲-۹-۱ بررسی اتصالات ستون ها و مهاربندهای پیرامونی ۲۹۲
۵-۵-۲-۹-۲ بررسی مراحل ساخت برج های دبی و پایداری در حین ساخت ۲۹۴
۵-۵-۲-۱۰ مطالعات تکمیلی ۲۹۶

فصل ششم: معرفی سیستم سازه ای لوله در لوله و لوله دسته بندی شده

۶-۱ مقدمه ۳۱
۶-۲ سیستم لوله در لوله ۳۰۱
۶-۳ سیستم لوله های دسته بندی شده ۳۰۲

۶-۴ مقایسه سیستم های لوله ای در ساختمان های بلند بتن آرمه ۳۰۷
۶-۴-۱ مقایسه لنگی برش در سیستم لوله در لوله و سیستم لوله دسته بندی شده ۳۰۸
۶-۴-۲ مقایسه تغییرمکان نسبی جانبی در سیستم لوله در لوله و سیستم لوله دسته بندی شده ۳۱۱
۶-۴-۳ مقایسه درصد جذب برش لوله ها در سیستم لوله در لوله و سیستم لوله دسته بندی شده ۳۱۲
۶-۴-۵ نتایج نهایی مقایسه بین سیستم لوله در لوله و لوله دسته بندی شده در ساختمان های بلند بتن آرمه بر اساس تحقیقات خیرالدین و جمشیدی (۱۳۸۸) ۳۱۵
۶-۵ مطالعات موردی ۳۱۶
۶-۵-۱ ساختمان One Magnificent Mile، شیکاگو..... ۳۱۶
۶-۶ انتخاب سیستم سازه ای بهینه بر اساس تحقیقات تارانا در سال ۲۰۱۰ ..... ۳۲۰
۶-۶-۱ سیستم مهاربندهای عرضی ۳۲۱
۶-۶-۲ سیستم لوله قابی ۳۲۶
۶-۶-۳ طرح های غیرلوله ای ۳۳۱
۶-۶-۴ اثر ستون ها بر روی فضای ساختمان های بلند ۳۳۴
۶-۶-۵ مقایسه تراکم پلان و هزینه سازه ای ۳۳۶

فصل هفتم: سیستم سازه ای شبکه قطری

۷-۱ مقدمه ۳۳۹
۷-۲ سیستم سازه ای شبکه قطری ۳۴۰
۷-۲-۱ نحوه ساخت اتصالات اعضای سیستم شبکه قطری ۳۴۴
۷-۲-۲ زاویه بهینه برای اعضای قطری در سیستم سازه ای شبکه قطری ۳۴۴
۷-۲-۲-۱ مدلسازی ۳۴۴
۷-۲-۲-۲ آنالیز و طراحی ۳۴۹
۷-۲-۲-۲-۱ تغییرمکان جانبی طبقات ۳۴۹
۷-۲-۲-۲-۲ میزان تراکم فولاد در قسمت های مختلف سازه ۳۵۱
۷-۲-۳ نتایج مطالعات خیرالدین و مشهدی علی برای محاسبه زاویه بهینه اعضای قطری در سیستم سازه ای شبکه قطری ۳۵۴

۷-۳ پیشنهاد یک سیستم جدید شبکه شش ضلعی توسط خیرالدین و مشهدی علی در سال ۱۳۸۹ ..... ۳۵۵
۷-۳-۱ پیکربندی سیستم شبکه شش ضلعی ۳۵۶
۷-۳-۲ مدلسازی و تحلیل سازه با سیستم شبکه شش ضلعی ۳۵۷
۷-۳-۳ مطالعات طراحی ۳۵۹
۷-۳-۳-۱ تغییرمکان جانبی طبقات ۳۶۰
۷-۳-۳-۲ میزان تراکم فولاد در قسمت های مختلف سازه ۳۶۳
۷-۴ مقایسه سیستم شبکه قطری و شبکه شش ضلعی ۳۶۶
۷-۴-۱ معیار مقایسه دو سیستم سازه ای ۳۶۶
۷-۴-۲ مطالعات طراحی ۳۶۷
۷-۴-۲-۱ تغییرمکان جانبی طبقات ۳۶۷
۷-۴-۲-۲ تأثیر استفاده از دیگر سیستم های سازه ای در افزایش صلبیت ۳۶۸
۷-۴-۲-۳ میزان تراکم فولاد در قسمت های مختلف سازه ۳۷۱
۷-۵ مطالعات موردی سیستم شبکه قطری ۳۷۴
۷-۵-۱ ساختمان Swiss Re در کشور لندن ۳۷۴
۷-۵-۱-۱ فرم ساختمان Swiss Re ۳۷۴
۷-۵-۱-۲ سازه Swiss Re ۳۷۸
۷-۵-۲ ساختمان CCTV در کشور چین ۳۸۰
۷-۵-۲-۱ سازه برج CCTV ۳۸۲
۷-۵-۲-۲ طراحی شالوده برج CCTV ۳۸۶
۷-۵-۲-۳ مراحل ساخت برج CCTV ۳۸۸

فصل هشتم: سیستم سازه ای شبکه خارجی

۸-۱ مقدمه ۳۹۱
۸-۲ معرفی سیستم سازه ای شبکه خارجی ۳۹۱
۸-۳ مطالعات موردی ۳۹۲
۸-۳-۱ هتل بلند دی لاس آرتس در کشور اسپانیا ۳۹۲
۸-۳-۲ ساختمان COR در کشور میامی ۳۹۶
۸-۳-۳ معرفی طرح معماری و سیستم سازه ای شبکه خارجی بتن آرمه در برج بلند O-۱۴ دبی ۳۹۷

۸-۳-۳-۱ بررسی معماری برج O-۱۴ دبی ۳۹۸
۸-۳-۳-۲ پلان برج O-۱۴ دبی ۴۰۰
۸-۳-۳-۳ نمای خارجی برج O-۱۴ دبی ۴۰۲
۸-۳-۳-۴ سیستم سازه ای ۴۰۵
۸-۳-۳-۵ سیستم سقف طبقات ۴۰۷
۸-۳-۳-۶ سیستم فونداسیون ۴۰۸
۸-۳-۳-۷ اتصال سیستم شبکه خارجی به اسکلت اصلی ساختمان ۴۱۰
۸-۳-۳-۸ اثرات محیطی ۴۱۱
۸-۳-۳-۹ اصول ساخت ۴۱۳
۸-۳-۳-۱۰ مدلسازی و آنالیز پوسته خارجی ۴۱۴
۸-۳-۳-۱۱ جزئیات آرماتورگذاری در پوسته خارجی ۴۱۵
۸-۳-۳-۱۲ تعیین ضخامت پوسته بتن آرمه ۴۱۶
۸-۴ بررسی رفتار لرزه ای سیستم سازه ای شبکه خارجی فولادی بر اساس تحقیقات انجام شده توسط خیرالدین و آرامش در سال ۱۳۹۰ ..... ۴۱۷
۸-۴-۱ مشخصات و خصوصیات سازه ها ۴۱۸
۸-۴-۲ مقایسه تغییرمکان جانبی طبقات ۴۲۰
۸-۴-۳ مقایسه درصد جذب برش ناشی از نیروی زلزله ۴۲۵
۸-۴-۴ مقایسه سیستم شبکه خارجی فولادی و سیستم لوله مهاربندی شده ۴۳۰
۸-۴-۵ نتایج مطالعه رفتار لرزه ای سیستم سازه ای شبکه خارجی فولادی بر اساس تحقیقات انجام شده توسط خیرالدین و آرامش در سال ۱۳۹۰ ..... ۴۳۲
۸-۵ بررسی رفتار لرزه ای سیستم سازه ای شبکه خارجی بتنی بر اساس تحقیقات انجام شده توسط خیرالدین و آرامش در سال ۱۳۹۰ ..... ۴۳۳
۸-۵-۱ مشخصات و خصوصیات سازه مورد مطالعه ۴۳۳
۸-۵-۲ سیستم سازه ای سازه مورد مطالعه ۴۳۵
۸-۵-۳ تکنیک های آنالیز و مدلسازی ۴۳۶
۸-۵-۴ آنالیز در SAP۲۰۰۰ ..... ۴۳۸
۸-۵-۵ مقایسه تغییرمکان جانبی نسبی طبقات ۴۴۱
۸-۵-۶ مقایسه درصد جذب برش ناشی از زلزله ۴۴۳

فصل نهم: سیستم های سازه ای در ساختمان های بسیار بلند

۹-۱ مقدمه ۴۴۷
۹-۲ سوپرفریم ۴۴۷
۹-۳ ابر سازه ها ۴۵۲
۹-۳-۱ مطالعه موردی (مرکز مالی جهانی شانگهای) ۴۵۳
۹-۳-۲ هتل Icon در شهر دبی ۴۵۹
۹-۳-۲-۱ سیستم سازه ای هتل Icon ۴۵۹
۹-۳-۲-۲ بارگذاری جانبی بر روی سازه هتل Icon ۴۶۱
۹-۳-۲-۳ ارزیابی زلزله بر اساس سطح عملکرد ۴۶۲
۹-۳-۲-۴ تحلیل خطر ۴۶۵
۹-۳-۲-۵ تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی ۴۶۶
۹-۳-۲-۶ مدلسازی سازه ای ۴۶۷
۹-۳-۲-۷ خواص مصالح بتنی ۴۶۹
۹-۳-۲-۸ خواص مصالح فولادی ۴۶۹
۹-۳-۲-۹ توصیف المان ها ۴۷۰
۹-۳-۲-۱۰ بررسی نتایج تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی ۴۷۳
۹-۳-۳ برج شانگهای در کشور چین ۴۸۰
۹-۴ خرپای فضایی ۴۸۶
۹-۴-۱ مطالعه موردی (ساختمان بانک هونگ کونگ) ۴۸۹
۹-۴-۱-۱ بررسی ساختمان بانک هونگ کونگ ۴۹۰
۹-۴-۱-۲ بررسی اتصالات ۴۹۲
۹-۴-۱-۳ بررسی المان های سازه ای ۴۹۳
۹-۴-۱-۴ بررسی نیروهای جانبی ۴۹۳
۹-۵ سیستم سازه ای دیوار برشی فولادی ۴۹۸
۹-۵-۱ بلندترین دیوار برشی فولادی در دنیا در شهر تیانجین در کشور چین ۴۹۸
۹-۵-۱-۱ سیستم سازه ای برج جینتا ۴۹۸
۹-۵-۱-۲ بارگذاری و عملکرد سازه ۵۰۲
۹-۵-۱-۳ روش و فلسفه طراحی دیوارهای SPSW ۵۰۳
۹-۵-۱-۴ مدلسازی دیوارهای برشی فولادی ۵۰۵
۹-۵-۱-۵ آزمایشات برای تأیید طراحی سازه ای ۵۰۸

۹-۶ ساختمان های بلند مرکب ۵۰۸
۹-۶-۱ ساختمان های مرکب لوله‌ای (قاب پیرامونی مرکب) ۵۰۹
۹-۶-۲ سیستم هسته بتنی و قاب فولادی (قاب داخلی مرکب) ۵۱۷
۹-۶-۳ آنالیز سازه‌های مرکب ۵۲۱
۹-۶-۳-۱ خواص مصالح ۵۲۱
۹-۶-۳-۲ سختی اعضاء مرکب ۵۲۱
۹-۶-۳-۳ اتصالات ۵۲۱
۹-۶-۴ بارگذاری ۵۲۲
۹-۶-۵ مطالعه نوع خاصی از ساختمان های ترکیبی شامل سازه بتن آرمه با دیوار برشی در طبقات پایین و سازه فولادی با بادبند در طبقات بالا بر اساس تحقیقات انجام شده در سال ۱۳۸۴ توسط خیرالدین و همتی ۵۲۴
۹-۶-۵-۱ مشخصات مدل های مورد بررسی ۵۲۵
۹-۶-۵-۲ نمودارها و نتایج ۵۲۶
۹-۶-۵-۲-۱ نتایج تحلیل خطی ۵۲۶
۹-۶-۵-۲-۲ نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی ۵۳۲
۹-۶-۶ مطالعات موردی ۵۳۶
۹-۶-۶-۱ مرکز ای دی اس، مینیاپولیس، مینسوتا ۵۳۶

فصل دهم: اثر نیروی جانبی باد بر روی ساختمان های بلند

۱۰-۱ مقدمه ۵۳۹
۱۰-۲ اثرات نیروی باد ۵۳۹
۱۰-۳ تحریکات ایجاد شده در ساختمان های بلند بر اثر نیروی جانبی باد ۵۴۱
۱۰-۳-۱ حرکت در امتداد باد ۵۴۱
۱۰-۳-۲ حرکت در جهت عرضی باد ۵۴۱
۱۰-۳-۳ پدیده گردباد ۵۴۲
۱۰-۴ مزایای نیروی جانبی باد در ساختمان های بلند ۵۴۶
۱۰-۵ نقش اصلاحات ایرودینامیک در فرم ساختمان های بلند در برابر تحریکات باد ۵۴۹
۱۰-۵-۱ کاهش تدریجی در پهنای برج ۵۵۱

۱۰-۵-۲ بکارگیری فرم های دایره ای، استوانه ای و هلالی ۵۵۵
۱۰-۵-۳ به کارگیری عقب نشینی ها (ست بک ها) ۵۵۸
۱۰-۵-۳-۱ برج جین مائو، شانگهای، چین ۵۵۹
۱۰-۵-۳-۱-۱ سیستم سازه ای برج جین مائو ۵۵۹
۱۰-۵-۳-۱-۲ طراحی برای نیروی جانبی باد ۵۶۳
۱۰-۵-۳-۲ برج سیرز، شیکاگو ۵۶۵
۱۰-۵-۳-۳ برج های دوقلوی پترونانس، کوالا لامپر، مالزی ۵۶۹
۱۰-۵-۳-۳-۱ طرح معماری برج های دوقلوی پترونانس ۵۶۹
۱۰-۵-۳-۳-۲ سیستم سازه ای برج های دوقلوی پترونانس ۵۷۴
۱۰-۵-۳-۳-۳ مهندسی باد در برج های دوقلوی پترونانس ۵۷۷
۱۰-۵-۳-۳-۴ پل ارتباطی بین برج های دوقلوی پترونانس ۵۷۸
۱۰-۵-۳-۴ برج و هتل بین المللی ترامپ، شیکاگو، ایلینویز ۵۸۰
۱۰-۵-۳-۴-۱ سیستم سازه ای برج و هتل بین المللی ترامپ ۵۸۲
۱۰-۵-۳-۴-۲ مهندسی باد در برج و هتل بین المللی ترامپ ۵۸۳
۱۰-۵-۴ اصلاحات در گوشه ها ۵۸۴
۱۰-۵-۴-۱ استفاده از گوشه های پلکانی در برج تایپه ۱۰۱ ..... ۵۸۵
۱۰-۵-۴-۱-۱ سیستم سازه ای برج تایپه ۱۰۱ ..... ۵۸۵
۱۰-۵-۴-۲ استفاده از گوشه های تو رفته در برج میگلن-بیتلر، شیکاگو، ایالت ایلینویز ۵۹۱
۱۰-۵-۴-۲-۱ سیستم سازه ای برج میگلن-بیتلر ۵۹۲
۱۰-۵-۵ ایجاد بازشوها ۵۹۵
۱۰-۵-۶ چرخش ساختمان به صورت پیچشی ۵۹۸
۱۰-۶ بررسی اثرات هندسه پیچیده در ساختمان های بلند ۶۰۱
۱۰-۶-۱ تأثیر اشکال هندسی گوناگون بر روی طرح سازه ای ۶۰۱
۱۰-۶-۲ ساختمان های دارای انحراف ۶۰۴
۱۰-۶-۳ ساختمان های دارای پیچش ۶۰۹

فصل یازدهم: معرفی بلندترین ساختمان جهان، برج دبی (برج خلیفه)

۱۱-۱ مقدمه ۶۱۵
۱۱-۲ معرفی برج خلیفه ۶۱۵

۱۱-۳ طرح معماری برج خلیفه ۶۱۷
۱۱-۴ سیستم سازه ای برج خلیفه ۶۲۲
۱۱-۴-۱ سیستم مقاوم جانبی ۶۲۲
۱۱-۴-۲ سیستم سازه ای کف طبقات ۶۲۵
۱۱-۴-۳ شالوده برج ۶۲۶
۱۱-۵ آنالیز و طراحی سازه برج خلیفه ۶۳۱
۱۱-۶ تحلیل و طراحی تیرهای پیوند ۶۳۴
۱۱-۶-۱ تیرهای پیوند بتن آرمه ۶۳۴
۱۱-۶-۲ تیرهای پیوند کامپوزیت ۶۳۴
۱۱-۷ مطالعات مربوط به تعیین اثر باد ۶۳۶
۱۱-۷-۱ مطالعات مربوط به سازه اصلی ۶۳۶
۱۱-۷-۲ مطالعات مربوط به تراس های طبقات بالای برج ۶۴۲
۱۱-۸ تحلیل سازه برج برای رفتارهای وابسته به زمان ۶۴۳
۱۱-۸-۱ تحلیل برای ساخت نوبتی سازه ۶۴۴
۱۱-۸-۲ تحلیل برای جبران اثرات ناشی از جمع شدگی و وارفتگی ۶۴۴
۱۱-۸-۳ اثرات کوتاه شدگی قائم ناشی از جمع شدگی و وارفتگی ۶۴۵
۱۱-۸-۴ تغییرمکان جانبی ناشی از بارهای ثقلی ۶۴۶
۱۱-۹ روش های ساخت برج بسیار بلند دبی ۶۴۷
۱۱-۱۰ برنامه ریزی برای کارهای بتنی ۶۴۸
۱۱-۱۰-۱ تکنولوژی استفاده شده برای دوره ۳ روزه ۶۵۰
۱۱-۱۱ مراحل اجرایی ساخت برج و سیستم قالب بندی ACS ۶۵۱
۱۱-۱۱-۱ میلگرد های پیش ساخته ۶۵۱
۱۱-۱۱-۲ سیستم قالب بندی دال ها ۶۵۱
۱۱-۱۱-۳ پمپاژ بتن ۶۵۳
۱۱-۱۲ خلاصه ۶۵۵

فصل دوازدهم: ساختمان های بلند هزاره سوم (آینده)

۱۲-۱ مقدمه ۶۵۷
۱۲-۲ تاریخچه ساختمان های بلند عظیم ۶۵۷
۱۲-۳ معرفی ساختمان هایی با معماری بیونیک ۶۶۲

۱۲-۳-۱ برج تورنینگ تورسو، مالمو، سوئد ۶۶۳
۱۲-۳-۲ برج بیونیک، شانگهای، چین ۶۶۸
۱۲-۳-۲-۱ آنالیز، طراحی و ساخت سازه Bio-Structure ۶۷۰
۱۲-۳-۲-۲ شالوده شناور ۶۷۲
۱۲-۳-۳ برج ضد دود، پاریس ۶۷۴
۱۲-۳-۴ برج کاکتوس ۶۷۶
۱۲-۴ خمیده ترین آسمان خراش دنیا، برج کپیتال گیت ۶۷۸
۱۲-۵ برج X-Seed ٤٠٠٠ ، شهر توکیو، کشور ژاپن ۶۸۱
۱۲-۶ برج شیمیزو، شهر توکیو، کشور ژاپن ۶۸۱
۱۲-۷ برج آلتیما، سان فرانسیسکو، آمریکا ۶۸۲
۱۲-۸ شهر آسمانی توکیو، ژاپن ۶۸۲
۱۲-۹ برج میلینیوم، توکیو، ژاپن ۶۸۵
۱۲-۱۰ جزیره کریستالی، مسکو، روسیه ۶۸۵
۱۲-۱۱ برج مبارک الکبیر، کویت ۶۸۸
۱۲-۱۲ برج سه‌قلوی دبی، امارات متحده عربی ۶۸۹
۱۲-۱۳ برج ۱۵۱ اینچئون، کره جنوبی ۶۹۰
۱۲-۱۴ برج شیکاگو، شیکاگو، ایالت ایلینویز ۶۹۳
۱۲-۱۵ شهر ۲۴۰۰ کیلومتری در دبی ۶۹۶
۱۲-۱۶ مطالعه برج نخیل، دبی، امارت متحده عربی ۶۹۹
۱۲-۱۶-۱ معماری برج نخیل ۷۰۲
۱۲-۱۶-۲ فرم ساختمان ۷۰۶
۱۲-۱۶-۳ سازه برج نخیل ۷۰۸
۱۲-۱۶-۳-۱ المان های سازه ای اصلی ۷۰۸
۱۲-۱۶-۳-۱ مصالح سازه ای ۷۱۰
۱۲-۱۶-۳-۳ سیستم فونداسیون برج نخیل ۷۱۲
۱۲-۱۶-۴ مهندسی باد ۷۱۴
۱۲-۱۷ برج روسیه، مسکو، روسیه ۷۱۶
۱۲-۱۷-۱ اتصال برج ها ۷۱۷
۱۲-۱۷-۲ سیستم سازه ای برج روسیه ۷۱۸
۱۲-۱۷-۳ مصالح سازه ای ۷۲۳

۱۲-۱۷-۴ توصیف مؤلفه های سازه ای ۷۲۳
۱۲-۱۸ بررسی رفتار سیستم سازه ای در ساختمان های بلند دینامیکی (متحرک) با مطالعه موردی برج های داوینچی در شهر دبی ۷۲۷
۱۲-۱۸-۱ نحوه تأمین انرژی ۷۲۹
۱۲-۱۸-۲ نحوه ساخت ۷۳۰
۱۲-۱۸-۳ مشخصات برج های داوینچی دبی دارای سیستم سازه ای دینامیک ۷۳۰

فصل سیزدهم: معرفی ۲۰ ساختمان بلند سال ۲۰۲۰

۱۳-۱ معرفی ۲۰ ساختمان بلند سال ۲۰۲۰ ..... ۷۳۵
۱۳-۱-۱ برج شماره ۱: برج سلطنتی، جده، عربستان سعودی ۷۴۰
۱۳-۱-۲ برج شماره ۲: برج خلیفه، دبی، امارت متحده عربی ۷۴۳
۱۳-۱-۳ برج شماره ۳: مرکز مالی بین المللی پینگ، شنزن، چین ۷۴۴
۱۳-۱-۴ برج شماره ۴: برج Seoul Light DMC، سئول، کره جنوبی ۷۴۷
۱۳-۱-۵ برج شماره ۵: Signature Tower، جاکارتا، اندونزی ۷۴۸
۱۳-۱-۶ برج شماره ۶: برج شانگهای، شانگهای، چین ۷۴۹
۱۳-۱-۷ برج شماره ۷: مرکز سبز ووهان، چین ۷۵۰
۱۳-۱-۸ برج شماره ۸: هتل برج ساعت سلطنتی مکه ۷۵۴
۱۳-۱-۹ برج شماره ۹: برج گلدین فاینانس ۱۱۷، تیانجین، چین ۷۵۷
۱۳-۱-۱۰ برج شماره ۱۰: برج جهانی لوته، سئول، کره جنوبی ۷۵۸
۱۳-۱-۱۱ برج شماره ۱۱: Doha Convention Center and Tower، دوحه، قطر ۷۵۹
۱۳-۱-۱۲ برج شماره ۱۲: مرکز تجارت جهانی (ساختمان شماره ۱)، نیویورک، ایالت متحده آمریکا ۷۶۰
۱۳-۱-۱۳ برج شماره ۱۳: The CTF Guangzhou، گوانگجو، چین ۷۶۴
۱۳-۱-۱۴ برج شماره ۱۴: Tianjin Chow Tai Fook Binhai Center، تیانجین، چین ۷۶۴
۱۳-۱-۱۵ برج شماره ۱۵: Dalian Greenland Center، دالیان، چین ۷۶۵
۱۳-۱-۱۶ برج شماره ۱۶: برج پنتومینیوم، دبی، امارت متحده عربی ۷۶۶
۱۳-۱-۱۷ برج شماره ۱۷: برج شهری لوته بوسان، بوسان، کره جنوبی ۷۶۷

۱۳-۱-۱۸ برج شماره ۱۸: برج تایپه ۱۰۱، تایپه، تایوان ۷۶۸
۱۳-۱-۱۹ برج شماره ۱۹: Kaisa Feng Long Center، شنزن، چین ۷۷۰
۱۳-۱-۲۰ برج شماره ۲۰: مرکز مالی جهانی شانگهای، شانگهای، چین ۷۷۱

مراجع ۷۷۲

فصل اول

طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند

۱–۱ مقدمه

نیاز انسان به فضاهای مناسب و کافی برای زندگی و کار از یک سو و تراکم جمعیت و افزایش قیمت زمین و ارائه خدمات شهری از قبیل آب، برق و تلفن، از سوی دیگر استفاده از ساختمان های عمودی عظیم الجثه را مطرح نموده است. اولین ساختمان چند طبقه، توسط رومیان و با ده طبقه با دیوارهای باربر ساخته شد. کاربرد قاب فولادی در ساختمان ها حدوداً از سال ۱۸۰۱ میلادی برای اولین بار و در یک کارخانه هفت طبقه در منچستر انگلیس صورت گرفت که با حذف دیوارهای باربر، استفاده از سالن ها با دهانه های بزرگ ممکن گردید. اما با حذف دیوارهای باربر و استفاده از قاب های فلزی یا بتنی، سختی ساختمان ها در مقابل نیروهای جانبی کاهش چشمگیری یافت و تغییر مکان های بزرگ ایجاد شده توسط نیروهای جانبی به ویژه نیروهای باد، در ساختمان های قابی به نحوی بود که مهندسین را به ابداع سیستم های سازه ای برای کاهش تغییر مکان های ناشی از نیروهای جانبی، تشویق نمود. تاکنون سیستم های مقاوم لرزه بر بسیاری برای ساختمان های بلند تعریف شده و بکار گرفته شده اند [۱].

در این فصل به بررسی اجمالی طبقه بندی سیستم های باربر جانبی در ساختمانهای بلند خواهیم پرداخت و سپس رفتار ساختمان های بلند و عملکرد و جزئیات هر یک از سیستم های باربر در فصل های آینده مورد بررسی قرار می گیرد.

۱–۲ تعریف ساختمان های بلند

تشخیص ویژگی های یک ساختمان که آن را به عنوان ساختمان بلند طبقه بندی کند، کار دشواری است. مهمتر از همه نمای بیرونی ساختمان، نسبتاً مهم است. در همسایگی یک

ساختمان یک طبقه ممکن است یک ساختمان ۵ طبقه بلند به نظر برسد. یک ساختمان ۵۰ طبقه در یک شهر ممکن است بلند نامیده شود، در حالی که شهروندان یک شهر کوچک؛ با افتخار به آسمان خراش شش طبقه ای در شهر خود اشاره می کنند. در شهر های بزرگ مانند شیکاگو و منهتن و اکنون در ایالت متحده عربی با تعداد زیاد ساختمان های بلند، یک سازه اگر بخواهد در مقایسه با همسایگان خود بلند به نظر برسد؛ باید دارای ۱۰۰ تا ۱۲۰ طبقه باشد. یک ساختمان بلند نمی تواند بر حسب روابط مشخصی وابسته به ارتفاع یا تعداد طبقات تعریف شود. به بیان دیگر توافق واحدی بر سر آنچه یک ساختمان را بلند به حساب می آورد یا در چه ارتفاعی یا با چه تعداد طبقاتی یک ساختمان می تواند بلند نامیده شود، وجود ندارد. شاید باید خط تقسیمی کشیده شود مبنی بر این که در چه ارتفاعی، طراحی سازه از حالت استاتیکی به حالت دینامیکی تغییر می کند [۱].

از دیدگاه طراحی سازه ای مناسب تر است که یک ساختمان را بلند در نظر بگیریم هنگامی که تحلیل و طراحی سازه ای آن تحت تأثیر بارهای جانبی به ویژه نوسانات به وجود آمده توسط این بارها باشد. به طور کلی می توان گفت از نظر سازه ای، ساختمانی بلند است که ارتفاع آن باعث شود در طراحی آن شرایط ویژه لحاظ شود و یا سازه‌ای را که پریود آن از ۰/۷ ثانیه بیشتر باشد؛ سازه بلند می‌گویند. برخی هم نسبت ارتفاع به بعد سازه را ملاک این طبقه‌بندی دانسته و نسبت های ارتفاع به بعد $1/5\pi$، π، $\pi/2$ و $\pi/3$ را به ترتیب مربوط به سازه بسیار بلند[۱]، بلند[۲]، متوسط[۳] و کوتاه[۴] می‌دانند [۲].

می توان گفت یک سازه بلند حداقل دو هدف با اهمیت یکسان دارد: قواعد فنی و مسائل زیبایی شناختی. هدف اول یعنی عملکرد فنی، ایستادن عمودی ساختمان است و این که ایمن از فروپاشی یا تغییر شکل های زیاد باشد. سازه ها در معرض شرایط گوناگونی هستند که باید در برابر آنها مقاومت داشته باشند: بارهای باد و برف، وزن اجزا، ساکنین و تجهیزات و در بسیاری از نقاط جهان زمین لرزه ها و حرکات شدید زمین. سازه با مقاومت در برابر بارها و انتقال آن ها از طریق اجزای ساختمان به زمین پایدار می ماند. برای اطمینان از این که ساختمان می تواند چنین بارهایی را بدون تغییر شکل یا فروپاشی شدید تحمل کند باید تحلیل عملی و تئوری قبل از آن صورت پذیرد.

---

[۱] Super-tall buildings
[۲] High-rise buildings
[۳] Mid-rise buildings
[۴] Low-rise buildings

هدف دوم عملکرد زیبایی شناختی است که عمدتاً در محدوده مهندسی معماری و به عنوان یک ابزار بصری به کار می رود. هر دو شرایط فنی و زیبایی شناختی یک سازه بلند باید هم زمان ارضا شود تا این که سازه علاوه بر مسائل فنی پاسخگوی سایر موارد نیز باشد [۱].

۱–۳ تاریخچه ساختمان های بلند

در سرتاسر تاریخچه های ثبت شده برای ساختمان ها، شاید هیچ چیز جذاب تر از به وجود آوردن سازه های بلند برای انسان ها نباشد. غرور و مباهات بهترین انگیزه برای ساخت ساختمان های باستانی و دیرینه ای همچون اهرام ثلاثه مصر بوده است. این اهرام تاریخی ساخته شده در دوران مصر باستان هستند که در حاشیه شمالی شهر قاهره کنونی واقع شده اند. این هرمها حدوداً در سال ۲۵۵۰ قبل از میلاد ساخته شده اند. ارتفاع این بنا که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، ۱۴۷ متر (۴۸۱ فوت) می باشد. برای ساخت اهرام ثلاثه مصر، حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ هزار نفر به مدت ۸۰ سال به کارگرفته شده بودند [۲].

پس از اهرام مصر، ساخت برج پیزا در ایتالیا به ارتفاع ۵۶ متر (۱۸۳ فوت)، نمادی دیگر از بناهایی با ارتفاع باور نکردنی در آن زمان بود. زمان ساخت این برج حدود ۱۷۷ سال بوده است. برج پیزا همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می گردد، دارای شیب ۵/۵ درجه می باشد. در گذشته تصور می‌شد که کجی برج پیزا بخشی از طرح اولیه آن بوده است ولی در واقع اینگونه نیست. ضخامت پی های برج در حدود ۵ متر است که بر روی ماسه، کار گذاشته شده اند. عده ای معتقد هستند همین امر سبب کج شدن برج گردیده است. در حقیقت ساخت این برج به صورت عمودی طراحی شده بود ولی در طول ساخت آن به تدریج کج شد. پس از آن در سال ۱۸۸۹، برج ایفل در انگلستان به ارتفاع ۳۲۴ متر (۱۰۶۳ فوت) ساخته شد (شکل ۱-۳) [۳].

شکل ۱-۱. اهرام ثلاثه مصر [۲]

شکل ۱-۲. نمای برج پیزا در ایتالیا [۳]

شکل ۱-۳. نمای برج ایفل در انگلستان [۳]

رقابت هنوز نقش مهمی در تعیین ارتفاع یک ساختمان دارد اما عوامل دیگری همچون شرایط اقتصادی و اجتماعی، افزایش بهای زمین و تراکم هر چه بیشتر جمعیت به افزایش تعداد ساختمان های بلند در سرتاسر دنیا کمک کرده است. خطوط افق شهرهای دنیا، دائماً به واسطه ساختمان های بلند که به اندازه دامنه کوه ها تأثیر گذار هستند؛ شکافته می شود. در نتیجه رسیدن به اوج همچنان به عنوان هدف و چالش انسان ها ادامه می یابد.

ساختمان های بلند معاصر که امروزه به عنوان نمونه در نظر گرفته می شوند، اغلب به عنوان زیستگاه انسانی به کار می روند. اما سازه های باستانی مانند اهرام مصر بیشتر به عنوان بناهای تاریخی و یادبود بوده اند تا به عنوان سکونتگاه های انسانی.

در طول تاریخ، امکان اجرای ساختمان های بلند همیشه به مصالح موجود، بستگی داشته است. در طی ۱۲۰ سال اخیر سه نوع اصلی سازه در ساختمان های بلند به کار گرفته شد. اولین نوع ساختمان ها در سال های ۱۸۵۰ تا ۱۹۱۰ با چدن ساخته می شدند و در آن ها بارهای ثقلی تا حد زیادی توسط دیوارهای خارجی تحمل می شد. نسل دوم ساختمان های بلند که با ساختمان خانه بیمه[۵] در شیکاگو در سال ۱۸۸۳ آغاز شد، سازه های قابی هستند.

---

[۵] Home Insurance Building

سازه های قابی یک اسکلت از ستون ها و تیرهای فولادی پیچی یا جوشی می باشند که اغلب با بتن سبک روکش می شوند و سطح خارجی آنها را دیوارهای غیر باربر تشکیل می دهند.

ساختمان Woolworth در سال ۱۹۱۳ و ساختمان امپایر استیت در سال ۱۹۳۱ از جمله سازه های قابی می باشند. بیشتر ساختمان های بلندی که از دهه ۱۹۶۰ به بعد برافراشته شده اند، از نوع سوم سازه ها استفاده کرده اند که در آن سازه پیرامونی شبیه یک لوله است و شامل ستون های نزدیک به هم یا ستون ها با ابعاد بزرگ[۶] و با فاصله زیاد به همراه مهاربندها می باشند. درون این سازه ی پیرامونی، یک هسته بتنی یا فولادی و یا ترکیبی از این دو وجود دارد که شامل بسیاری از قسمت ها مانند آسانسورها، پله ها، تجهیزات مکانیکی، تأسیساتی و سرویس های بهداشتی می باشد.

ساختمان های بنایی با ساخت بنای Monadnock در شیکاگو در سال ۱۸۹۱ به اوج خود رسید. این ساختمان دارای ۱۷ طبقه و ارتفاع ۶۴ متر (۲۱۰ فوت) می باشد که سازه ای تأثیر گذار بوده و توانست یک موقعیت تاریخی برجسته را به دست آورد (شکل ۱-۴). در این برج لنگرهای واژگونی و ثقلی تولید شده توسط نیروهای باد، تنها به وسیله دیوارهای بنایی که ضخامتی برابر با ۲/۱۳ متر (۷ فوت) در طبقه همکف دارند؛ مهار شده است. همچنین سطح اشغال شده توسط دیوارها در طبقه همکف این ساختمان که احتمالاً آخرین سازه بلند با مصالح سنگین است، ۱۵ درصد سطح پلان می باشد [۱].

شکل ۱-۴. ساختمان Monadnock در شیکاگو [۱]

[۶] Mega Column

بنای آرامگاه گنبد قابوس بن وشمگیر معروف به میل قابوس واقع در مرکز شهر گنبد کاووس در استان مازندران، احتمالاً بلندترین ساختمان آجری است. بلندی این بنا از روی تپه ای که بر بالای آن ساخته شده ۵۵ متر است که شامل ۳۷ متر بدنه پرده ای و ۱۸ متر مخروط رأس آن می باشد. قدمت بنا حدود یک هزار سال است. نمای این بنای تاریخی در شکل ۱-۵ نشان داده شده است [۲].

شکل ۱-۵. بنای آرامگاه گنبد قابوس بن وشمگیر در ایران [۲]

در سال ۱۸۸۵ یک مهندس آمریکایی به نام ویلیام لیبارون جنی[۷] هنگامی که پی برد یک ساختمان اداری می تواند به طور کلی با استفاده از مواد مختلف ساخته شود، خالق یک آسمان خراش مدرن شد. او فولاد سازه ای را انتخاب کرد و با بکارگیری آن توانست ساخت برج های اداری بلند را که امروزه نماد کلان شهرهای مدرن هستند؛ میسر سازد. او به جای تکیه بر دیوارهای بنایی سنگین برای تحمل وزن طبقات بالایی و همچنین بارهای ثقلی، ایده مبتکرانه ای مطرح کرد. سرانجام ساختمان او به نام خانه بیمه در شیکاگو با ۱۰ طبقه و اسکلت فولادی ساخته شد (شکل ۱-۶) [۱].

به تدریج دو پیشرفت اساسی، یکی به کارگیری آسانسورها و دیگری ساخت قاب های فولادی مدرن، محدودیت ارتفاع ساختمان ها را از بین برد. رقابت برای کلان شهر بودن که بر اساس ارتفاع ساختمان ها قضاوت می شد؛ بین شیکاگو و نیویورک آغاز شد. در سال ۱۹۱۳ ساختمان Woolworth (شکل ۱-۷) اولین بنایی بود که به ۶۰ طبقه با ارتفاع ۲۴۲ متر (۷۹۲ فوت) رسید. این ساختمان در محله منهتن در کشور نیویورک واقع شده است و با

[۷] William LeBaron Jenny

سبک کلیسای گوتیک هنوز بعد از ۷۰ سال قابل استفاده و سرویس دهی است و دارای آسانسورهای اتوماتیک و سیستم تهویه هوا می باشد. در مدت جنگ جهانی اول یک سکوت موقت در ساخت بناهای بلند وجود داشت اما با تجدید شدن قدرت بعد از جنگ، این فعالیت دوباره اوج گرفت. از این پس سازه های بسیار خوبی در نیویورک ساخته شدند مانند ساختمان ۶۶ طبقه Wall ٦٠ به ارتفاع ۲۹۰ متر (۹۵۰ فوت)، ساختمان ۷۱ طبقه Cities service به ارتفاع ۲۸۳ متر (۹۲۷ فوت) و ساختمان ۷۷ طبقه Chrysler به ارتفاع ۳۱۹ متر (۱۰۴۶ فوت). نمایی از این ساختمان های بلند در شکل های ۱-۸ تا ۱-۱۰ نشان داده شده است [۱].

شکل ۱-۶. ساختمان خانه بیمه در شیکاگو [۱]

شکل ۱-۷. ساختمان Woolworth [۱]

شکل ۱-۸. ساختمان Wall ٦٠ [۱]

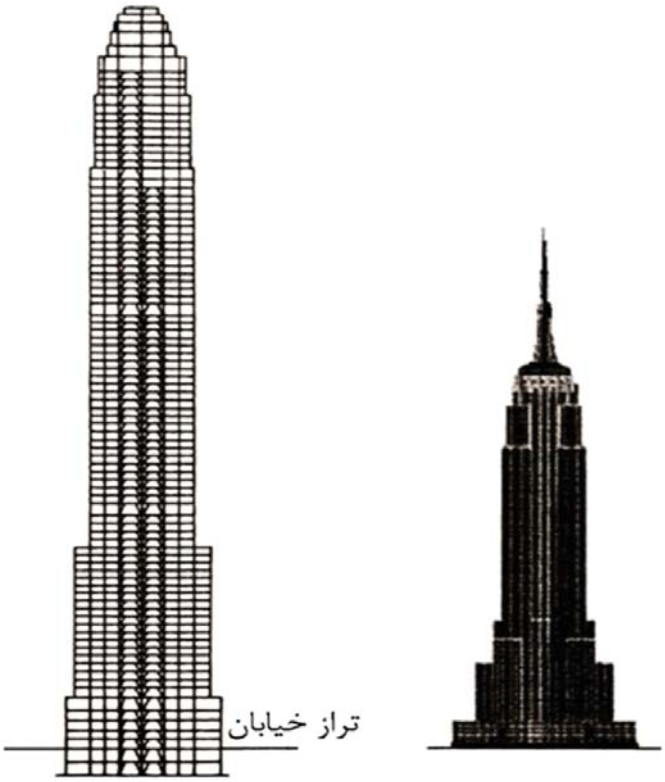
شکل ۱-۹. ساختمان Cities service [۱]

شکل ۱-۱۰. ساختمان Chrysler [۱]

به مرور زمان تقاضا برای ساختمان های بلند افزایش یافت و به تدریج سرمایه گذاری در توسعه ساختمان های بلند نه تنها تبدیل به یک منبع شهرت بلکه به یک سرمایه گذاری مالی برجسته به عنوان یک منبع در آمد تبدیل شد. از طرفی با این که جهان پر از سازه های جالب، بزرگ و کوچک، قدیمی و جدید است، چشمگیرترین ساختمان هایی که بیشترین حس شگفتی را در بیننده به وجود می آورد؛ آسمان خراش های مدرن هستند. تا سال های اخیر هنگامی که از آسمان خراش ها صحبت می شد، توجه بیننده به سوی شهرهای بزرگ مانند نیویورک و شیکاگو جلب می شد. اما این عنوان ابتدا توسط برج های دو قلوی پتروناس در کوالا لامپور و سپس توسط برج تایپه ۱۰۱ در تایپه و اخیراً توسط برج ۱۶۰ طبقه خلیفه (که یک برج مسکونی و بتنی در خلیج تجاری دبی است)، ربوده شده است [۱].

در سال ۱۹۳۱ در نیویورک ساختمان امپایر استیت با ۱۰۲ طبقه و ارتفاع تقریبی ۳۸۱ متر (۱۲۵۰ فوت) ساخته شد و بعدها یک آنتن تلوزیونی به ارتفاع ۶۷/۷ متر (۲۲۲ فوت) در بالای آن اضافه شد (شکل ۱-۱۱). این ساختمان بلندتر از ارتفاع ۳۰۰ متری (۹۸۴ فوت) برج ایفل در پاریس است که بلندترین سازه قرن ۱۹ بوده است. این برج در حال حاضر پانزدهمین برج بلند جهان و چهارمین برج بلند آمریکا به حساب می آید. در میان بسیاری از ویژگی های شگفت انگیز این ساختمان این واقعیت وجود دارد که بیش از ۷۳ آسانسور در ساخت آن به کار رفته است؛ اگر چه تمام آسانسورها کل ارتفاع برج را نمی پیمایند. به علاوه این ساختمان در مدت نسبتاً کوتاهی یعنی ۴۱۰ روز ساخته شده است. سیستم سازه ای این برج شامل قاب های فولادی خمشی و قاب های مهاربندی شده با اتصالات پیچی می باشد.

مصرف فولاد در این ساختمان نیز ۵۵۰۰۰ تن بوده است. نمایی از اتصالات پیچی به کار رفته در این برج در شکل ۱-۱۲ مشاهده می گردد. این برج برای حدود ۴۰ سال یعنی از زمان تکمیل آن در سال ۱۹۳۱ تا زمان افتتاح برج های دوقلوی مرکز تجارت جهانی، بلندترین ساختمان مهندسی دنیا بوده است [۴].



شکل ۱-۱۱. ساختمان امپایر استیت در نیویورک [۴]

شکل ۱-۱۲. اتصالات پیچی در قاب خمشی ساختمان امپایر استیت [۴]

پس از ساختمان امپایر استیت، برج های دوقلوی مرکز تجارت جهانی[۸] در نیویورک ساخته شده که بلندترین ساختمان جهان در سال ۱۹۷۲ بوده و هر برج آن دارای ارتفاع ۴۱۷ متر (۱۳۶۸ فوت) می باشد (شکل ۱-۱۳). ارتفاع این برج ها به علاوه آنتن های تلویزیونی و سایر آنتن ها ۵۲۵ متر (۱۷۲۷ فوت) است. متاسفانه این برج ها به خاطر حمله تروریستی در ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ از بین رفتند.

با رجوع به بلندترین برج های جهان شاید جای تعجب باشد که سه برج بلند دنیا خارج از چین و آمریکا وجود دارند. در کوالا لامپور (پایتخت مالزی)، برج های دوقلوی پتروناس با ارتفاع ۴۵۲ متر (۱۴۸۳ فوت) و ۸۸ طبقه قرار گرفته اند (شکل ۱-۱۴). در سال ۱۹۷۴ برج ۱۱۰ طبقه سیرز در شیکاگو (شکل ۱-۱۵) بلندترین ساختمان دنیا با ارتفاع ۴۴۲ متر (۱۴۵۰ فوت) بود. هم اکنون بلندترین ساختمان جهان برج خلیفه می باشد. اما تا قبل از احداث برج خلیفه، برج تایپه ۱۰۱ است با ارتفاع ۵۰۸ متر (۱۶۷۱ فوت) و ۱۰۱ طبقه در تایپه پایتخت تایوان بلندترین ساختمان جهان شمرده می شد (شکل ۱-۱۶) [۱].

برج خلیفه که در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است، یک آسمان خراش بسیار بلند در دبی، امارات متحده عربی است. این برج دارای پلان Y شکل با عقب نشینی هایی[۹] در هر بخش از پلان می باشد. این عقب نشینی ها با یک الگوی پلکانی مارپیچی به طرف بالا حرکت کرده و سبب شده سطح مقطع طبقات برج به سمت بالا کاهش یابد [۵].

شکل ۱-۱۳. برج WTC در نیویورک [۱]

شکل ۱-۱۴. برج پتروناس در مالزی [۱]

[۸] World Trade Center (WTC)
[۹] Set Back

شکل ۱-۱۵. برج سیرز در شیکاگو [۱]

شکل ۱-۱۶. برج تایپه ۱۰۱ در تایپه [۱]

شکل ۱-۱۷. الف) نمای برج خلیفه، ب) پلان برج خلیفه [۵]

در ابتدا ساختمان های بلند تمایل به شکل های منشوری داشتند اما امروزه حتی محافظه کارترین معماران، ساختمان های پر زرق و برق را طراحی می کنند. مالکان و توسعه دهندگان که زمانی در طراحی شک داشتند؛ اکنون انتظار طرح های جدید را می کشند. در پاسخ، معماری معاصر، ساختمان هایی با ۳ تا ۱۰ وجه، مشابه ساختمان های گرد را طراحی و تولید می کند. اگر چه شکل ساختمان نقش بسیاری در عملکرد ساختمان تحت بارهای لرزه ای و باد دارد؛ اما تا حدودی به مهندسین این فرصت داده شده که در شکل ساختمان تغییراتی

ایجاد نمایند (البته اگر به طور صحیح انجام شود؛ وگرنه شکل ساختمان های منشوری، مربع و یا دایره ای مناسب تر خواهد بود). با این وجود نقش مهندسین به بهینه سازی برای اشکال خاصی که معماران و مالکان فراهم می آورند، بر اساس ضوابط و مفاهیم سازه ای محدود می شود [۱].

امروزه با استفاده از کامپیوترها ساختمان هایی طراحی می شوند که هیچ پیشینه تاریخی نداشته اند. استفاده از سیستم های سازه ای جدید در ساختمان های بلند، بیانگر توانایی مهندس در تحلیل و اعتماد به راه حل های کامپیوتری می باشد. کامپیوترها محاسباتی را که زمانی مشکل بوده اند، آسان کرده اند و به مهندس اجازه می دهند تا پیکربندی های جدید را برای کاهش هزینه سازه ای تجربه کند. به علاوه آنچه که حائز اهمیت است کاهش چشمگیر در مصالح سازه ای است که مهندسین به خاطر تکنیک های طراحی نوین، قادر به دستیابی آن بوده اند.

همانطور که اشاره شد، سازه های بلند در اواخر قرن نوزدهم در ایالات متحده آمریکا پدید آمدند. با دیدن یک سازه بلند شاید این اصطلاح در اذهان تداعی شود که یک سازه آمریکایی است؛ بدین معنی که مهم ترین سازه های بلند در کشور آمریکا ساخته شده اند. اما در واقع بسیاری از ساختمان های بلند در سرتاسر دنیا مخصوصاً در قاره آسیا مانند چین، کره، ژاپن و مالزی گسترش یافته اند. بر اساس آمار و اطلاعات جمع آوری شده در دهه ۱۹۸۰ که در جدول ۱-۱ آمده است؛ تقریباً ۴۹ درصد سازه های بلند جهان، در آمریکای شمالی قرار دارند. این رقم نشان می دهد که بیشترین درصد ساخت در آن زمان مربوط به این ایالت بوده است. نتایج بررسی های جدید در دهه های اخیر مطابق جدول ۱-۲ نشان می دهد که توزیع ساختمان های بلند تغییر کرده است؛ به طوری که حدود ۳۲٪ ساختمان های بلند مربوط به آسیا و ۲۴٪ مربوط به آمریکا می باشد. این تغییرات بیانگر آن است که بیشتر توسعه سازه های بلند در آسیا بوده و فقط ۲ عدد از ساختمان های بلند در این دوره، یعنی ساختمان سیرز و امپایر استیت در آمریکای شمالی قرار دارند. همانطور که اشاره شد در ساخت سازه های بلند پارامترهای مختلفی مؤثر هستند [۶].

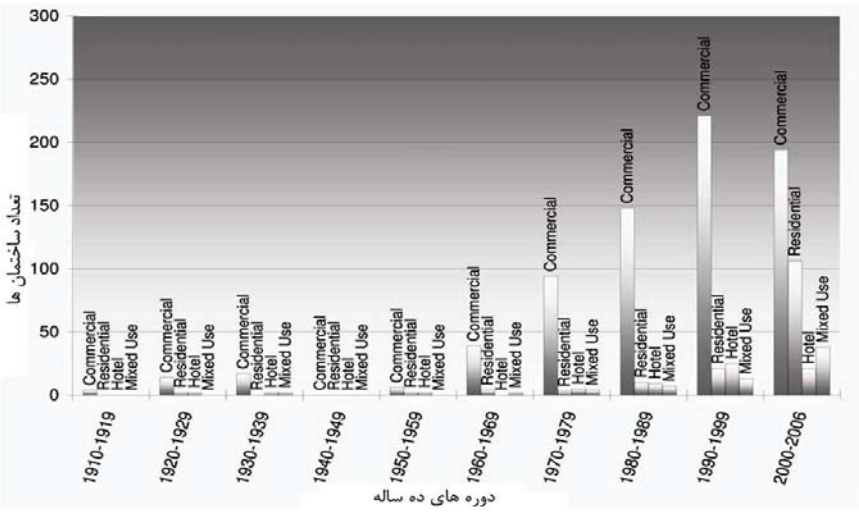
تحقیقات صورت گرفته بر روی اهداف کاربردی در دهه های قرن بیستم نشان می دهد که در میان کاربری های متنوعی همچون تجاری، مسکونی و هتل ها، چند منظوره بودن و یا عملکرد تجاری در این گونه سازه ها به منظور اقتصادی تر شدن، رشد چشمگیری داشته است (شکل ۱-۱۸). به علاوه جزئیات ده ساختمان بلند دنیا در سال ۲۰۱۰ در جدول ۱-۳ تشریح شده است [۶].

جدول ۱-۱. توزیع ساختمان های بلند در دهه ۱۹۸۰ [۶]

منطقه	تعداد کشور	تعداد ساختمان	درصد
آمریکای جنوبی	۴	۱۷۰۱	۴۸/۹
اروپا	۳۵	۷۴۲	۲۱/۳
آسیا	۳۵	۷۰۲	۲۰/۲
آمریکای جنوبی	۱۳	۱۸۱	۵/۲
استرالیا	۲	۵۴	۱/۶
خاور میانه	۱۵	۵۱	۱/۵
آفریقا	۴۱	۴۷	۱/۳
آمریکای میانی	۲۰	۴	۱/۰
کل	۱۶۵	۳۴۸۲	۱۰۰

جدول ۱-۲. توزیع ساختمان های بلند در دهه های اخیر [۶]

منطقه	تعداد کشور	تعداد ساختمان	درصد
آسیا	۲۰	۳۵۰۱۶	۳۲/۲
آمریکای شمالی	۱۸	۲۶۰۵۳	۲۳/۹
اروپا	۲۰	۲۵۸۰۹	۲۳/۷
آمریکای جنوبی	۱۰	۱۸۱۲۹	۱۶/۶
اقیانوسیه	۷	۲۸۳۹	۲/۶
آفریقا	۲۰	۱۰۷۸	۱
کل	۹۵	۱۰۸۹۲۴	۱۰۰



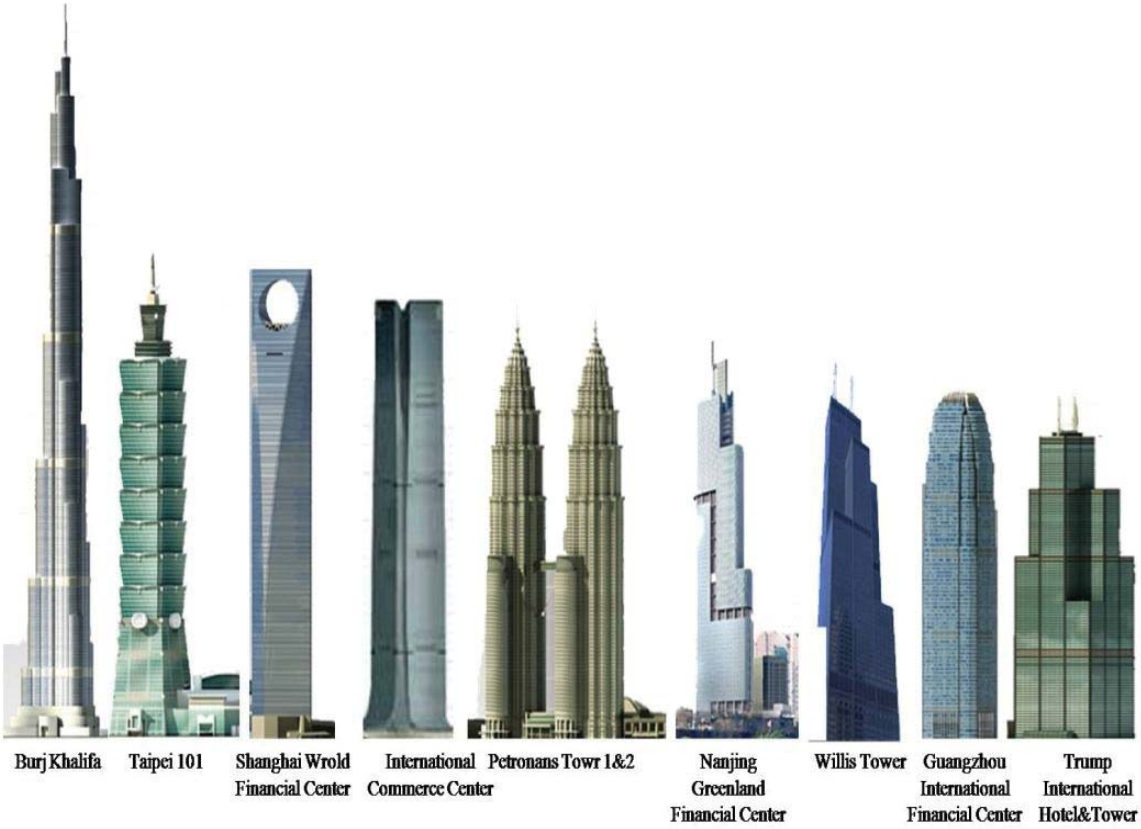
شکل ۱-۱۸. توزیع انواع ساختمان های بلند بر اساس کاربری آنها [۶]

جدول ۱-۳. مشخصات ده ساختمان بلند دنیا در سال ۲۰۱۰ [۶]

ردیف	نام ساختمان	شهر	سال	تعداد طبقات	ارتفاع طبقات		مصالح	کاربری
					متر	فوت		
۱	Burj Khalifa	دبی	۲۰۱۰	۱۶۳	۸۲۸	۲۷۱۷	بتن-فولاد	هتل-مسکونی-اداری
۲	Taipei ۱۰۱	تایپه	۲۰۰۴	۱۰۱	۵۰۸	۱۶۶۷	کامپوزیت	اداری
۳	Shanghai Wrold Financial Center	شانگهای	۲۰۰۸	۱۰۱	۴۹۲	۱۶۱۴	کامپوزیت	اداری-هتل
۴	International Commerce Center	هونگ کونگ	۲۰۱۰	۱۰۷	۴۸۳	۱۵۸۵	کامپوزیت	اداری-هتل
۵	Petronans Towr ۱	کوالا لامپور	۱۹۹۸	۸۸	۴۵۲	۱۴۸۳	کامپوزیت	اداری
۶	Petronans Towr ۲	کوالا لامپور	۱۹۹۸	۸۸	۴۵۲	۱۴۸۳	کامپوزیت	اداری
۷	Nanjing Greenland Financial Center	نانجینگ	۲۰۱۰	۶۹	۴۵۰	۱۴۷۶	کامپوزیت	اداری-هتل
۸	Willis Tower	شیکاگو	۱۹۷۴	۱۰۸	۴۴۲	۱۴۵۱	فولاد	اداری
۹	Guangzhou International Financial Center	گوانگجو	۲۰۱۰	۱۰۳	۴۳۸	۱۴۳۵	کامپوزیت	اداری-هتل
۱۰	Trump International Hotel&Tower	شیکاگو	۲۰۰۹	۹۸	۴۲۳	۱۳۸۹	بتن	هتل-مسکونی

همانطور که در جدول ۱-۳ مشاهده می گردد، بلندترین برج دنیا، برج خلیفه در کشور دبی است که هم اکنون با ارتفاع بی نظیر خود، لقب بلندترین برج دنیا را به خود اختصاص

داده است. نمای ده ساختمان مطرح شده در جدول ۳-۱ در شکل ۱-۱۹ مشاهده می گردد [۷].



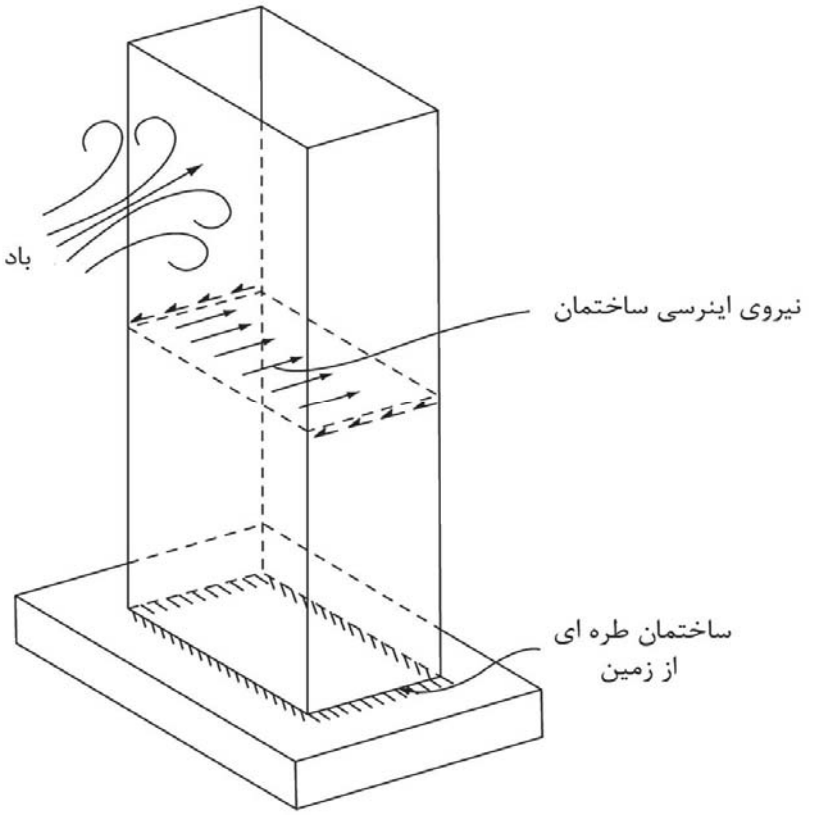
شکل ۱-۱۹. نمای ده ساختمان بلند دنیا در سال ۲۰۱۰ [۷]

در بخش ذیل، پیش از طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند، به بیان مفاهیم سازه ای و پارامترهای مؤثر در طراحی سیستم های مقاوم جانبی خواهیم پرداخت.

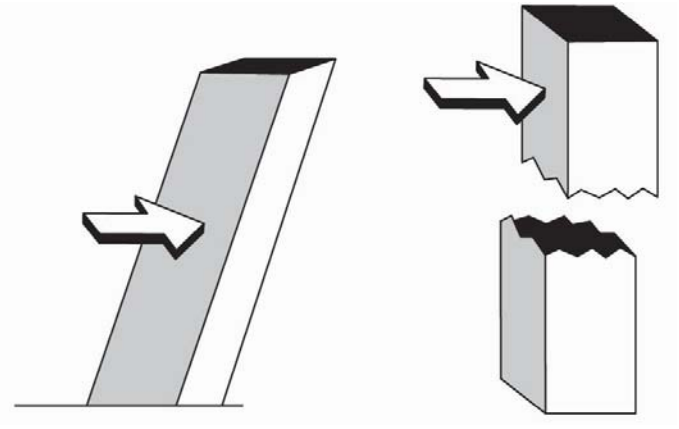
۱-۴ مفاهیم سازه ای [۱]

ایده کلیدی برای درک بهتر از رفتار سیستم سازه ای یک ساختمان بلند و باریک، تصور ساختمان به عنوان یک ستون طره ای از زمین است (شکل ۱-۲۰). نیروهایی که به طور جانبی یا به خاطر وزش باد به ساختمان اعمال می شوند و یا به خاطر نیروهای اینرسی القاء شده به خاطر حرکت زمین به وجود می آیند؛ تمایل دارند ساختمان را گسیخته کنند (برش) یا به سمت جلو فشار دهند (خمش). بنابراین ساختمان باید سیستمی داشته باشد که علاوه بر مقاومت برشی در برابر خمش نیز مقاوم باشد (شکل ۱-۲۱) و به طور کلی ساختمان نباید کرنش های ماورای حد الاستیک داشته باشد.

به طور مشابه سیستم مقاوم خمشی باید سه نیاز را تأمین کند (شکل ۱-۲۲). ساختمان نباید در اثر ترکیب نیروهای ثقلی و نیروهای جانبی ناشی از زمین لرزه یا باد، واژگون شود؛ نباید با شکست پیش از موقع ستون ها به خاطر خردشدگی یا نیروهای کششی زیاد بشکند و در آخر تغییر شکل خمشی آن نباید بیشتر از محدوده ی الاستیک باشد. به علاوه، یک ساختمان در مناطق زلزله خیز باید بتواند در برابر نیروهای زلزله بدون از دست دادن ظرفیت تحمل بارهای ثقلی، مقاومت کند.

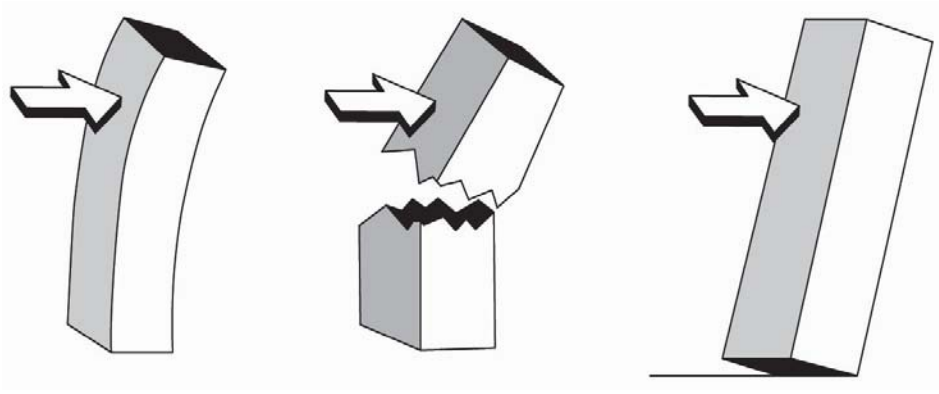


شکل ۱-۲۰. مفهوم سازه ای ساختمان بلند [۱]



(ب) **(الف)**

شکل ۱-۲۱. مقاومت برشی ساختمان، الف) ساختمان نباید بشکند، ب) ساختمان نباید تغییرشکل برشی اضافی داشته باشد [۱]



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱-۲۲. مقاومت خمشی ساختمان، الف) ساختمان نباید واژگون شود، ب) ستون ها نباید در فشار یا کشش تخریب شوند، ج) تغییرشکل خمشی نباید از مقدار مجاز تجاوز کند [۱]

در سازه های مقاوم در برابر برش و خمش، یک مسأله مهم، شروع حرکت ساختمان است. بنابراین مشکل سوم مهندسین به وجود می آید: درک حرکات یا ارتعاشات ساختمان. اگر ساختمان نوسان داشته باشد و به شدت شتاب بگیرد، راحتی انسان از بین می رود یا مهم تر از آن ممکن است عناصر غیر سازه ای بشکنند و منجر به آسیب های پر هزینه به لوازم ساختمان شده و برای عابرین پیاده خطر داشته باشد. به طور کلی یک فرم سازه ای کامل برای مهار کردن تأثیرات خمش، برش و نوسانات زیاد سیستمی است که پیوستگی عمودی داشته باشد و در دورترین بخش از مرکز هندسی ساختمان قرار گیرد.

۱-۴-۱ شاخص صلبیت برشی و خمشی [۱]

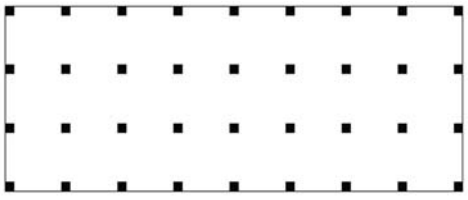
با این شرط که ساختمان بلند همانند یک ستون طره ای از زمین عمل می کند؛ واضح است که تمام ستون ها باید در لبه پلان باشند. بنابراین پلان نشان داده شده در شکل ۱-۲۳-ب بر شکل ۱-۲۳-الف ارجحیت دارد. البته این چیدمان همیشه ممکن نیست. مطالعه این که مقاومت خمشی چگونه تحت تأثیر چیدمان ستون ها در پلان است؛ جالب می باشد. ما در اینجا دو پارامتر را استفاده خواهیم کرد: شاخص صلبیت خمشی[۱۰] (BRI) و شاخص صلبیت برشی[۱۱] (SRI).

[۱۰] Bending Rigidity Index
[۱۱] Shear Rigidity Index

شاخص صلبیت خمشی، ممان اینرسی کل ستون های ساختمان حول محورهای ثقلی است که به عنوان یک سیستم منسجم عمل می کند. اگر کارآمدی نهایی خمش در یک ساختمان مربعی که تمام ستون های ساختمان، شامل چهار ستون در گوشه های پلان است (شکل ۱-۲۴-الف) با ستون های بیشمار در ساختمان های سنتی دهه ۱۹۳۰ (شکل ۱-۲۴-ب) مقایسه نماییم، نتایج نشان می دهد که پلان شکل ۱-۲۴-الف حداکثر کارایی را دارد و دارای شاخص صلبیت خمشی ایده آل یعنی ۱۰۰ می باشد.

ساختمان های بلند سنتی دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ دارای ستون های خارجی با فاصله نزدیک و دهانه های زیادی بین هسته آسانسور تا نمای خارجی هستند که این چیدمان سیستم لوله ای نامیده می شود. اگر تنها ستون های پیرامونی برای مهار کردن بارهای جانبی استفاده شوند؛ شاخص صلبیت خمشی برای این چیدمان ۳۳ بدست می آید (شکل ۱-۲۴-ج). یک نمونه از این نوع پلان در ساختمان مرکز تجارت جهانی در نیویورک (که از بین رفته است) استفاده شده بود. برج سیرز در شیکاگو تمام ستون هایش را به عنوان بخشی از سیستم جانبی در سیستمی به نام لوله دسته بندی شده به کار برده است. شاخص صلبیت خمشی برای این برج برابر با ۳۳ می باشد (شکل ۱-۲۴-د).

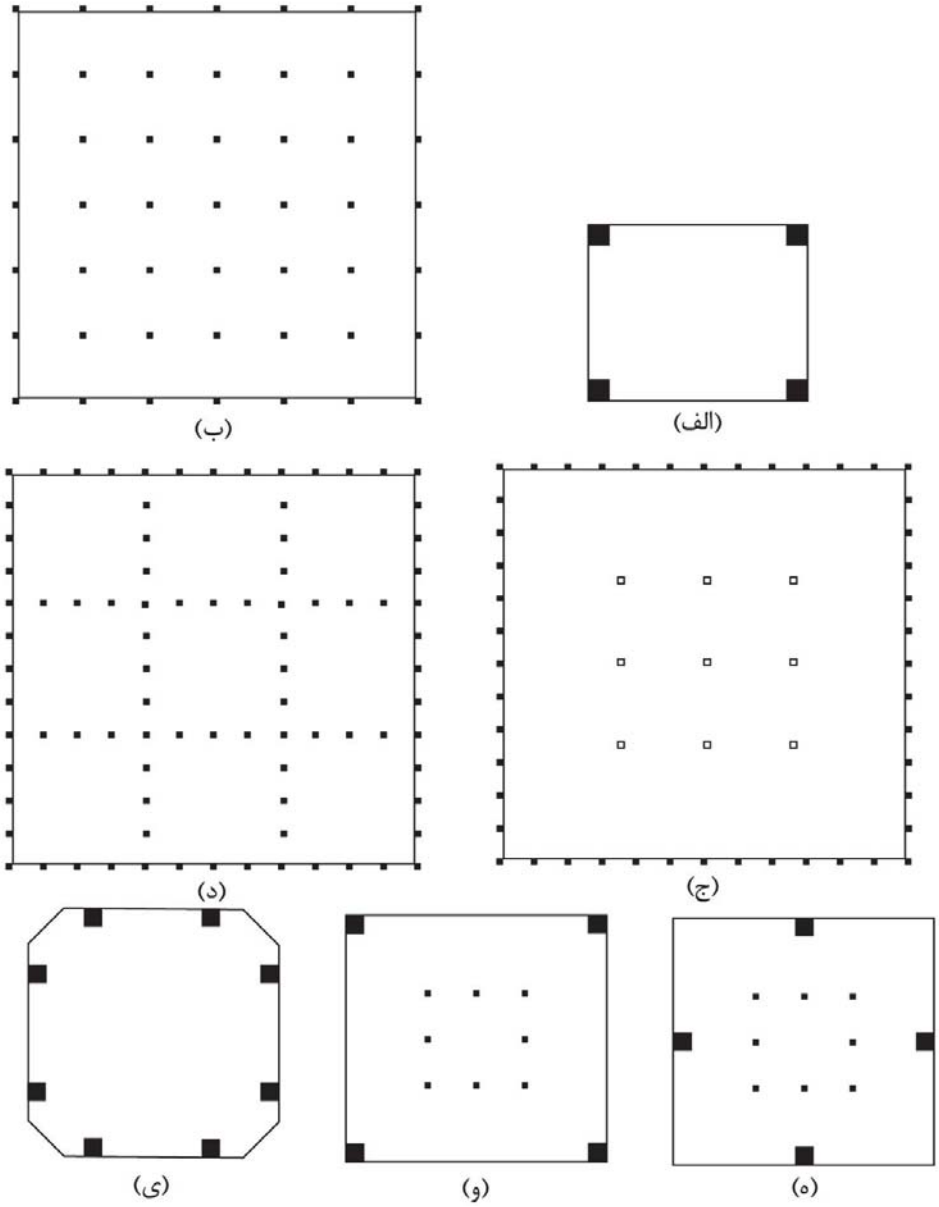
برج City Crop (شکل ۱-۲۴-ه)، تمام ستون هایش را به عنوان بخشی از سیستم جانبی به کار برده است، اما ستون ها نمی توانستند در کنج ها قرار بگیرند؛ در نتیجه شاخص صلبیت خمشی به ۳۱ کاهش می یابد. اگر این ستون ها به کنج ها انتقال می یافتند، شاخص صلبیت خمشی به ۵۶ افزایش می یافت (شکل ۱-۲۴-و). با این وجود به علت آن که ۸ ستون در هسته وجود دارد که بارهای ثقلی را تحمل می کنند؛ صلبیت خمشی از ۱۰۰ کمتر می شود.



(الف)

(ب)

شکل ۱-۲۳. پلان ساختمان، الف) توزیع یکنواخت ستون ها، ب) ستون های متمرکز شده در لبه های پلان [۱]



شکل ۱-۲۴. چیدمان ستون ها و شاخص صلبیت خمشی، الف) ساختمان های مربعی با ستون های گوشه با BRI=۱۰، ب) ساختمان های قدیمی دهه ۱۹۳۰، ج) ساختمان های مدرن با BRI=۳۳، د) برج سیرز با BRI=۳۳، ه) برج City Crop با BRI=۳۱، و) ساختمان با ستون های گوشه و مرکزی با BRI=۵۶، ی) ساختمان Bank of Southwest، BRI=۶۳ [۱]

ساختمان Bank of Southwest یک ساختمان در هوستن، ایالت تگزاس است که دیدگاهی واقع گرایانه برای صلبیت خمشی دارد. با توجه به پلان این برج شاخص صلبیت خمشی برابر با ۶۳ است (شکل ۱-۲۴-ی). در این برج ستون های گوشه از هم جدا شده و از گوشه ها تغییر مکان می دهند تا چشم اندازی زیبا از داخل فضای ساختمان به وجود آورند.

همان طور که پیش تر گفته شد برای این که ستون ها به عنوان عناصر یک سیستم پیوسته عمل کنند لازم است که آن ها را از درون ساختمان با یک سیستم مقاوم برشی متصل کرد. برخی از راه حل های ممکن و بررسی شاخص صلبیت برشی سیستم های مختلف بر اساس تحقیقات تارانا[۱۲] در سال ۲۰۱۰ در این بخش ارائه شده است.

سیستم برشی ایده آل یک صفحه یا دیوار بدون بازشو است که نهایتاً یک شاخص صلبیت برشی برابر با ۱۰۰ دارد (شکل ۱-۲۵-الف). دومین سیستم برشی مناسب، سیستم شبکه ای قطری با زاویه ۴۵ درجه است که شاخص صلبیت برشی آن برابر با ۶۲/۵ می باشد (شکل ۱-۲۵-ب). سیستم های مهاربندی معمولی که قطری ها و المان های افقی را ترکیب کرده اما از مصالح بیشتری استفاده می کند؛ در شکل ۱-۲۴-ج نشان داده شده است. صلبیت برشی در این سیستم ها بستگی به شیب قطری ها دارد که معمول ترین مقدار برای زاویه ۴۵ درجه، برابر با ۳۱/۳ است.

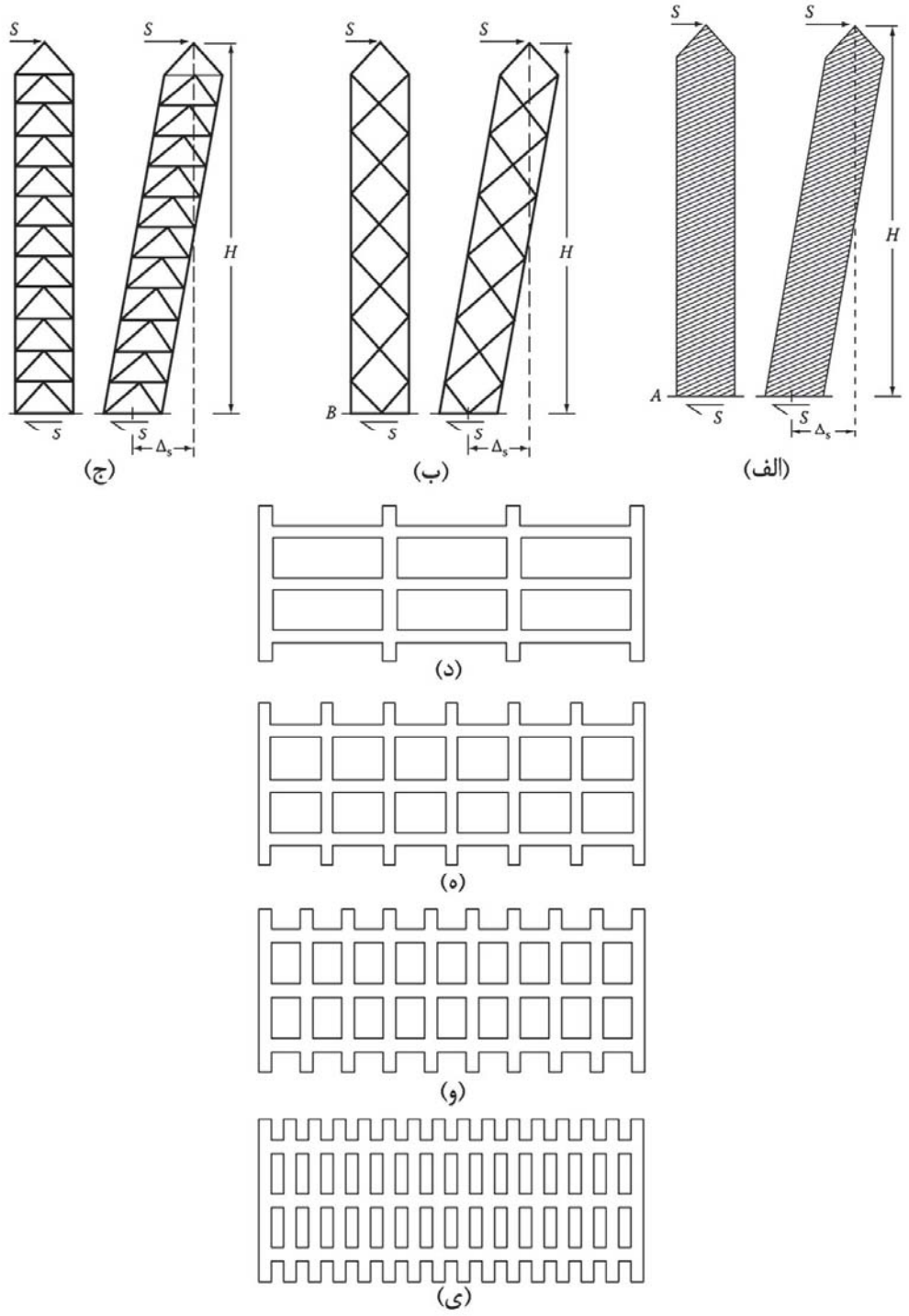
پر کاربردترین سیستم برشی، قاب ها با اتصالات صلب هستند که در شکل های ۱-۲۵-د تا ۱-۲۵-ی نشان داده شده است. کارآمدی یک قاب همانطور که توسط شاخص صلبیت برشی اندازه گیری می شود؛ بستگی به نسبت های طول و عمق المان ها دارد. یک قاب با ستون های نزدیک به هم، همانطور که در شکل ۱-۲۵-ه تا ۱-۲۵-ی نشان داده شده است؛ صلبیت برشی بالایی دارد و با یک پیکربندی خمشی کارآمد، دو برابر نیز می شود. پیکربندی حاصل «سیستم لوله ای» نامیده می شود که مبنای طرح سازه ای ساختمان های بلند بیشماری می باشد.

لازم به ذکر است، در طراحی سیستم های مقاوم جانبی تشخیص دادن «طراحی بر اساس باد» و یا «طراحی لرزه ای» بسیار مهم می باشد. سیستم جانبی باید برای نیروهای باد یا نیروهای لرزه ای هر کدام که بزرگ تر است؛ طراحی شود. با این حال، به علت آن که احتمال دارد نیروهای لرزه ای واقعی بزرگ تر از نیروهای آیین نامه ای باشند، ساختمان های مناطق بسیار زلزله خیز حتی هنگامی که نیروهای باد حاکم است؛ باید برای تأمین ضوابط لرزه ای و شکل پذیری نیز بررسی شوند. به همین دلیل ضوابط لرزه ای به طور پیشرونده ای سخت تر می شوند.

اثرات نیروهای لرزه ای در بسیاری از مناطق جهان، نسبتاً کوچک است؛ همانند منطقه لرزه ای کالیفرنیا. انعطاف پذیری یک ساختمان بسیار بلند به عنوان مثال بالای ۵۰ طبقه، به ساختمان اجازه می دهد در اثر حرکات زمین بدون افزایش نیروهای مورد نیاز برای طراحی

[۱۲] Taranath

باد؛ به جلو و عقب نوسان داشته باشد. بنابراین در یک منطقه با خطر لرزه خیزی زیاد، طراحی ساختمان های بلند با نیروهای باد کنترل می شود و همانطور که قبلاً گفته شد؛ جزئیات المان ها و اتصالات آنها باید ضوابط لرزه ای را ارضا کند.

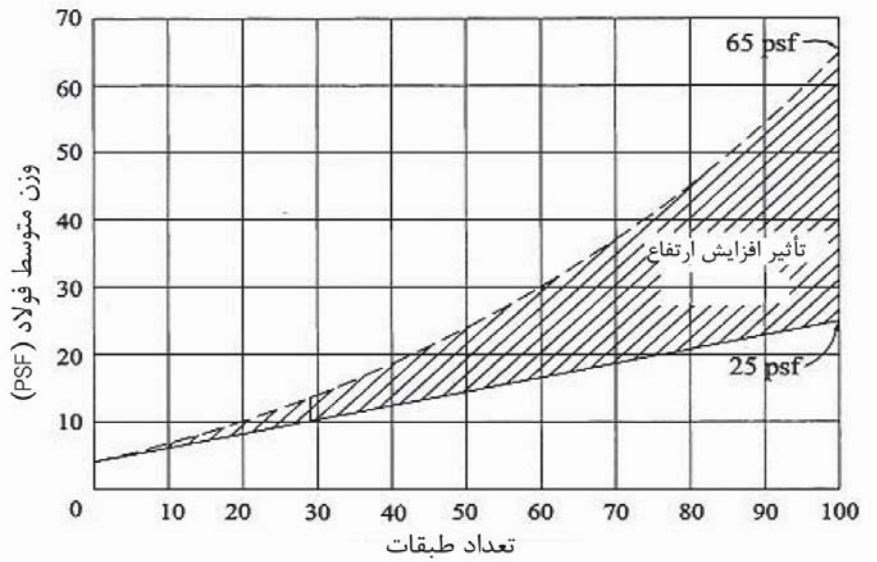


شکل ۱-۲۵. سیستم های مقاوم برشی در ساختمان های بلند، الف) دیوار برشی، ب) شبکه قطری، ج) شبکه قطری با اعضای افقی، د تا ی) قاب های صلب [۱]

با توجه به مطالب گفته شده، انتخاب سیستم مقاوم جانبی مناسب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین منظور در ابتدا طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند ذکر می گردد و در فصل های آینده، جزئیات هر یک از سیستم ها مورد بررسی قرار می گیرد. اما پیش از طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند، با توجه به این که افزایش ارتفاع تأثیر به سزایی در اضافه شدن وزن ساختمان نیز خواهد داشت، در بخش ذیل اثر افزایش ارتفاع بر روی وزن مصالح مصرفی مطرح می گردد.

۱–۵ اثر افزایش ارتفاع بر روی وزن مصالح مصرفی

امروزه با گسترش روز افزون ساخت سازه های بلند به عنوان نمادی از پیشرفت و توسعه تکنولوژی کشورها، ضرورت انتخاب سیستم هایی جهت تحمل بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله به گونه ای که به شکل بهینه با کمترین مصالح بیشترین سختی و بازده را ایجاد کنند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. فضلورخان[۱۳] برای نخستین بار تشخیص داد هنگامی که سازه بلندتر می شود، پارامتر ارتفاع به دلیل وجود بارهای جانبی اهمیت بیشتری پیدا می کند؛ از این رو با افزایش ارتفاع وزن مصالح مصرفی نیز افزایش می یابد (شکل ۱-۲۶). تحقیقات فضلورخان نشان داد، هنگامی که ارتفاع طبقات به بیش از ۱۰ طبقه برسد؛ پارامتر تغییرمکان جانبی بر طراحی حاکم است [۶].



شکل ۱-۲۶. اثر افزایش ارتفاع بر روی وزن مصالح مصرفی [۶]

[۱۳] Fazlur Khan

به طور کلی هنگامی که یک ساختمان کوتاه یا میان مرتبه برای بارهای ثقلی طراحی می شود؛ احتمالاً سازه می تواند بارهای جانبی را بدون محدودیت تحمل کند. البته این مسأله برای ساختمان های بلند برقرار نیست؛ زیرا مقاومت مورد نیاز برای لنگر واژگونی و همین طور محدودیت تغییر مکان جانبی بر اساس ضوابط موجود، همواره به مصالح اضافی و بیشتر از مقدار مورد نیاز برای بار ثقلی تنها، نیاز خواهد داشت.

با فرض دهانه های برابر بین ستون ها، مقدار مصالح مورد نیاز برای قاب بندی کف تحت بار ثقلی در سازه های بلند و کوتاه شبیه به هم هستند و هیچ تفاوتی در مقدار مصالح مورد نیاز وجود ندارد؛ چه کف قاب بندی شده در طبقه دوم یک ساختمان کوتاه و یا در طبقه ۷۰ یک ساختمان بلند باشد. بر اساس تحقیقات تارانا[۱۴] در سال ۲۰۱۰، مقدار مصالح لازم برای قاب بندی کف، تابعی از فاصله بین ستون ها می باشد نه ارتفاع ساختمان. با این وجود مصالح مورد نیاز برای سیستم باربر ثقلی مانند ستون ها و دیوارها با نسبت $(n + ۱)/۲$ افزایش می یابد که n تعداد طبقات است. این نسبت به این خاطر است که المان های سازه ای تنها برای بارهای یک طبقه ی خاص طراحی نشده اند بلکه در اثر بارهای طبقات بالاتر نیز طراحی می شوند. از طرفی در ساختمان هایی با بیش از ۵۰ طبقه، بارهای جانبی غالب می شوند و با افزایش ارتفاع نیز بیشتر خواهند شد.

در ساختمان های بلند هدف رسیدن به یک سیستم مهاربندی است که مصالح اضافی مورد نیاز برای بارها را به حداقل برساند. به عنوان مثال اگر تنها قاب صلب برای ساختمان های بلند به کار رود؛ مقدار مصالح مورد نیاز برای مهار بارهای جانبی و همین طور هزینه های سازه ای بیشتر خواهد شد. گراف شکل ۱-۲۷ این مفهوم را بیان می کند.

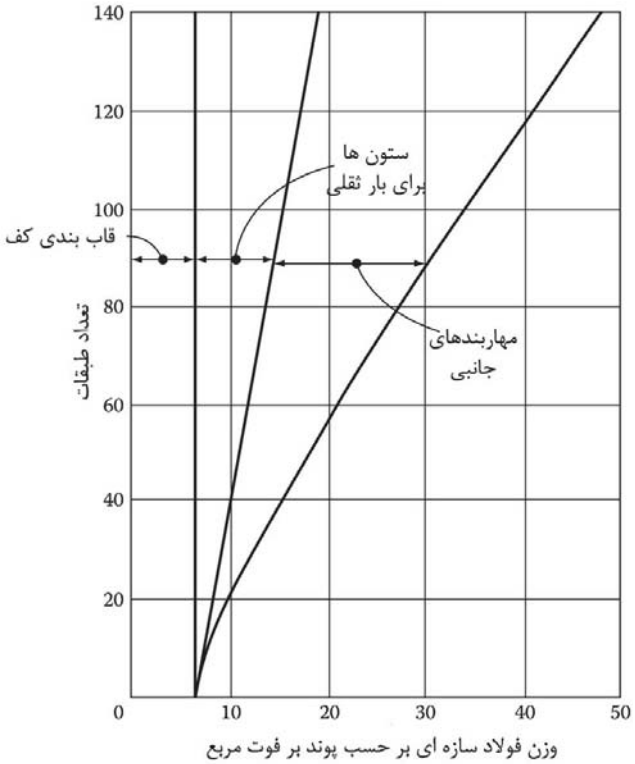
همانطور که در شکل ۱-۲۷ مشاهده می شود مقدار مصالح مورد نیاز برای قاب بندی کف با افزایش ارتفاع تغییر نمی کند؛ اما مصالح مورد نیاز برای سیستم باربر ثقلی و جانبی با افزایش ارتفاع بیشتر شده؛ به علاوه حداکثر افزایش مقدار مصالح در سیستم های باربر جانبی مشاهده می شود که بیانگر اهمیت ارتفاع در سازه های بلند و همین طور اهمیت طراحی سیستم های مقاوم جانبی مناسب برای این گونه از سازه ها می باشد [۱].

۱-۵-۱ فاکتورهایی برای کاهش وزن سازه های بلند [۱]

تاریخچه ساختمان های بلند نشان می دهد، وزن واحد اعضای سازه ای که بر حسب وزن میانگین بر فوت مربع سطح پلان محاسبه می شود؛ با گذشت سال ها رو به کاهش بوده است. برای مثال یک بررسی کلی از ساختمان های بلند فولادی ساخته شده در ۴۰ سال گذشته،

[۱۴] Taranath

تصدیق خواهد کرد که امروزه ساخت یک ساختمان صد طبقه با کمتر از ۳۰ پوند بر فوت مربع (۴۱۳۷ پاسگال) فولاد، در مقایسه با ۴۲ پوند بر فوت مربع (۲۰۱۱ پاسگال) فولاد به کار رفته در ساختمان امپایر استیت در دهه ۱۹۳۰ ممکن می باشد. دلایل این کاهش تدریجی بسیارند.



شکل ۱-۲۷. اثر افزایش ارتفاع بر روی وزن مصالح مصرفی [۱]

برخی از راهکارهای مناسب برای کاهش وزن در سازه های فولادی در ذیل ذکر شده اند:

۱. مفاهیم نوین طراحی: برای ساختمان های میان مرتبه (متوسط) در حدود ۳۰ تا ۴۰ طبقه، در حالی که فاکتورهای دیگر مساوی باشد، روش طراحی بار جانبی اگرچه مهم است اما تأثیر چندانی بر وزن مصالح سازه ای نخواهد داشت. اما برای ساختمان های بلندتر طراحی جانبی تفاوت زیادی در مقدار مصالح ایجاد می کند. بنابراین مهندسین سازه دائماً در جستجوی روش های کارآمدتر برای مهار بارهای جانبی هستند. برخی روش های رایج عبارتند از:

الف- افزایش پهنای مؤثر سیستم های زیرین[۱۵] برای مهار کردن لنگر واژگونی.

ب- طراحی سیستم هایی که اجزای آنها در کارآمترین حالت بر هم کنش دارند.

---

[۱۵] Subsystems

پ- استفاده از مهاربندهای داخلی یا خارجی برای کل پهنای ساختمان.
ت- سازماندهی قاب های سازه ای به گونه ای که بیشتر بارهای ثقلی مستقیماً توسط اعضای باربر جانبی تحمل گردند.
ج- پراکندگی ماهرانه مصالح در ساخت سازه های کامپوزیت شامل بتن و فولاد به گونه ای که از بهترین ویژگی های هر دو ماده استفاده شود.
چ- به حداقل رساندن خمش تولید شده توسط بارهای جانبی در المان های اصلی.
ح- استفاده از عملکرد خرپاها برای از بین بردن خمش در ستون ها و تیرهای محیطی عمیق.
خ- استفاده از ستون های خارجی مورب و شیبدار برای کاهش تغییرمکان جانبی نسبی اگر از نظر معماری قابل قبول باشد.
د- استفاده از اشکال گرد گوشه در پلان برای کاهش فشار باد.
ذ- قرار دادن ستون ها در فواصل نزدیک در پیرامون ساختمان برای تحمل بیشتر یا حتی تمام بارهای جانبی و ثقلی.
ر- استفاده از طبقات معلق از یک هسته مرکزی به گونه ای که بار ثقلی کلی بر روی هسته اعمال شود تا نیروها برای خنثی کردن لنگر واژگونی به اندازه کافی پایین نگهداشته شوند.
ز- استفاده از یک هسته مهاربندی شده که به ستون های بیرونی از طریق خرپاهایی متصل شده است.
ژ- استفاده از ورق های فولادی در دیوارهای خارجی برای مهار کردن نیروهای جانبی.

۲- استفاده از فولاد کم آلیاژ و پر استحکام: امروزه استفاده از فولاد با مقاومت ۵ کیلوپوند بر اینچ مربع (۳۴۵ مگاپاسگال) در بیشتر سیستم های قاب بندی کف، ستون های کامپوزیت و گاهی در المان های باربر جانبی رایج است.

۳- استفاده از اتصالات جوشی: اتصالات جوشی در مقایسه با اتصالات پیچی باعث ۱۵– ۸ ٪ کاهش در وزن فولاد می شوند.

۴- استفاده از ساختمان های کامپوزیت: ترکیب فولاد و بتن از راه حل های مؤثر در کاهش هزینه نیز هستند.

۵- به حساب آوردن برهم کنش ها بین عناصر سازه ای: محاسبه بر هم کنش ها در عصر قبل از کامپیوتر نادیده گرفته می شدند و کوچک به نظر می رسیدند. اما امروزه مطالعات نشان داده است که در نظر گرفتن این عوامل تأثیر بسیاری در مقادیر سازه ای خواهد داشت.

۶- افزایش تدریجی در ظرفیت اعضا: این امر می تواند بر اساس تحقیقات گذشته و نمونه های عملی موفق انجام شود.

۷- کاهش وزن سایر مصالح مورد نیاز برای ساخت: تیغه های داخلی سنگین مربوط به گذشته هستند. استفاده از پارتیشن ها با سیستم ساخت و ساز خشک[۱۶] (تیغه‌ای که بدون استفاده از اندود مرطوب ساخته می‌شود) که به طور قابل ملاحظه ای وزن کمتری دارند؛ یک راه حل مؤثر است. مصالح بنایی به کار رفته در پوشش خارجی ساختمان، به عنوان مثال می تواند از دیوار های شیشه ای شفاف باشد. حتی هنگامی که نمای خارجی ساختمان با سنگ پوشانده شود با ترکیب مصالح سبک تر می توان تا حدودی وزن ساختمان را کاهش داد. از طرفی تغییرات در روش های ساخت سنگ، استفاده از تکه سنگ های نسبتاً لاغر را ممکن ساخته است. در سیستم هایی که از بتن یا سنگ استفاده می شود، راه هایی برای کاهش وزن ساختمان وجود دارد؛ از جمله استفاده از ورق های آلومینیومی در میان درز های پنجره ها. به علاوه استفاده از خرپاهای فولادی پیش ساخته، یک نوآوری دیگر برای کاهش وزن پوسته خارجی است.

در ساخت سازه های بتنی نیز فاکتورهای اصلی برای کاهش آرماتور و مقدار بتن به شرح زیر می باشند:

۱- تکنیک های جدید قاب بندی کف مانند استفاده از تیرچه های پرشی[۱۷] که در آن حذف برخی از تیرچه ها، منجر به کاهش وزن قاب بندی کف می گردد.

۲- استفاده از خاموت های آماده و جوش شده برای ستون ها و استفاده از رکابی ها برای تیرها که منجر به کاهش آرماتور می شود.

۳- استفاده از بتن با مقاومت بالا در حدود ۶۰۰۰-۱۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع (۴۱۳۷۰-۹۸۹۵۰ کیلو پاسگال) که امروزه کاملاً رایج است.

۴- استفاده از مصالح ریزدانه سبک که معمولاً در حدود ۱۰—۲۰ پوند بر فوت مربع (۴۷۹-۹۵۸ پاسگال) بار مرده سازه را کاهش می دهد. همچنین صرفه جویی های حاصل در آرماتورهای فولادی تقریباً ۱۰—۱۵ درصد مؤثر می باشد.

۵- بیشتر آیین نامه های حریق به دال های بسیار ضخیم هنگامی که بتن سازه ای سبک استفاده می شود، نیاز ندارند. معمولاً ضخامت حداقل ۱۲/۵ میلیمتر بتن (۰/۵ اینچ) می تواند از دال ها بدون کاهش نرخ آتش سوزی برداشته شود.

۶- استفاده از آرماتور ها با مقاومت ۷۵ کیلو پوند بر اینچ مربع (۵۱۷ مگاپاسگال).

---

[۱۶] Dry wall
[۱۷] Skip joist

۱–۶ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند [۶]

امروزه معماران و مالکان، بدنبال طرح های مؤثرتر با حداکثر سطوح مفید هستند. با تلاش های انجام شده بر روی طرح های منحصر به فرد، مهندس سازه باید به خاطر داشته باشد که بیش از یک راه برای حل یک مسئله طراحی وجود دارد. با دیدگاهی روشن مهندس به دنبال طرح های پیشنهادی و همچنین بررسی گسترده ای بر روی طراحی مفهومی با به کارگیری دانش موجود از کاربردهای جدید می باشد. شایستگی هر طرح نه تنها از نظر هزینه های سازه ای بلکه باید از دیدگاه های کلی پروژه بررسی شود. پس از اتفاق نظر در فلسفه طراحی سازه ای، محدوده ای از سیستم های سازه ای برای مهندسی ساختمان ها با ارتفاع کم، ارتفاع متوسط، ارتفاع زیاد، ارتفاع بسیار زیاد و ارتفاعی مافوق بلند به وجود آمده است.

۱–۶–۱ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی بر اساس مصالح مصرفی [۶]

در سال ۱۹۶۹ فضلورخان برای اولین بار سیستم های سازه ای در سازه های بلند را بر اساس ارتفاع آنها و همچنین با ملاحظات تأثیر فرم بر عملکرد سازه های بلند، طبقه بندی کرد. این گام آغازی در تحول ساختمان های بلند برای به وجود آمدن سیستم های سازه ای چند منظوره شد. سپس او این دیاگرام را با توسعه تکنولوژی اصلاح کرد و در سال ۱۹۷۲ طرح های کلی خود را گسترش داد و طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی برای ساختمان های بلند را بر اساس مصالح مصرفی انجام داد. اسامی سیستم های سازه ای در ساختمان های بلند بر اساس مصالح مصرفی، در جدول ۱-۴ آورده شده است.

همانطور که در جدول ۱-۴ نشان داده شده است، سیستم های سازه ای از لحاظ نوع مصالح اصلی سازه ای دسته بندی شده اند. این مصالح شامل فولاد، بتن آرمه، مرکب (فولاد و بتن) می باشند که مصالح اصلی در ساخت ساختمان های بلند می باشند. همچنین نمودار طبقه بندی سیستم های سازه ای برای مصالح فولادی و بتنی به ترتیب در شکل های ۱-۲۸ و ۱-۲۹ نشان داده شده است.

فضلورخان این طرح را این گونه تفسیر کرد: سیستم قاب فولادی که سال ها مورد استفاده مهندسین قرار گرفته است، نمی تواند تنها طرح مناسب برای سازه های بلند باشد. همچنین پیشنهاد کرد که می توان سازه را با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری به صورت سه بعدی شبیه سازی کرد. فضلور خان سیستم های سازه ای را در انواع قاب صلب، دیوارهای برشی، سیستم سازه ای مرکب قاب و دیوار برشی، کمربند خرپایی و انواع سیستم های لوله ای بر شمرد.

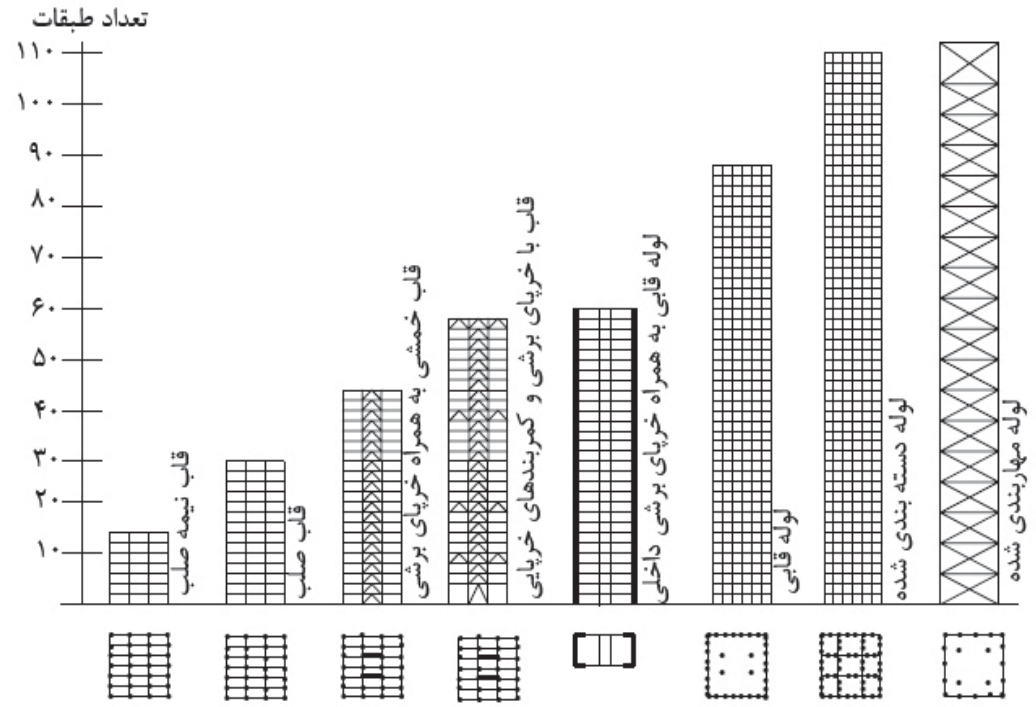
۱-۶-۲ طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی بر توزیع المان های باربر [۶]

در سال ۲۰۰۱ سان مون[۱۸] و میرعلی[۱۹] تقسیم بندی جدیدی برای سازه های بلند با در نظر گرفتن اهمیت ارتفاع بر اساس قابلیت های سیستم های مقاوم باربر پیشنهاد دادند و طبقه بندی سیستم های مقاوم جانبی برای ساختمان های بلند را بر اساس توزیع اجزای سیستم باربر جانبی انجام دادند. آنها سیستم های سازه ای برای ساختمان های بلند را به دو دسته سیستم های سازه ای داخلی[۲۰] و سیستم های سازه ای خارجی[۲۱] تقسیم بندی کردند:

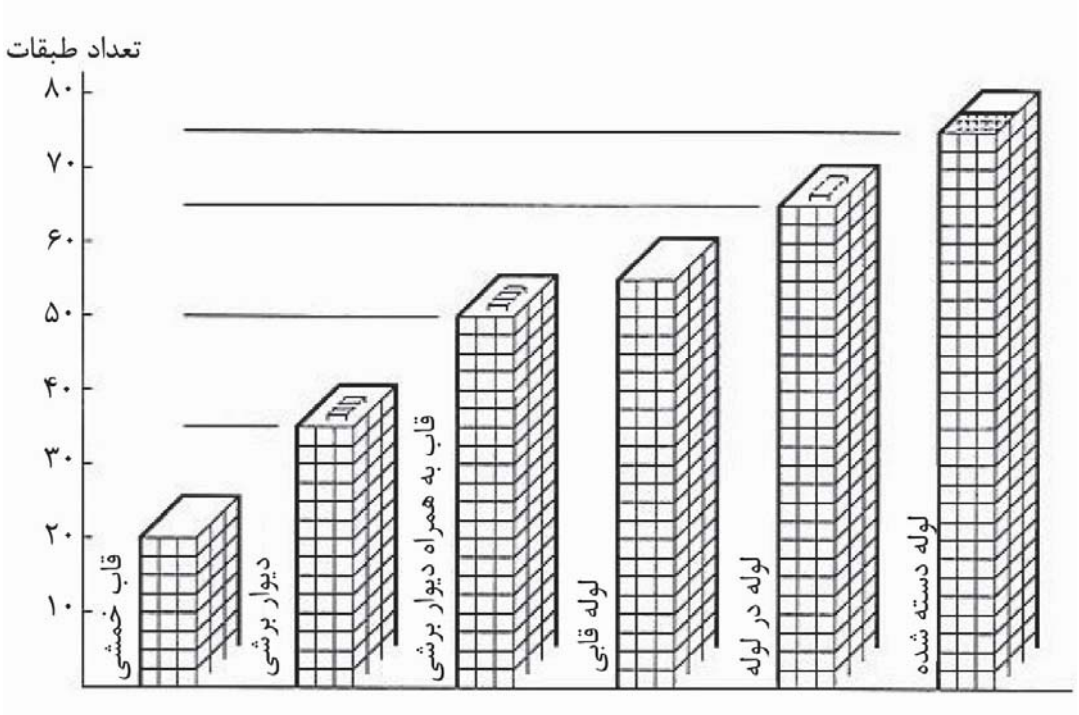
جدول ۱-۴. سیستم های مقاوم جانبی در ساختمان های بلند [۶]

ردیف	سیستم های لرزه بر	فولادی	بتنی	مرکب
۱	قاب صلب	×	×	
۲	قاب مهاربندی شده	×		
۳	قاب با خرپای کلاهک	×		
۴	لوله قابی	×	×	
۵	لوله خرپایی	×	×	
۶	لوله های دسته شده	×	×	
۷	لوله در لوله	×	×	
۸	قاب و دیوار برشی فولادی	×		
۹	سازه های معلق	×		
۱۰	سازه های فضایی	×		
۱۱	دیوار برشی بتنی		×	
۱۲	قالب تونلی		×	
۱۳	قاب خمشی و دیوار برشی بتنی		×	
۱۴	سازه های هسته ای			×
۱۵	قاب بتنی با بادبند فلزی			×
۱۶	قاب فلزی با دیوار برشی بتنی			×
۱۷	قاب فلزی با هسته بتنی			×
۱۸	سیستم مرکب لوله ای			×

[۱۸] Kyoung Sun Moon
[۱۹] Mir M. Ali
[۲۰] Interior Structure
[۲۱] Exterior Structure



شکل ۱-۲۸. سیستم های مقاوم جانبی در سازه های فولادی (فضلورخان-۱۹۷۲) [۶]



شکل ۱-۲۹. سیستم های مقاوم جانبی در سازه های بتنی (فضلورخان-۱۹۷۲) [۶]

در سیستم های سازه ای داخلی، سهم بیشتری از المان های باربر درون ساختمان و در نزدیکی هسته قرار گرفته اند. اما در نوع دوم بخش اصلی سیستم مقاوم باربر جانبی در

پیرامون ساختمان قرار دارد و بیشتر المان های باربر در خطوط پیرامونی ساختمان توزیع می گردند. بر اساس طبقه بندی آنها، سیستم های سازه ای داخلی به طور کلی به سه دسته تقسیم شدند:

۱. قاب خمشی
۲. خرپای برشی یا دیوار برشی
۳. مهاربازویی

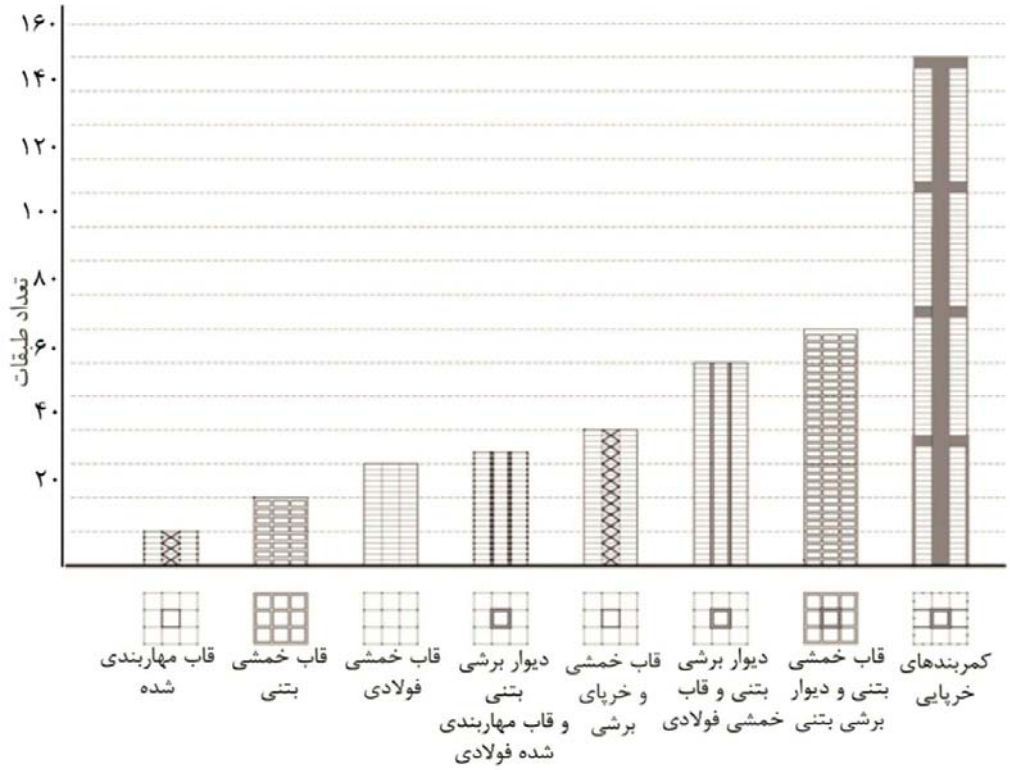
سیستم های خارجی نیز عمدتاً به دو دسته تقسیم می گردند:

۱. سیستم های لوله ای
الف) سیستم لوله قابی
ب) سیستم لوله مهاربندی شده
ج) سیستم لوله دسته شده
د) سیستم لوله در لوله

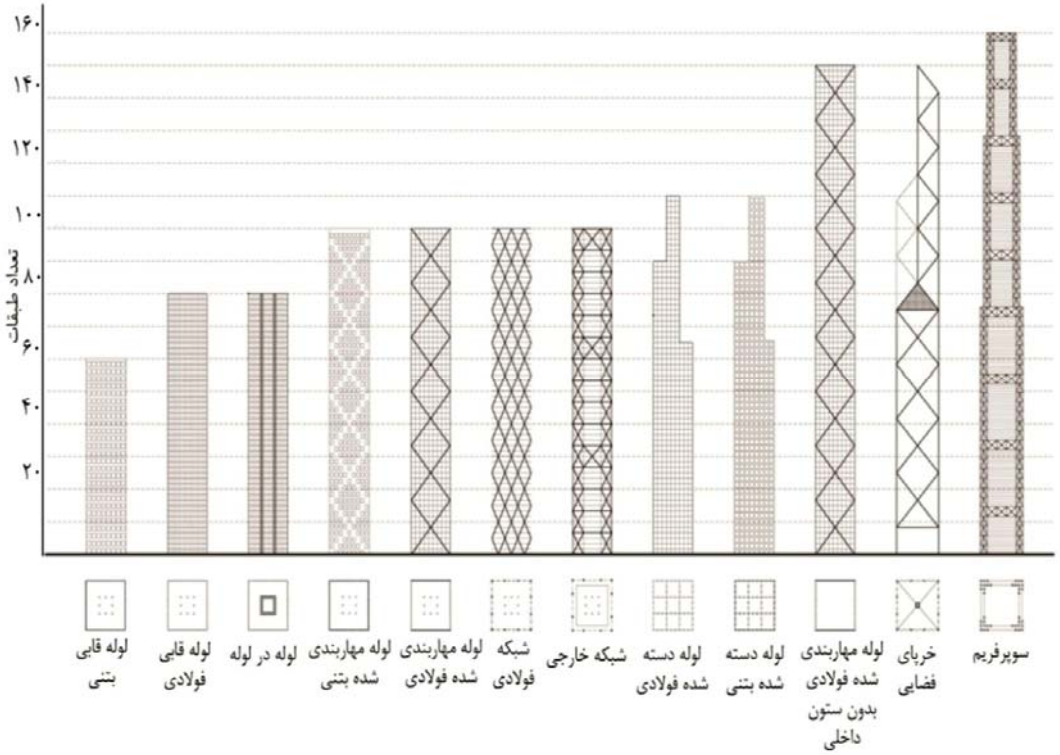
۲. سیستم شبکه قطری

نوع دوم هم از نظر سازه ای و هم از نظر معماری، عملکرد بهتری دارد زیرا با حذف ستون ها از داخل ساختمان، فضای مناسب تری در اختیار معماران قرار خواهد گرفت. در شکل های ۱-۳۰ و ۱-۳۱، نمودار سیستم های سازه ای داخلی و سیستم های سازه ای خارجی به ترتیب نشان داده شده است.

تمامی سیستم های سازه ای داخلی که در شکل ۱-۳۰ آمده است، در فصل دوم به طور جامع تشریح می گردند. سیستم هایی همچون قاب خمشی، دیوار برشی، کمربندهای خرپایی، هسته های مقاوم و ... که در ساختمان های بلند متعددی به کاررفته اند با ذکر مثال، مورد بررسی قرار می گیرند. همچنین در فصل سوم تا فصل ششم این کتاب، انواع سازه های خارجی از جمله سازه های لوله ای و سازه های شبکه ای مورد بحث قرار می گیرند.



شکل ۱-۳۰. انواع سیستم های سازه ای داخلی [۶]



شکل ۱-۳۱. انواع سیستم های سازه ای خارجی [۶]

Semnan University

Lateral Resisting Systems in Tall Buildings

by:
Ali Kheyroddin (Ph.D.)
Professor of Structural Engineering
Semnan University

Sima Aramesh (M. Sc.)

ISBN:978-600-5940-52-7

Semnan University Press
2015