بررسی سیر تکامل آسمان‌خراش‌های بتنی در جهان

حمیدرضا بکتاش
عضو هیات علمی
سعید امیرزاده
دانشجوی کارشناسی معماری؛ موسسه آموزش عالی سوره

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

چکیده
در این مقاله تاریخچه تکامل آسمان‌خراش‌های بتنی و پیشرفت تکنولوژی بتن در سطح وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است. سیر تکامل آسمان‌خراش‌های بتنی از نخستین سازه ساخته شده از بتن مسلح در ساختمان ۱۵ طبقه «اینگالس» [۱] تا ساختمان‌های بلند و مدرنی چون «پتروناس» [۲] و «جین مائو» [۳] در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. همچنین نوآوری‌های تکنولوژی ساختمان از قبیل توسعه فرآیند اختلاط بتن، قالب‌بندی و روش‌های پمپاژ بتن به همراه پیشرفت‌ها در به کارگیری گونه‌های مواد افزودنی در بتن برای افزایش کیفیت آن، که همگی موجب سهولت استفاده از این ماده در روند ساخت و ساز شده است به اختصار آورده شده است.

واژگان کلیدی
ساختمان‌های بلند، بتن مسلح، بتن پرمقاومت، تکنولوژی ساخت

مقدمه

بتن برخلاف دیگر مصالح ساخت به معماران و مهندسان نه تنها امکان به کارگیری انواع فرمها و شکل‌های قطعات تولیدی، بلکه امکان استفاده از این محصولات با خواص متنوع را نیز می‌دهد. هنگامی که معماران و مهندسان در صدد به کارگیری آن بر می‌آیند باید متغیرهای بسیاری از قبیل استحکام، پایایی، خصوصیات گیرایی، محدوده مسلح‌سازی بتن، زیبایی‌شناسی و تکنیک شکل‌پذیری را مد نظر قرار دهند. به همین علت زمینه ساخت ساختمان‌های بلند بتنی به سرعت رو به گسترش است و محدودیت‌های آن دائم در معرض آزمایش و حل مسائل است. پایه‌های تحول سازه‌های مرکب به ساختمان‌های بلند لوله‌ای که اولین بار توسط «فزلورخان»[۴] از Skidmore, Owings & Merrill (SOM) در ۱۹۶۰ تبیین شد مسیر را برای ساخت ساختمان‌های مرکب بسیار بلند نظیر برج‌های دوقلوی پتروناس و جین مائو هموار ساخت.

هنر توزین شن و ماسه و آب برای تولید بتن اولین بار توسط سازندگان مصر و رم باستان به صورت ابتدایی به کار گرفته شد. اما اغلب تحقیقات و پیشرفت‌ها در این رابطه در اواسط تا اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم به وسیله اشخاصی چون مونیر، هنبیک، رانسوم و تالبوت انجام شده است.

با این حال تکنیک استفاده از بتن برای طراحی و ساخت ساختمان‌ها توسط معماران و مهندسانی چون فرانک لوید، رایت پیرلوییجی نروی، رابرت میلارت و اخیراً فزلورخان گسترش یافته است اما قطعاً تاریخ به کارگیری این ماده در ساختمان‌های بلند مربوط به چند دهه اخیر است و هر کدام از این افراد نقشی در رشد استفاده از بتن آن‌گونه که هم‌اینک مرسوم است و در فرم‌های گوناگون به کار گرفته می‌شود داشته‌اند.

۱- تاریخچه استفاده از بتن

ظهور ساختمان‌های بلند زمان نسبتاً اندکی است که به تاریخچه شهرها اضافه شده است اما مسلماً این تکنولوژی قرن نوزدهم بود که پیشرفت آنها را میسر ساخت. فولاد، بتن و مصالح بنایی برای زمان زیادی در فعالیت‌های عمرانی به کار گرفته می‌شدند اما نه در این مورد. مصالح بنایی قدیمی‌ترین آنهاست و بتن آن‌گونه که هم‌اکنون به کار می‌رود جوان‌ترین این سه ماده است. تحقیقات نشان می‌دهد در اجتماعات اولیه همچون فینیقی‌ها و یونانی‌ها در قبرس و جزیره کرت و مردمان مصر و بین‌النهرین، فرم‌های سازه‌ای از ۱۲۰۰ سال قبل از میلاد با بتن آهکی اندود می‌شدند. حتی در زمانی قبل از آن در دوره نوسنگی سازندگان می‌دانستند پختن سنگ آهک موجب ایجاد آهک شکفته می‌شود و با مخلوط کردن آن با ملات به نوعی بتن دست می‌یافتند.

در قرون اولیه ، زمان، پول و توانایی سازندگان عوامل مهمی در انتخاب مصالح در ساخت بناها بوده‌اند و نیاز به مهارت برای دستیابی به فرم‌های خاص به کارگیری غلامان کارگر در ساخت بنا را با چالش روبه‌رو می‌ساخته است. اما این آجر بود که در اغلب موارد ساخت فرم‌های بلندپروازانه و معمارانه را در آن دوره‌ها اقتصادی و به صرفه می‌ساخت. با افول قدرت امپراطوری روم توانایی اجتماعات در به کارگیری مصالح سیمانی در جزئیات ساختمان‌ها کاهش یافت و بدین ترتیب استفاده از بتن برای قرن‌ها به فراموشی سپرده شد تا بار دیگر در قرن نوزدهم بازیابی شد و در ساخت آپارتمان‌ها و کارخانه‌ها به‌کار گرفته شد. بر این مبنا نقطه شروع تاریخ ساخت آسمان‌خراش‌ها را می‌توان در نمایشگاه فیلادلفیا در سال ۱۸۷۶ میلادی جست. در این زمان هیچ ساختمان بلند یا سازه‌ای که به آن شباهت داشته باشد ساخته نشده بود اما ایده‌هایی در این نمایشگاه عرضه شد که خود انگیزه‌ای نیرومند برای گام نهادن در مسیر ساخت ساختمان‌های بتنی بلند مرتبه را باعث شد. سیمان پرتلند در زمانی که شناخته شد در ساخت ملات در آجرکاری‌ها در انگلستان به کار رفت. با این حال به کارگیری آن در دیوارهای ساختمان‌های بزرگ مشکل می‌نمود. نمونه به کارگیری بتن مسلح زمانی که در نمایشگاه فیلادلفیا در بخش امکانات ویژه عرضه شد، برای بازدیدکنندگان بسیار عجیب بود و استفاده از آن در بسیاری زمینه‌ها ناشناخته بود اما با وجود ابهام، سازندگان ماجراجو چشم‌انداز استفاده از آن را بسیار روشن ترسیم کردند که منجر به شروع استفاده از آن در ساخت پل‌ها و نه در ساختمان‌های بلند شد.

پس از این بحث استفاده از بتن مسلح در مجامع علمی مطرح شد که ویلکینسون در انگلیس، هنبیک در فرانسه و تادوس هیات در آمریکا به عنوان پیشگامان این امر بودند. در ۱۸۸۴ میلادی ابتکار رانسوم در ساخت میلگردهای به هم پیچیده از پایه‌های ساخت میلگردهای آجدار و استفاده از آن در زمان حاضر قلمداد می‌شود و در ۱۹۰۴ در اولین بولتن تکنولوژیک با عنوان «آزمایش تیرهای بتن مسلح» که به وسیله رابرت تالبوت از دانشگاه ایلی‌نویز انتشار یافت وی به ذکر نتایج بررسی خود روی بتن در آزمایشگاه‌های عمرانی پرداخت.

همزمان با ادامه پیشرفت‌ها در آزمایش‌های فنی مصالح،

به‌کارگیری فرم‌هایی از سیستم بتن مسلح کارخانه‌ها، واحدهای مسکونی و ساختمان‌های با ارتفاع کم در اروپا و آمریکا پیگیری شد. در ابتدا استفاده از بتن در دیوارهای خارجی و ستون‌ها برای کم کردن دو سیستم رایج چوبی و فولادی به کار رفت. اما این تمام پتانسیل‌های بتن را شامل نمی‌شد. در میان سال‌های ۱۹۰۱ تا ۱۹۰۲، رانسوم سیستمی را اختراع کرد که بر مبنای آن کمربندی خارجی وظیفه نگه‌داشتن دیوار طبقات را به عهده داشت. او همچنین اولین سیستم دیوار پیش ساخته را در این زمان اختراع کرد. دیوارهای پیش ساخته که به منظور سهولت نصب به‌کار گرفته شد کمک ویژه‌ای در برپایی سریع ساختمان‌ها و مقابله با هوای سرد اطراف در زمان ساخت کرد.

این دو اختراع دیوارهای خارجی را از جزئی که بار خود را تحمل می‌کرد به جزئی که بار دیگر اعضای سیستم را نیز تحمل می‌کرد تبدیل کرد. که این امر خود قابی بتنی ایجاد کرد که به‌عنوان روشی برای مقاومت در برابر نیروهای خارجی ساختمان مطرح شد. نوآوری دیگر توسط رابرت میلار انجام شد که به واسطه آن دال‌های کف طبقات به جای تیرهای حمال برای مقاومت در برابر نیروها به کار گرفته می‌شد. این پیشرفت‌ها در کنار توانایی بتن برای مقاومت در برابر آتش، حمل نیروهای بسیار زیاد و دفع صدا آن را به عنوان گزینه مناسبی در ساخت کارخانه‌ها و آپارتمان‌ها در میانه قرن بیستم معرفی کرد. با این حال پدیدآورندگان این روش‌ها برای متقاعد کردن جامعه در استفاده از این ماده همچون فولاد راهی بسیار سخت پیش روی داشتند.

۲- اولین آسمان‌خراش بتنی

تاریخ ساختمان‌های بلند بتنی به قرن بیستم بر می‌گردد. سیستم‌های ابداعی توسط رانسوم از قبیل Square Casting، میلگردهای به هم پیچیده و بتن به‌عنوان قاب و دیوارهای بتنی خارجی اولین بار در ساختمان ۱۵ طبقه‌ای به نام Ingalls Bubding در سین سیناتی ایالت اوهایو آمریکا در ۱۹۰۲ به‌کار گرفته شد. گزارش‌های رسانه‌ها و نظر بسیاری از شرکت‌های حرفه‌ای در زمینه ساخت‌وساز بر این بود که ساختمان در هنگام عمل‌آوری بتن یا در زمان ساخت به وسیله فشار بارهای خود ساختمان ترک برداشته یا فرو خواهد ریخت. یک گزارشگر تمام شب را برای مشاهده و مخابره این خبر در انتظار نشست تا اولین کسی باشد که شاهد پایان ماجرای این ساختمان است. با همگی آنان در اشتباه بودند. زمانی که اولین آتش‌سوزی عظیم شهری ساختمان‌های ساخته شده از فولاد که به مانند روبانی در هم پیچید اتفاق افتاد، بتن اهمیت خود را به عنوان مصالحی با قابلیت مقاومت بسیار بالا در برابر آتش که موجب حفظ کارخانه‌ها و تجهیزات آنها می‌شد به خوبی عیان ساخت.

۳- نوآوری‌ها در تکنولوژی ساختمان

بسیاری از پیشرفت‌ها در زمینه تکنولوژی بتن در نیمه نخست قرن بیستم رخ داد. آغاز توسعه روش‌های قالب‌بندی بتن، تکنیک‌های پمپاژ و روش‌ها و مصالح کمکی در بتن برای کاربری راحت‌تر آنها در ساختمان‌های بلند بتنی در این زمان رخ داده است

۱-۳: قالب‌بندی

یکی از مزیت‌های قابل توجه استفاده از بتن در ساخت ساختمان‌های بلند، قابلیت برنامه‌ریزی برای استفاده از قالب‌ها به صورت مجدد است. به صورت سنتی قالب‌ها از چوب ساخته می‌شدند اما با پیشرفت تکنولوژی، این قالب‌ها با ترکیب چوب، فولاد و آلومینیوم یا فایبرگلاس و پلاستیک ساخته شدند. هر مجموعه قالب ممکن بود به صورت خودنگه‌دار به خارج ساختمان متصل می‌شد یا نیاز به شمع‌بندی در مکان‌های مورد نیاز در داخل ساختمان برای نگه داشتن آنها لازم می‌بود. در ادامه طبقه‌بندی جدیدی شامل فرم‌های قالب‌های پرنده، قالب‌های لغزان و قالب‌های جهشی به تکنیک قالب‌بندی افزوده شد. فرم‌های پرنده [۵] به جای آنکه نیاز به استفاده مجدد از قالب در کارهای مختلف باشد که با مونتاژ قطعاتی چون تشک‌های فایبرگلاس، پرلین‌ها و تخته‌هایی ساخته می‌شوند طول دهانه را می‌پوشانند. بعد از جاگیری بتن در قالب و زمانی که گیرایی بتن به حد لازم رسید قالب‌ها بیرون آورده شده و پس از شستشو توسط جرثقیل برای استفاده مجدد به طبقه بعد منتقل می‌شود.

فرم‌های لغزان [۶] یکی دیگر از گونه‌های قابل جداسازی قالب‌ها هستند. در ساخت این‌گونه‌ها از جک‌های پیچی و جک‌های هیدرولیک استفاده شده که قابلیت ساخت دیوارهای برشی در طبقات بالا را در سراسر دنیا بهبود بخشیده است. جک‌های پیچی در بسیاری از نقاط دنیا به صورت دستی استفاده می‌شوند و استفاده مکانیزه آنها بسیار محدود است. جک‌های هیدرولیک تمام خودکار بوده و به طور مستمر به مکان‌هایی که بتن به آنها پمپاژ می‌شود منتقل می‌شوند. فرم‌های پرشی [۷] گونه دیگری از قالب‌بندی هستند که به دلایل قابلیت استفاده مجدد به‌صرفه و اقتصادی‌تر هستند. این‌گونه همچون قالب‌های لغزان قابلیت جابه‌جایی دارند اما با مکانیزمی متفاوت. این قالب‌ها برای دور زدن در

اطراف سازه همچون باز کردن در طراحی شده‌اند.

۲-۳: سیستم‌های قابل جابه‌جایی [۸]

هرچه تاریخ استفاده از بتن طولانی است استفاده از بتن در ساختمان‌های بلند به دلیل مشکل سیستم انتقال آن به بالا دارای تاریخ کوتاهی است. در ساختمان اینگالس اجزاء بتن به سایت آورده می‌شد و در طبقه اول انبار می‌شد. مخلوط کردن مصالح بتن در میکسرهای درون سایت که در ۱۸۸۰ پیشرفت خود را آغاز کرده بودند انجام می‌شد. در ۱۹۱۳ با توسعه حمل‌ونقل جابه‌جایی بتن به وسیله کامیون‌های رو باز نیز انجام می‌شد. اما این باعث تفکیک اجزای بتن می‌شد که نیاز به اختلاط دوباره داشت تا اینکه از سال ۱۹۲۰ تراک میکسرها به کار گرفته شدند و روند توسعه آنها تا ۱۹۴۷ ادامه یافت.

اما حمل بتن در ارتفاع با وزن زیاد موضوعی بود که ذهن سازندگان ساختمان‌های بلند را به خود مشغول ساخته بود. تکنولوژی تا سال ۱۹۶۰ در این زمینه هیچ تغییری نکرد تا زمانی که پمپ‌های هیدرولیک در این زمان برای اولین بار نصب و به کار گرفته شدند.

این تا جایی ادامه یافت که هم‌اکنون در کارهای کوچک نیز انتقال بتن از این طریق انجام می‌گیرد و در سال‌های اخیر پمپاژ بتن به جایگاه مناسبی دست یافته است و سازندگان ساختمان جین مائو در شانگهای موفق به انتقال بتن پرمقاومت تا ارتفاع ۳۶۶ متر شده‌اند. پمپاژ بتن به علت خاصیت پلاستیک آن محدود است و به سیستم لوله‌کشی پیشرفته برای انتقال به طبقات بسیار بالا نیاز دارد و برای چنین ارتفاع‌هایی سیستم‌های فشار قوی مورد نیاز است. بنابراین خواص بتنی و غلبه بر عکس‌العمل‌های متفاوت آن در برابر فشار در لوله‌ها، پیشرفت و نوآوری را در تکنولوژی بتن طلب می‌کند.

۴- نوآوری در تکنولوژی بتن

علاوه بر توسعه روش‌های حمل‌ونقل بتن به درون سایت، پیشرفت روش‌های قالب‌بندی و انتقال بتن به طبقات بسیار بلند خواص شیمیایی و فیزیکی بتن نیز در قرن بیستم دستخوش تحول‌های مثبت بسیاری شد.

۴-۱-بتن سبک وزن [۹]

این نوع بتن از مصالح گوناگونی چون ماسه و شن، روباره آهن‌گدازی، سنگ آهک، پرلیت، ورمیکولیت و هرکولیت به همراه دانه‌های پلی‌استایرن ساخته می‌شود. استفاده از مصالح بسیار سبک چون پرلیت، دانه‌های پلی‌استایرن و ورمیکولیت به جهت کاهش چگالی و تولید بتنی با وزن ۸۰۰ مطرح شد. تاب فشردگی این مصالح بین ۰/۶۹ تا ۶/۹۰ مگاپاسکال متغیر است و استفاده از آنها به بتن خواص عایق مناسبی را می‌افزاید. این بتن بیشترین توان فشردگی نیرو در میان سه گونه بتن موجود را با توان ۱۷/۲ مگاپاسکال تا ۴۱/۴ مگاپاسکال داراست.

بتن سبک وزن به مثابه مصالح سازه‌ای کاربردهای فراوانی دارد که به عنوان نمونه می‌توان از استفاده آن در قالب‌های ساختمان‌های بلند، پوشش سقف‌ها، صفحات تاخورده، اجزای پیش‌ساخته، لوله‌ها و کشتی‌های اقیانوس‌پیما نام برد، اما استفاده عمده آن در ساختمان‌های بلند با طبقات زیاد است که با تقلیل وزن ساختمان می‌تواند منجر به افزایش مقاومت پی و ستون‌ها با افزایش وزن آنها شود. ساختمان ۵۲ طبقه شل پلازا در ۱۹۷۱ در هیوستون ایالت تگزاس نمونه‌ای از کاربرد این ماده است که از آن به عنوان بلندترین سازه که در تمام جزئیات آن از این بتن استفاده شده یاد می‌شود.

۴-۲- بتن پرمقاومت [۱۰]

این ماده هم‌اینک به‌عنوان بتن میکرو سیلیکا یا بتن فوم سیلیکایی فشرده [۱۱] شناخته می‌شود. فوم سیلیکا ماده‌ای است که در فرآیند تولید سیلیکون و آلیاژهای فروسیلیس در کوره قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. علاوه بر این، این ماده همچنین از سیمان پرتلند، آب، شن شسته، گرانیت یا سنگ آهک، ماسه ریز و مواد پلاستیکی برای بهبود خواص تشکیل شده است که همگی برای رسیدن به بتنی با مقاومت بیش از ۳۴/۵ مگاپاسکال تا ۱۳۸ مگاپاسکال با یکدیگر مخلوط می‌شوند. هنگامی که Csf با آب مخلوط می‌شود فرآیند شیمیایی رخ می‌دهد که خلل و فرج بتن را پر می‌کند.

بدین سبب ماده‌ای با خواص ضدآب و پرمقاومت ایجاد می‌شود. بتن پرمقاومت از بتن معمولی بسیار تردتر است و باید با احتیاط مخلوط و جادهی شود.

استفاده از این بتن بسیار متداول شده است و روش رایج آن با استفاده از تجهیزات جدیدی امکان پمپاژ آن به ارتفاعات بالا بدون تفکیک اجزا را می‌دهد که منجر به حفظ مقاومت آن می‌شود. این نوع بتن در آسمانخراش‌های مالزی و چین و آمریکا به کار رفته است. اگر استفاده از این بتن افزایش یابد باید امیدوار باشیم در آینده ستون‌ها با حجم کمتری ساخته شوند که منجر به افزایش فضای قابل استفاده ساختمان‌ها خواهد شد.

۳-٤-بتن با عملکرد بالا[۱۲]

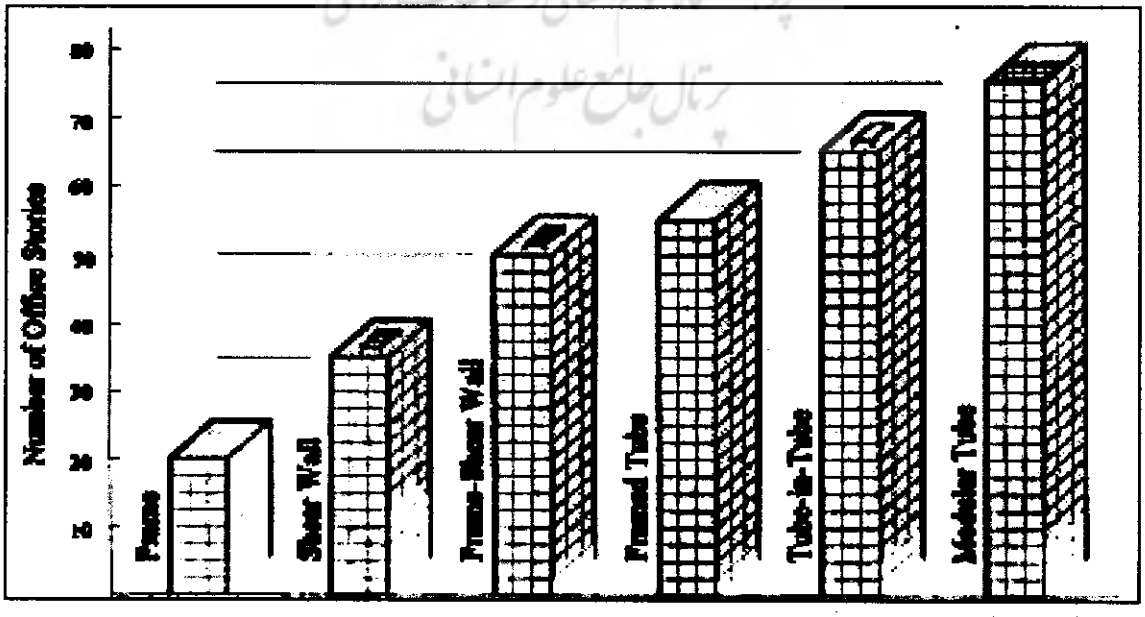
استفاده از این بتن در سال ۱۹۲۷ برای اولین بار در ساخت تونلی در میان کوه‌های راکی در نزدیکی دنور آمریکا به کار گرفته شد. مهندسان می‌خواستند راه سریعی برای مقاومت در برابر بارهای وارد بر تونل بیابند که استفاده از این بتن که هنوز در مرحله تحقیقات بود، پیشنهاد شد و مورد توجه قرار گرفت و تونل با این مصالح ساخته شد. اما چرا سازندگان تا این حد به این مصالح علاقه نشان دادند؟ دلیل عمده آن گیرایی در مدت زمان ۲۴ ساعت بود که بسیار سریع‌تر از زمان مورد نیاز هفت روزه برای گیرایی بتن معمولی بود. بدین جهت این نوع بتن بسیار با دیگر انواع بتن متفاوت است حتی اگر از مواد افزودنی در ساختمان خود بهره برند. این بتن با نسبت آب به سیمان پایین خود مقاومت را از ۲۴/۱ به ۴/۴۱ مگاپاسکال در ۲۴ ساعت می‌رساند که خود موجب کاهش زمان ساخت پروژه و استفاده بهینه از منابع خواهد شد. مقاومت‌های بالاتری از این بتن مورد انتظار است که در آینده محقق خواهد شد.

۶- پیشرفت سیستم‌های سازه

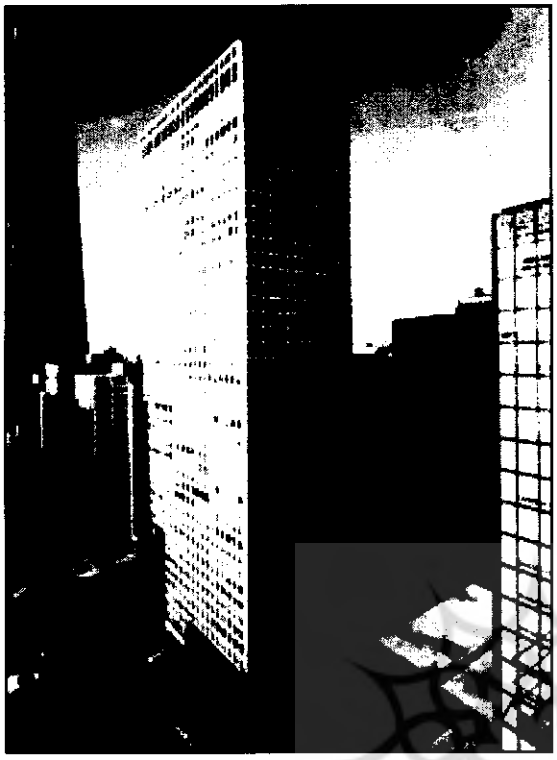
یک سازه باید برای رفع نیروی جاذبه، باد، تجهیزات درون آن و برف و مقاومت در برابر دماهای بالا یا پایین یا لرزه‌ها و نیز محافظت در برابر انفجارها و جذب صداها طراحی شود به علاوه مسائل زیبایی‌شناختی، صرفه اقتصادی، ایمنی و راحتی مدنظر است. بر این اساس برنامه‌ای دقیق برای رسیدن به این امر ضروری است. در تاریخ ساختمان‌های بلند تکنولوژی نقش غیرقابل انکاری در جمع این دو مقوله متناقض داشته است. در اولین سال‌های ظهور آسمانخراش‌ها، مراکز شهری در طبقات میانی جای گرفته و طبقات بالاتر مختص واحدهای مسکونی بوده است. در این‌گونه ساختمان‌ها، به دفاتر اداری با فضای باز زیاد و با فاصله از تجهیزات الکتریکی و مکانیکی احتیاج داشتند، ساکنین خانه‌ها به فضایی صمیمی با دریچه‌های کم‌احتیاج داشته و فضای کف تا کف هر واحد با واحد بالایی به فضایی برای عبور سیستم‌های تهویه و الکتریکی نیاز داشتند.

با نگاه ویژه به سازه درمی‌یابیم دو فاکتور اصلی مقاومت در برابر نیروهای جانبی و نیروی ثقل در طراحی سازه‌های بلند تاثیرگذار هستند و مقاومت در برابر نیروی باد نیز بسیار مهم است. هنگامی که بتن مسلح برای اولین بار به عنوان یک مصالح سازه‌ای معرفی شد محدودیت‌هایی در کاربرد آن دیده می‌شد که به‌تدریج مهندسان با شناخت خواص این ماده درصدد رفع آن برآمدند در این میان فزلورخان، انقلابی در طراحی این ساختمان‌ها چه بتنی و چه فولادی انجام داد. هنگامی که سیستم بهینه خود را برای ساختمان‌های بلند معرفی کرد. سیستم‌های بتنی که برای رنج‌های مختلف ساختمان‌ها از لحاظ تعداد طبقات پیشنهاد شد در نمودار شماره۱ نمایش داده شده است.

دیوارهای برشی برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ به عنوان تیرهای مهارکننده عمودی و برای جلوگیری از بارهای جانبی چون زلزله و باد که از طریق دیافراگم طبقات به ساختمان سرایت می‌کرد به کار گرفته شد. بسیاری از اوقات



نمودار شماره ۱



2 - DeWitt-Chestnut

3 - The Onterie Center

دیوار برشی به عنوان دیوارهای هسته مرکزی امکانات داخلی همچون آسانسورها ، حفره پله، فضای انبار و اتاقک سرایدار را نگه‌داری می‌کند.

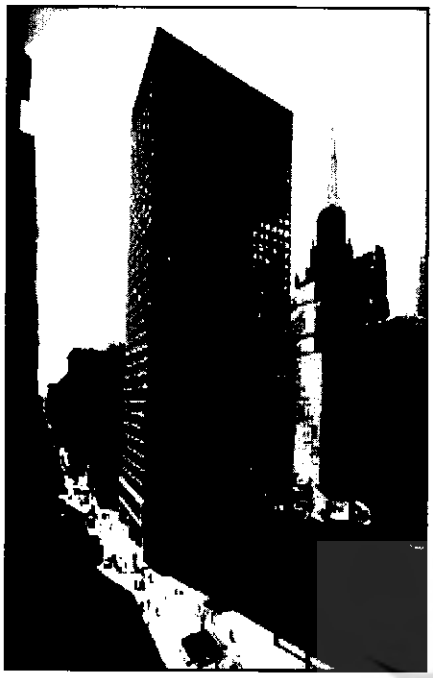
گاهی آنان عملکرد قطری دارند و گاهی این اجزاء به عنوان پارتیشن در سازه نقش مقاومت در بارهای جانبی را ایفا می‌کنند. کیفیت جذب صدا توسط بتن آن را برای استفاده در هتل‌ها و اماکن مسکونی برای کاهش صدای هر واحد به واحد دیگر نیز مناسب می‌کند.

سیستم مرکبی که از آن به عنوان قاب دیوار برشی یاد می‌شود اولین بار توسط فزلورخان شناخته شد و نقطه عطفی در توسعه ساختمان‌های بتنی بلند بود. در این سیستم یک هسته مرکزی و دیوارهای برشی جداگانه به وسیله قاب‌های تیرستون یا دال و ستون در ساختمان تأثیر متقابلی را بر عملکرد یکدیگر می‌گذارند.

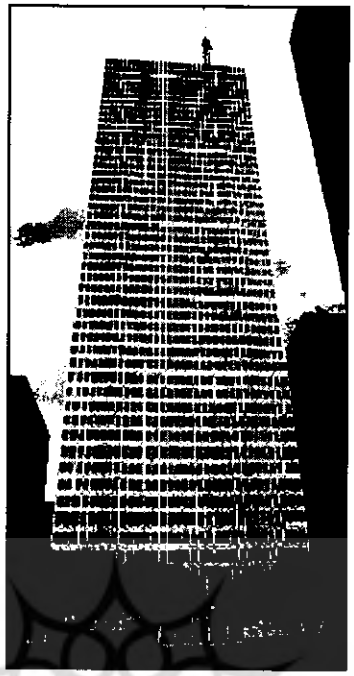
سازه لوله قابی یکی دیگر از سیستم‌های سازه‌ای بود که به وسیله فزلورخان در سال ۱۹۶۰ اختراع شد. وی در معرفی این سازه بیان می‌دارد: سازه با فضای سه بعدی مرکب از سه، چهار یا بیشتر از آن، دیوار برشی که لوله‌ای عمودی را می‌سازند که توانایی مقاومت در برابر بارهای جانبی در هر جهت و رساندن آن به پی همچون عملکرد یک تیره طره‌ای را داراست. سازه لوله‌ای هنگامی که تمام ساختمان در برابر واژگونی مقاومت می‌کند همچون یک اسکلت صلب عمل می‌کند. لوله‌ها می‌توانند دیوارهای برشی تیر و ستون‌ها را احاطه کرده و همگی به صورت کلیت واحد عمل کنند. پنجره‌ها حدوداً ۵۰ درصد از سطح دیوارهای خارجی را در این سیستم اشغال می‌کند. ایده سازه لوله اولین بار از دو جهت سازه و معماری در ساختمان بتنی در ساختمان آپارتمانی ۴۳ طبقه دویت چست نت (عکس ۲) در شیکاگو که در سال ۱۹۶۵ تکمیل شد توسط فزلورخان ساخته شد. گونه‌های مختلفی از سیستم لوله‌ای موجود است: لوله قابی، لوله در لوله، لوله دسته شده.

اما لوله قابی بیشترین نزدیکی را به تعریف بالا دارد. مشخصه بی‌نظیر این سیستم این بود که اعضای آن بدون پیچ‌دار شدن در یک محور قرار می‌گرفتند. ساختمان مرکز اونتاری در شیکاگو (شکل ۳) نمونه‌ای از این سیستم با استفاده از مصالح بتنی است و ساختمان مرکز جان هانکوک مثالی از استفاده از این سیستم با مصالح فولاد است.

لوله با دیوارهای هسته نیز می‌تواند تمام بارهای جانبی را با تاثیر متقابل اجزاء بر هم به وسیله قاب‌ها تحمل کند. ساختمان برانپیک در شیکاگو (شکل ۴) مثالی است از این سیستم. دیوارهای هسته‌ای این ساختمان با قاب‌های خارجی در مقاومت در برابر نیروها نقشی اساسی دارند که



4 - The Brunswick Building in Chicago



5 - One Shell Plaza in Houston

6-One Magnificent Mile Building in Chicago

این در ساختمان به سیستم لوله در لوله معروف است. لوله در لوله سیستمی است با قاب لوله‌ای و دیوارهای برشی هسته در داخل و خارج ساختمانی که تشکیل لوله‌های داخلی و خارجی می‌دهند و به همراه سازه کف که این دو را به هم متصل می‌کند همگی در مقابل نیروهای جانبی به صورت واحد و مشترک عمل می‌کنند. ساختمان شماره ۱ میدان شل پلازا (شکل ۵) نیز چنین سیستمی دارد.

سیستم لوله‌ای دسته شده نیز در ساختمان‌های گوناگونی به کار رفته است و برای کاهش سطح بسیار وسیع طبقات برای مقاومت موثرتر در برابر نیروی باد و نیز ایجاد فضای صمیمی در فضای مسکونی بسیار مناسب است.

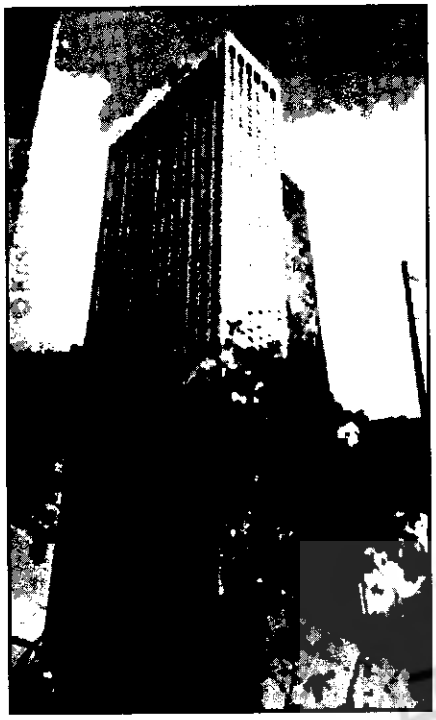
اما برج‌های سیرز معروف‌ترین ساختمانی است که این سیستم در آن به کار رفته و طراحی آن و دیگر ساختمان‌های بلند بتنی توسط فزلورخان بوده است. امروز انتخاب یک سیستم سازه‌ای بسیار پیچیده است. در سالن‌های ساختمان اینگالس یک سیستم تیر و ستون وجود داشت اما فقط قالب‌بندی بتن پیچیده بود. توسعه جهان بتن از سال ۱۹۶۰ همواره در ابداع سیستم‌های جدید همچون لوله‌ها و سیستم‌های مرکب بوده است. چالش مهندسان و معماران امروزه استفاده از تمامی ظرفیت‌های این سیستم‌ها برای خلق محیط‌های قابل سکونت برای مردم است.

۶- گرایش‌ها در ساختمان‌های بلند

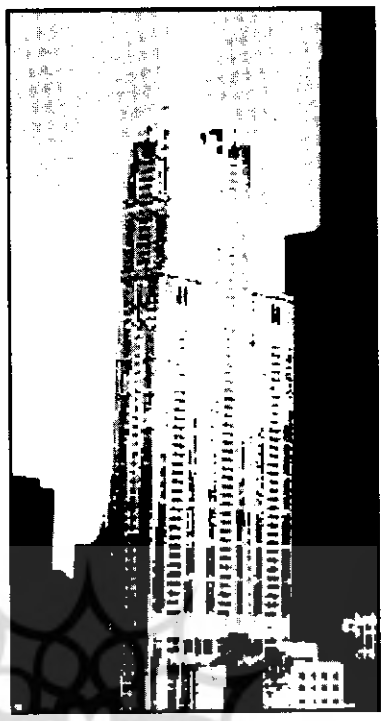
اولین ساختمان بلند بتنی مسلح، ساختمان اینگالس است که پیش‌تر در مورد آن بحث شده است. این ساختمان ۱۵طبقه یک سیستم تیر و ستون داشت و در طراحی آن هر پیشرفتی که در زمینه بتن تا آن زمان انجام شده بود به‌کار گرفته شد. این ساختمان از یک سیستم یکپارچه تیر و ستون بهره جست و در دال طبقات از دو سیستم مسلح استفاده کرده بود. تیرها با استفاده از میلگردهای خرک در نزدیک تکیه‌گاه مسلح بودند و تسمه‌های حلقه‌ای و فنرهای یکپارچه در ستون‌ها برای بتن عمودی آرماتوربندی‌ها به‌کار گرفته شد. ساختمان‌های بسیاری از آن زمان ساخته شده است اما تعداد کمی از آنها را در زیر می‌آوریم.

برج‌های دوقلوی هارینا در سال ۱۹۶۲ ساخته شد. معمار برتراند گولدبرگ می‌دانست در آنجا افرادی هستند که به سرویس‌های ۲۴ ساعته، تجهیزات، پارکینگ و دفاتر نزدیک ساختمان نیاز دارند. مارینا شامل یک سینما، تئاتر، باشگاه بولینگ ، مغازه‌ها، دفاتر اداری، رستوران‌ها، اتاق‌های ملاقات، سالن ژیمنالستیک و پیست اسکیت و پارکینگ برای ماشین‌ها و قایق‌ها و در نهایت آپارتمان‌هایی برای زوج‌های جوان بدون فرزند بود. برج‌ها، اولین سازه چندمنظوره در جنوب شیکاگو بودند و بلندترین ساختمان بتن مسلح در

آن زمان با ۱۷۹ متر بودند. پلان گولدبرک در این ساختمان دایره‌ای بود که در آن زمان بسیار بدیع می‌نمود و براساس بازدهی سیستم‌های تهویه و برای کاهش فضای هسته سازه مناسب بود. نوآوری بعدی احداث پارکینگ ۲۰ طبقه درست زیر ۹۰۰ واحد آپارتمانی بود. او دیوارهای هسته را به صورت دایره‌ای انتخاب کرد برای این که تمام نیروی جانبی را به ستون‌ها منتقل کند. با این اصلاح هسته دایره‌ای ۷۰ درصد از بارهای جانبی را جذب می‌کند. هسته که به صورت یک دیوار برشی بتنی عمل می‌کرد. به دقت با بازشوهای شطرنجی با اندازه کم طراحی شده بود تا صلبیت آن حفظ شود.



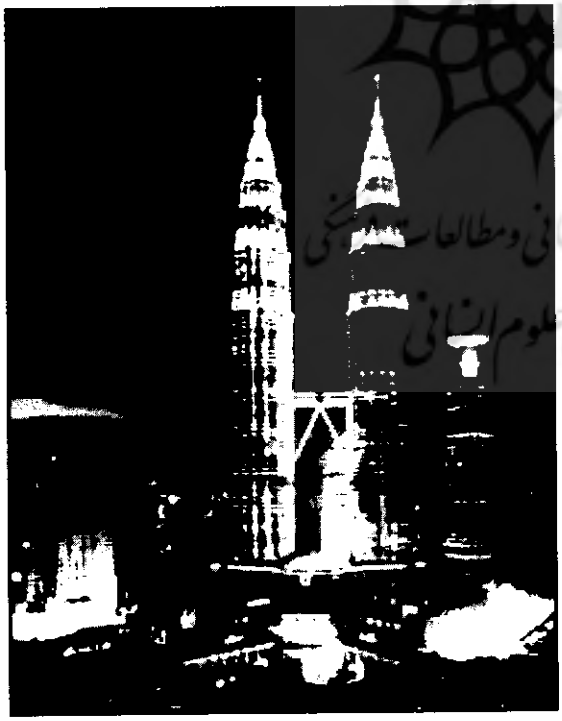
7 - The Water Tower Place



8 - 311 South Wacker Drive

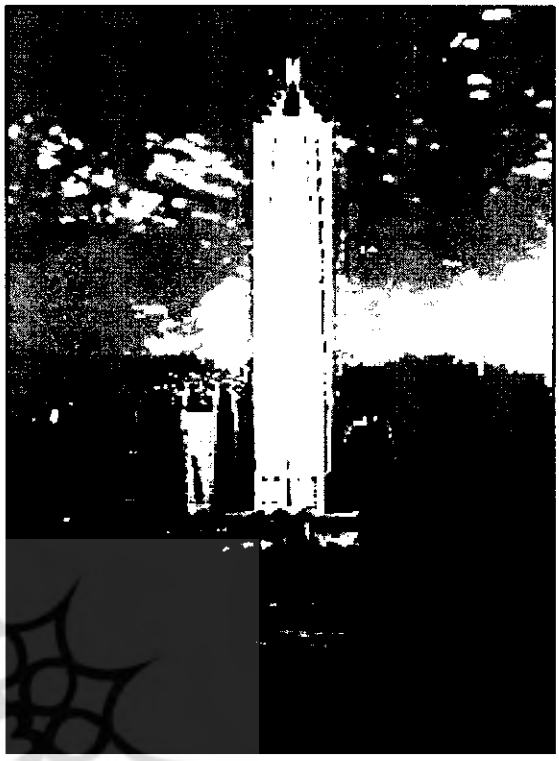
برج واتر (شکل ۷) یک نمونه دیگر از ساختمان بلند در جنوب شیکاگو است که در سال ۱۹۷۵ به وسیله لوبل، اشلوس من دارت و هاکل در ۲۶۲ متر ساخته شد که یک ساختمان چندمنظوره دیگر با تفرجگاهی در داخل، ادارات و آپارتمان‌ها در بالا بود. مقاومت بتن به کار رفته در این ساختمان به ۶۲/۱ مگاپاسکال در ستون‌ها و ۲۰/۷ مگاپاسکال در دال‌ها می‌رسید. این ساختمان با توانایی تکنولوژی بتنی خود می‌توانست با بلندترین ساختمان فولادی که ۱/۵ برابر آن ارتفاع داشت هماوردی کند. سیستم سازه‌ای برج واتر مرکب بود از بتن مسلح، لوله قابی، ستون‌های فولادی داخلی و سیستم دال کامپوزیت.

ساختمان مگنیفیشت در شیکاگو نیز که در سال ۱۹۸۳ به اتمام رسید به وسیله «سام»[۱۳] ساخته شد و یکی از ساختمان‌های بلند طراحی شده توسط فزلورخان بود. این ساختمان ۱۶۴ متری با ایده برج‌های سیرز و به صورت لوله‌های دسته شده اما این بار به صورت بتنی ساخته شده. سام تصمیم گرفت لوله‌های دسته شده را به صورت بتنی مسلح سازد که ساختار آن از سه لوله هشت ضلعی تشکیل شده بود (شکل ۶) لوله‌های بسته شده به ساختمان صلبیت را می‌افزود و همچون برج‌های سیرز این لوله‌ها برای کاهش نیروی ثقل در ارتفاعات مختلفی به اتمام می‌رسید.



9 - Petronas Towers

مرکز اونتاری در سال ۱۹۸۵ در شیکاگو ساختمان دیگری بود که توسط سام ساخته شد و به عنوان آخرین طراحی



10 - The Jin Mao Building

فزلورخان لقب گرفت. سیستم سازه این ساختمان لوله خرپایی بتنی بود. یکبار دیگر سام با موفقیت سازه‌ای را که برای ساختمان هاکلوگ به صورت فلزی ساخته شده بود به بتن مسلح در این ساختمان تبدیل کرد. این سازه لوله بتنی که تیرهای تقویت عرضی قابل رویتی به صورت خرپا در خارج آن رویت می‌شود در شکل (۳) دیده می‌شود.

مهاربندی قطری ساختمان جان هانکوگ اعضاء فلزی قطری‌ای را شامل می‌شد که به آسانی در بتن قابل دستیابی نبودند. به جای آن مهاربندی قطری به وسیله داخل بردن پنجره‌ها در طول موردنظر در نما به‌دست آمده است.

ساختمان واکر درایو که در ۱۹۹۰ ساخته شده یک ساختمان بلندمرتبه بتنی در شیکاگو است (شکل ۸) این ساختمان به ارتفاع ۲۹۵ متر با بتنی به مقاومت ۸۲ مگاپاسکال به عنوان ساختمانی است که در آن از بالاترین مقاومت بتنی بهره گرفته شده است. سیستم سازه‌ای این ساختمان به صورت لوله اصلاح شده با قاب محیطی بتن مسلح، ستون‌های فلزی داخلی و دال کامپوزیت کف است. این سازه به عنوان یک نمونه خوب از برهم‌کنش قاب و دیوار برشی معرفی شده است. این ساختمان به‌گونه‌ای ساخته شده است که صلبیت اجزاء داخلی و خارجی آن به‌طور یکسان حفظ شود. دال پیش تنیده کف، مصرف فولاد را کاهش داد و دو مجموعه از قالب‌های پرنده برای ۵ روز برای ساخت آنها به‌کار رفت.

ساختمان شماره ۱ مرکز پیچ‌تری که در سال ۱۹۹۱ در جورجیای آتلانتا نیز با ۶۴ طبقه ساخته شد ۲۵۷ متر از دیگر ساختمان‌های بتنی است که با سیستم لوله‌های دسته شده با به کارگیری سه مقاومت مختلف بتن در دیوارهای برشی و ستون‌ها (۵۸/۶، ۶۸/۹ و ۸۲/۸ مگاپاسکال) طراحی شد. سازندگان با استفاده از تکنولوژی توسعه‌یافته از سال ۱۹۶۰ در شرکت‌های ارائه خدمات مصالح در شیکاگو این ساختمان را ساختند. نیازهای معماران این بنا ستون‌های آزاد داخلی را طلب می‌کرد و بدین سبب دهنه‌هایی با طول ۱۵/۲ متر با بتن پرمقاومت و پیش‌تنیده ساخته شد.

سیلیکون و گرانیت برای دستیابی به مقاومت لازم در این بتن به کار رفته بود. با توجه به نکات ویژه مدنظر صاحبان این ساختمان هر طبقه ۳۶ اداره اجاره‌ای داشت. این ساختمان به این سبب مورد توجه است که طراحی آن اجازه استفاده چند منظوره کاربران از فضاهای مورد نظر را با توجه به طراحی مناسب سازه و استفاده از بتن پرمقاومت فراهم ساخته بود.

دو ساختمان دیگری که در سال‌های اخیر از بتن به عنوان مصالح پایه در کنار فولاد استفاده کردند، برج‌های پتروناس در مالزی (شکل ۹) و جین مائو در شانگهای چینی هستند. (شکل ۱۰) این دو، مثال‌های مناسبی هستند که نشان می‌دهند بتن چه توانایی شگرفی از زمان آغاز استفاده آن در این‌گونه ساختمان‌ها به‌دست آورده است.

ساختمان ۴۲۱ متری جین مائو ساخته شده در سال ۱۹۹۹ نیز از یک سیستم شامل تیرهای تقویتی فولادی که هسته بتنی ساختمان را به ستون‌های بی‌شمار خارجی ساختمان متصل می‌کند تشکیل شده است.

نتیجه‌گیری

دانش و تحقیقات بتنی در نیمه اول قرن بیستم نمونه بسیاری را برای تکنولوژی امروز به همراه داشته است. این مقاله خلاصه‌ای از سیر توسعه ساختمان‌های بلند بتنی ارائه کرده است. به‌طور خلاصه، اولین استفاده‌کنندگان بتن در ۱۲۰۰ پیش از میلاد جوامعی همچون فینیقی‌ها و مصری‌ها بوده‌اند. در سال‌های بین ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ میلادی کشفیات جدیدی در استفاده از بتن مسلح در ساختمان‌ها انجام شد. آمریکایی‌ها و اروپایی‌ها آن را در ساخت انبارها، کارخانه‌ها و آپارتمان‌ها استفاده می‌کردند. در سال ۱۸۹۸ فرانک هبیک که پدر بتن مسلح خوانده می‌شود اولین استفاده از میل گردهای دایره‌ای با آهن سنگین را معرفی کرد. در سال

۱۸۸۴ رانسوم یک سیستم چهارگوشی از میل‌گردهای فولادی به هم پیچیده شده را برای افزایش مقاومت و چسبندگی بتن اختراع کرد. در سال ۱۹۰۳ النزر اولین آسمان‌خراش بتن مسلح را که از سیستم رانسوم سود می‌جست تکمیل کرد. در فاصله ۵۰ سال اول قرن بیستم تحقیقات و پیشرفت‌ها ادامه یافت. سیستم‌های حمل و نقل جدید، تغییرات در شیوه قالب‌بندی و استفاده از مواد مخلوط شونده جدید به بتن قابلیت و مقاومت بتن را افزایش داد. سیستم‌های سازه‌ای که نسبت به سیستم تیر و ستون به کار رفته در ساختمان اینگالس برتر بودند به وجود آمدند که همگی اینها توانایی به بتن بخشیدند که در نهایت منجر به ساخت پتروناس و جین‌مائو شد. چیزی که در رویای النزر و رانسوم نیز نمی‌گنجید.

کمی بیشتر از یک قرن از اختراع بتن مسلح می‌گذرد. در این زمان کوتاه بتن مسلح از یک مصالح محدود به عنصری تطبیق‌پذیر و همه‌کاره در ساختمان تبدیل شد. اولین ساختمان بتن مسلح بسیار حجیم و سنگین بود. فضاهای با ارزش طبقات با حجم سیستم‌های بتن اشغال می‌شد. امروزه به سبب افزایش دانش و آگاهی‌ها و پیشرفت تکنولوژی، ساختمان‌های بتن مسلح قادر هستند بسیار ظریف و بلند باشند. این تا اندازه‌ای به خاطر استفاده از دیوارهای برشی، سیستم‌های سازه ابداعی و طراحی براساس مقاومت نهایی است که اینک حجم بسیار اندکی از فضا توسط سازه اشغال می‌شود.

به سبب سرعت پیشرفت‌های بتن هم‌اینک استفاده از بتن در ساختمان‌های بلند واقعیت پذیرفته شده‌ای است. قابلیت فرم‌یابی بتن فاکتور اساسی در ایجاد ساختمان‌های با فرم‌های چشم‌نواز و زیباست. فزلورخان زودتر از سال ۱۹۷۲ پیش‌بینی کرد که بتن مصالح ساختمان‌های بلند آینده است. ساختمان ۶۶ طبقه‌ای در برج اداری در شانگهای به صورت تمام بتن ساخته شده است. ساختمانی که برای مقابله توفان طراحی شده است. جوزف کالاکو طراح آزمایشی را رهبری می‌کرد که امکان عملی شدن پیشنهاد فرانک لوید رایت برای ساخت ساختمان یک مایلی را با امکانات سال ۱۹۵۰ بررسی می‌کرد.وی بتن را به علت خاصیت ضد آتش آن و جذب اثرات تغییرات حرارتی، جمع‌شدگی و... اولین مصالح انتخاب کرد. در مقایسه با فولاد، ساختمان‌های بلند بتنی حجم زیادی دارند و سازه بتن سنگین‌تر و در مواجه با واژگونی مقاومت بهتری نشان می‌دهد. کالاکو نشان داد که کدام یک از سیستم‌های مرکب سازه برای آسمان‌خراش‌های تمام بتنی موثرتر است. سیستم‌های سازه‌ای مرکب جدید امکان ساخت سازه‌های بلندتر را در این رابطه در ۴ دهه اخیر فراهم کرده است. اگرچه فولاد همچنان به عنوان مصالح سازه‌ای برای بیشتر ساختمان‌ها کاربرد دارد اما ما انتظار داریم ساختمان‌های بیشتری از بتن و سیستم‌های مرکب از بتن و فولاد در آینده نزدیک ساخته شود.

پی‌نوشت‌ها:

1- Ingalls
2- Petronas
3- Jin Mao
4- Fazlur khan
5- Flying Forms
6- Slip Forms
7- Jump Forms
8- Delivery Systems
9- Lightweight Concrete
10- HSC
11- Csf
12- HPC
13- Som

فهرست منابع :

1. Mir M. Ali, 2001. 'Evolution of Concrete Skyscrapers:From Ingalls to Jin mao' Electronic Journal of structural Engineering, Vol.1, No.1 (2001) pp.2-14

2. Malinwski, R. and Garfinkel, Y., (1991). 'Prehistory of Concrete: Concrete Slabs Uncovered at Neolithic Archaeological Site in Southern Galilee,' Concrete International, March, 1991, pp. 62-68.

Labor market and The motivation of educational progress