مهندسی سازان

اصول مهندسی تولید قطعات پیش ساخته بتنی

تألیف: دکتر فتاح پیرویان و دکتر محمد مهدی پیرویان

راهنمای جامع برای مهندسان عمران، ناظران و پیمانکاران پروژه‌های

اصول مهندسی تولید قطعات پیش ساخته بتنی
راهنمای جامع برای مهندسان عمران، ناظران و پیمانکاران پروژه‌های صنعتی

اصول مهندسی

تولید قطعات پیش ساخته بتنی

نسخه PDF غیر قابل فروش

دکتر فتاح پیرویان

مهندس محمدمهدی پیرویان

عنوان و نام پدیدآور:اصول مهندسی تولید قطعات پیش ساخته بتنی - فتاح پیرویان – مهدی پیرویان
مشخصات نشر: قم: فرهیختگان،۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری: ۱۱۲ص.: مصور، جدول.
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۱۹۹-۲۵-۲
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
موضوع: مهندسی – عمران – قطعات پیش ساخته
شناسه افزوده: پیرویان، فتاح، ۱۳۴۴ -
رده بندی کنگره: ۱۳۹۱ ۴ آ۸ج/Q۱۸۲/۵

ناشر:	انتشارات فرهیختگان
مدیرمسئول:	سیدحسین رضوی خوسفی
عنوان کتاب:	**اصول مهندسی تولید قطعات پیش ساخته بتنی**
مولفان:	**فتاح پیرویان- محمد مهدی پیرویان**
چاپ‌خانه:	زیتون قم
شمارگان:	۳۰۰۰ جلد
نوبت چاپ:	اول
قیمت:	۲۴۵۰۰۰ تومان
دفتر مرکزی:	قم ـ صفاییه ـ مهرآوران ـ بلوار شهیدان انتظاری ـ خیابان ایمان ـ ایمان ۷ کد پستی: ۸۹۱۵۸۹۷۷۵۴
تلفن:	۸۲۸۱۲۷۸ (۰۲۵)
مرکز پخش:	قم ـ کتاب چشمک (۶۲۶۱۷۷۰ - ۰۲۵) بندرعباس: ۰۹۱۷۷۶۸۴۹۶۶
پایگاه اینترنتی:	WWW.TICKPUB.IR

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر برای انتشارات فرهیختگان و شرکت مهندسی ساران محفوظ است. هیچ شخص حقیقی و حقوقی حق چاپ و تکثیر این اثر را به هر شکل و صورت اعم از فتوکپی، چاپ کتاب و ... را ندارد متخلفین به موجب بند ۵ ماده قانون حمایت از ناشرین تحت پیگرد قانی قرار می‌گیرند.

۱- معرفی فناوری ساخت قطعات پیش ساخته

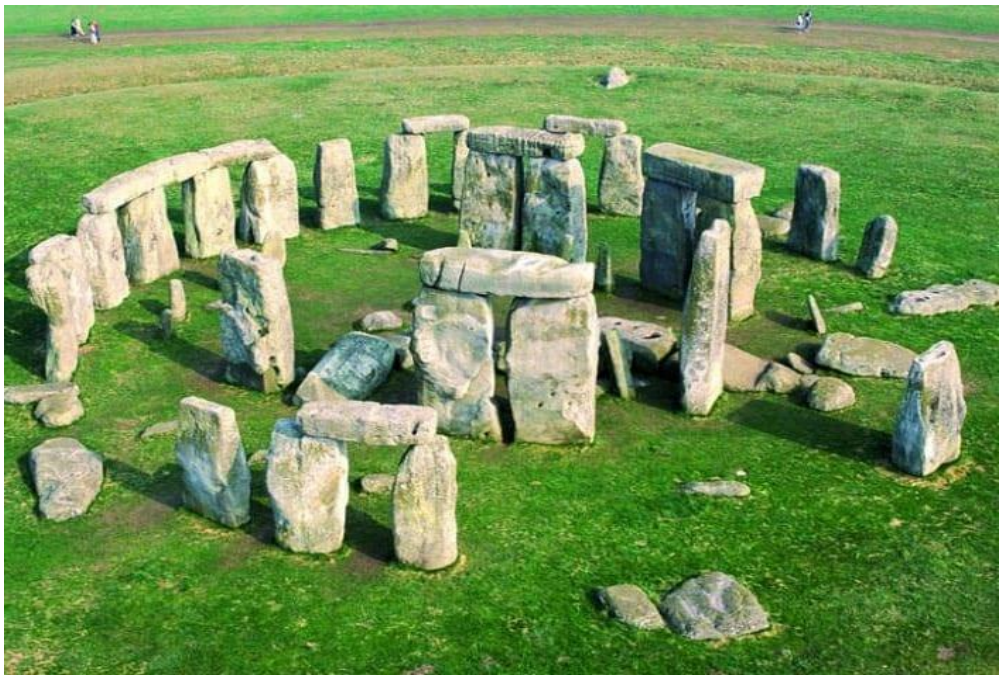
فناوری قطعات پیش‌ساخته بتنی، یکی از نوین‌ترین و درعین‌حال قدیمی‌ترین روش‌های صنعتی‌سازی در جهان ساخت‌وساز است؛ روشی که ریشه‌های آن را می‌توان تا سازه‌های سنگی و بلوکی باستانی همچون معابد یونان، اهرام مصر و حتی تخت‌جمشید جست‌وجو کرد، اما در قالب امروزی خود، از قرن نوزدهم میلادی به‌عنوان پاسخی به نیاز روزافزون بشر برای ساخت سریع، اقتصادی، دقیق و بادوام شکل گرفت.قطعه پیش‌ساخته بتنی در ساده‌ترین تعریف، عنصری سازه‌ای یا غیرسازه‌ای است که بتن آن در محیط کارخانه یا کارگاه صنعتی، تحت شرایط کنترل‌شده و با استفاده از قالب‌های استاندارد و تجهیزات مکانیزه تولید می‌شود و پس از گیرش و عمل‌آوری مناسب، به محل پروژه منتقل و نصب می‌گردد. این قطعه می‌تواند شامل ستون، تیر، دیوار، پله، تیرچه، دال، پانل نما، فونداسیون و حتی ماژول کامل سرویس بهداشتی یا اتاق پیش‌ساخته باشد.در مقابل، قطعه بتنی درجا به سازه‌ای گفته می‌شود که بتن آن مستقیماً در محل اجرا ریخته می‌شود؛ قالب‌گیری، آرماتوربندی و بتن‌ریزی همگی در محل پروژه انجام می‌گیرند و بتن در همان‌جا می‌گیرد و سخت می‌شود. در واقع در روش درجا، کیفیت بتن به شدت وابسته به شرایط محیطی، دمای هوا، مهارت نیروی انسانی و سرعت اجرا است؛ درحالی‌که در سیستم پیش‌ساخته، همه این عوامل تحت کنترل دقیق کارخانه قرار دارند.در فناوری پیش‌ساخته، تولید در محیطی انجام می‌شود که دما، رطوبت، ترکیب مصالح، نسبت آب به سیمان، ارتعاش، زمان عمل‌آوری و حتی کنترل ترک‌های مویی توسط تجهیزات اتوماتیک مدیریت می‌شوند. قالب‌ها معمولاً از جنس فولاد با روکش اپوکسی یا پلی‌اورتان هستند تا سطح نهایی قطعه کاملاً صاف و یکدست باشد. در کارخانه، می‌توان از بخاردهی، سیستم‌های حرارتی، عمل‌آوری با اتوکلاو یا هوای گرم کنترل‌شده برای تسریع گیرش و افزایش مقاومت نهایی استفاده کرد.یکی از مزایای کلیدی این فناوری، تولید انبوه با کیفیت یکنواخت است. در پروژه‌های بزرگ مانند شهرک‌های مسکونی، پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌های چندطبقه، تکرارپذیری قطعات باعث کاهش چشمگیر هزینه و زمان می‌شود. به‌علاوه، سیستم‌های حمل و نصب مانند جرثقیل‌های دروازه‌ای، تاورکرین‌ها و تریلی‌های چندمحوره به گونه‌ای طراحی می‌شوند که حمل قطعات سنگین به‌صورت ایمن و سریع انجام شود.از منظر فنی، تفاوت اصلی دو روش در محل ساخت، کنترل کیفیت، زمان اجرا و دوام نهایی نهفته است. در قطعات درجا، بتن در برابر عوامل محیطی آسیب‌پذیر است، احتمال جمع‌شدگی، ترک خوردن، یا عدم یکنواختی در مقاومت زیاد است. در حالی‌که در پیش‌ساخته، مقاومت فشاری و کششی بتن با آزمایش‌های دوره‌ای (مانند آزمون‌های استوانه‌ای و مکعبی) کنترل می‌شود و آرماتوربندی طبق نقشه‌های

دقیق و با استفاده از فیکسچرهای فلزی ثابت انجام می‌گیرد.از نظر سرعت، یک ساختمان پیش‌ساخته می‌تواند تا ۵ برابر سریع‌تر از سازه درجا به بهره‌برداری برسد .در این روش، کارهای خاک‌برداری و فونداسیون در محل در حال انجام است در حالی‌که قطعات سازه‌ای به‌صورت همزمان در کارخانه در حال تولید می‌باشند. این هم‌پوشانی زمان‌ها باعث می‌شود پروژه در بازه‌ای بسیار کوتاه‌تر تکمیل شود.از نظر اقتصادی، هرچند هزینه اولیه قالب‌ها و تجهیزات بالاتر است، اما به علت کاهش ضایعات، نیروی انسانی کمتر، سرعت نصب بالا و کیفیت ماندگار، هزینه کل چرخه عمر سازه کاهش می‌یابد .در عین حال، قابلیت دمونتاژ و جابه‌جایی قطعات در سیستم‌های مدرن پیش‌ساخته، باعث صرفه‌جویی در بازسازی یا توسعه آینده می‌شود.از دیدگاه زیست‌محیطی، فناوری پیش‌ساخته دوست‌دار محیط‌زیست است، زیرا مصرف سیمان، آب، انرژی و مواد اولیه در محیط کنترل‌شده کمتر و دقیق‌تر است. همچنین آلودگی صوتی، گردوغبار و تردد ماشین‌آلات سنگین در محل پروژه به حداقل می‌رسد.یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته این فناوری، ایمنی بالای کارگاه و دوام سازه است. چون فرآیندهای خطرناک در محل پروژه به حداقل می‌رسد و کیفیت اتصالات به‌صورت صنعتی و تحت نظارت مهندسی انجام می‌شود، احتمال بروز خطای انسانی و آسیب در هنگام بهره‌برداری بسیار پایین است.در حوزه معماری نیز، قطعات پیش‌ساخته محدود به اشکال ساده نیستند؛ فناوری‌های قالب‌سازی مدرن و بتن‌های تزئینی) مانندGFRC ، UHPC، بتن خودتراکم و بتن رنگی (امکان تولید نماها و فرم‌های پیچیده و مدرن را فراهم کرده‌اند.در مجموع، می‌توان گفت پیش‌ساخته‌سازی (Precast Construction) یک گام اساسی در جهت صنعتی‌سازی ساختمان است؛ گامی که همانند تحول در خطوط مونتاژ خودروسازی، ساخت‌وساز را از یک فعالیت سنتی کارگاهی به یک فرآیند مهندسی‌شده، تکرارپذیر و قابل کنترل تبدیل کرده است.

۲-مروری بر تاریخچه ساخت قطعات پیش ساخته :

ریشه‌های پیش‌ساخته‌سازی را باید در نیاز انسان به نظم، تکرار و ساخت سریع سازه‌های بزرگ جست‌وجو کرد. در دوران باستان، بسیاری از تمدن‌ها بدون آن‌که نامی از "پیش‌ساخته" بشنوند، از اصول آن بهره می‌بردند. نخستین نشانه‌ها را می‌توان در سازه‌ی استون‌هنج در جنوب انگلستان یافت؛ بنایی سنگی که حدود سه هزار سال پیش از میلاد ساخته شد. سنگ‌های عظیم موسوم به مگالیت‌ها در معادن دوردست تراشیده، قالب‌گیری و سپس با روش‌های دقیق و از پیش طراحی‌شده در محل کنونی نصب شدند. این انتقال و نصب حساب‌شده، نشان می‌دهد

سازندگان استون‌هنج مفهوم مدولار و قابل مونتاژ بودن قطعات را می‌شناختند؛ هر سنگ به‌عنوان جزئی از یک کل مهندسی‌شده، جای مشخصی داشت. بنای استون‌هنج در جنوب انگلستان، یکی از کهن‌ترین و شگفت‌انگیزترین نمونه‌های ساخت‌وساز ماژولار و پیش‌ساخته در تاریخ بشر است. این مجموعه که قدمت آن به حدود ۳۰۰۰ تا ۲۵۰۰ سال پیش از میلاد می‌رسد، از سنگ‌های عظیمی تشکیل شده که هرکدام در مکان‌های دیگر تراشیده و سپس به‌صورت دقیق در محل فعلی نصب شده‌اند.



شکل ۱- در بنای استون هنج ؛ سنگهای تراش خورده پیش ساخته با طی مسافتی طولانی به محل نصب منتقل شدند

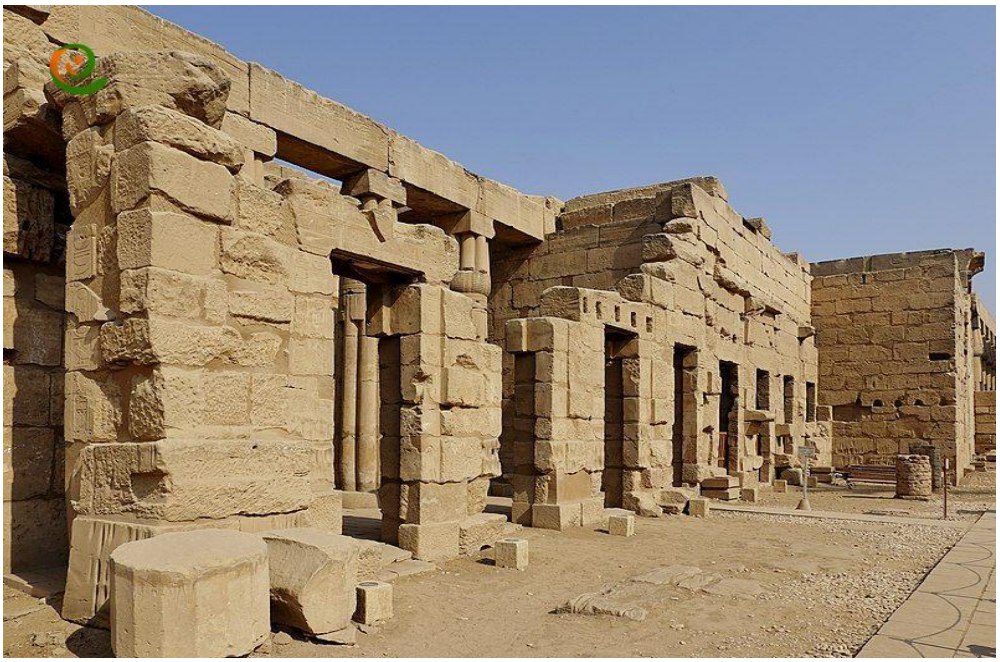
ویژگی‌های مهندسی و ساختاری استون‌هنج نشانه‌هایی روشن از درک اولیه‌ی انسان از پیش‌ساخته‌سازی دارد.سنگ‌های به‌کار رفته در استون‌هنج از دو نوع‌اند: سنگ‌های کوچک‌تر موسوم به «بلواستون» که از معادن ولز و حدود ۲۴۰ کیلومتر دورتر آورده شده‌اند، و سنگ‌های بزرگ‌تر یا «سرسن» که از معادن نزدیک‌تر در مارلبورو استخراج شده‌اند. این جابه‌جایی در آن دوران بدون وسایل ماشینی، مستلزم برنامه‌ریزی، طراحی مسیر، و ایجاد

سازوکارهای دقیق حمل‌ونقل بود. هر سنگ پیش از انتقال، در اندازه و شکل مشخص تراشیده می‌شد تا در ترکیب کلی جای مناسب خود را داشته باشد. این نشان می‌دهد سازندگان دارای نقشه و نظام شماره‌گذاری یا شناسایی اجزا بوده‌اند؛ چیزی که اساس تولید و نصب پیش‌ساخته در معماری مدرن است.در استون‌هنج، سنگ‌های عمودی به‌عنوان ستون و سنگ‌های افقی به‌عنوان تیر افقی عمل می‌کنند. اتصال میان آن‌ها از طریق شیارها و زبانه‌های تراشیده‌شده انجام شده است، یعنی هر قطعه به‌صورت دقیق با قطعه‌ی دیگر چفت می‌شود. این اتصالات مکانیکی، پیشرفته‌ترین جنبه‌ی مهندسی بنا به شمار می‌آید، زیرا بدون استفاده از ملات یا چسب، پایداری سازه را تضمین می‌کند. این همان اصل «مونتاژ خشک» است که در سیستم‌های مدرن پیش‌ساخته نیز کاربرد دارد.چیدمان دایره‌ای و منظم سنگ‌ها، نشان‌دهنده‌ی طراحی هندسی دقیق و هماهنگ است. هر سنگ جای مشخصی دارد و با دیگر اجزا زاویه‌ی مشخصی می‌سازد، به‌گونه‌ای که کل مجموعه با حرکت خورشید در اعتدال بهاری و تابستانی هماهنگ می‌شود. این ویژگی، علاوه بر ارزش نجومی، نشانه‌ای از برنامه‌ریزی ساخت مرحله‌به‌مرحله است، زیرا چیدمان به‌گونه‌ای بوده که ابتدا حلقه‌های داخلی ساخته شده و سپس لایه‌های بیرونی به آن افزوده شده‌اند. این روش همان مفهوم «مونتاژ تدریجی» در معماری صنعتی است.دیگر ویژگی مهم استون‌هنج، استاندارد بودن ابعاد اجزا است. بیشتر بلوک‌ها دارای نسبت‌های ثابت در ارتفاع و عرض هستند، که نشان از قالب فکری واحد در طراحی دارد. این ویژگی نه‌تنها باعث سهولت در نصب شده بلکه جلوه‌ی بصری منظم و قدرتمندی ایجاد کرده است. دقت در جهت‌گیری و زاویه‌ی قرارگیری سنگ‌ها نیز نشان می‌دهد که پیمایش و تراز دقیق در کار وجود داشته؛ مهندسان با ابزارهای ابتدایی، اصول ترازبندی و هم‌محوری را در مقیاس عظیم اجرا کرده‌اند.از نظر فنی، استون‌هنج بیانگر چند نوآوری کلیدی است: نخست، تولید اجزای قابل حمل در محل دیگر که جوهره‌ی پیش‌ساخته‌سازی است؛ دوم، طراحی اتصالات مکانیکی دقیق میان اجزا برای مونتاژ پایدار؛ و سوم، چیدمان مرحله‌ای بر اساس نقشه و کارکرد عملکردی (نجومی و آیینی). همچنین نحوه‌ی انتقال سنگ‌ها از مناطق دوردست با غلتک‌های چوبی و قایق‌های رودخانه‌ای، نخستین نشانه‌های سیستم حمل اجزای بزرگ در تاریخ است.استون‌هنج به‌نوعی نخستین کارخانه‌ی ساختمانی جهان بود که در آن تولید، انتقال، و نصب اجزای ساختمانی به‌صورت سازمان‌یافته انجام شد. هر سنگ، ماژولی از یک ساختار بزرگ‌تر بود و هر ماژول با دقت در

محل مناسب خود جای گرفت. این بنا نه‌تنها از دید مهندسی بلکه از نظر مدیریتی نیز شگفت‌انگیز است؛ زیرا هماهنگی صدها نفر در اجرای مرحله‌ای و طولانی‌مدت پروژه بدون نوشتار رسمی یا ابزار فلزی، بیانگر وجود تفکر سیستماتیک است.در نهایت، استون‌هنج نمادی از نخستین تفکر پیش‌ساخته در تاریخ بشر است؛ بنایی که با ماژول‌های سنگی، اتصالات خشک، تکرار ابعاد، و برنامه‌ریزی دقیق ساخته شد. هرچند کارکرد نهایی آن احتمالاً مذهبی یا نجومی بوده، اما شیوه‌ی ساخت آن نشان می‌دهد انسان از هزاران سال پیش به ضرورت استانداردسازی، پیش‌تولید و نصب نظام‌مند در معماری پی برده است. این میراث کهن، پایه‌ی فلسفه‌ی مهندسی مدرن پیش‌ساخته است و یادآور آن است که صنعت امروز، ریشه در اندیشه و تجربه‌ی انسان‌های باستان دارد.

۳- نگاهی به فناوریهای ساخت قطعات پیش ساخته در مصر باستان

در همان دوران، مصریان باستان در ساخت اهرام و معابد عظیم از بلوک‌های سنگی استاندارد استفاده می‌کردند. کارگاه‌های سنگ‌تراشی در نزدیکی معادن فعال بودند و قطعات به‌صورت دقیق در ابعاد مشابه آماده می‌شدند. سپس با استفاده از ریل‌های چوبی و لغزاننده‌های روغنی یا آبی، این بلوک‌ها به محل احداث منتقل می‌شدند. نظم هندسی و تطابق کامل سنگ‌ها در هرم خوفو گواهی است بر وجود روش‌های دقیق تولید و مونتاژ. هر سنگ نه به‌صورت تصادفی، بلکه بر اساس نقشه‌ای از پیش تعیین‌شده در جای خود قرار می‌گرفت. در حقیقت مصریان باستان نخستین تمدنی بودند که مفهوم واقعی «پیش‌ساخته‌سازی» را در عمل معنا کردند و آن را از سطح تجربه‌های پراکنده به یک نظام مهندسی و سازمان‌یافته رساندند. در نگاه آنان، ساخت‌وساز نه فقط یک عمل فنی بلکه فرآیندی هدفمند و مقدس بود که باید با نظم کیهانی هماهنگ می‌گردید.



شکل ۲_ در مصر باستان بیشتر بناها با انتقال قطعات سنگی برش خورده ساخته شده اند

از همین رو، تمامی مراحل از استخراج سنگ تا نصب نهایی آن در بنا با دقتی ریاضی و مدیریتی دقیق طراحی می‌شد. در ساخت اهرام جیزه، معابد لوکسور و کارناک، و آرامگاه‌های دره پادشاهان، مصریان از قطعاتی استفاده می‌کردند که پیش‌تر در کارگاه‌های تخصصی تراشیده، اندازه‌گیری و علامت‌گذاری می‌شدند. هر سنگ به‌منزله‌ی جزئی از یک سیستم بزرگ بود و جای مشخص خود را داشت. کارگاه‌های سنگ‌تراشی در نزدیکی معادن ناحیه‌های جیزه و آسوان قرار داشتند، جایی که صنعتگران با ابزارهای ابتدایی اما دقیق، سنگ‌های آهکی و گرانیتی را در قالب‌های هم‌اندازه آماده می‌کردند. این بلوک‌ها پس از آماده‌سازی، از مسیرهای شیب‌دار و با استفاده از ارابه‌های چوبی و سطح‌های لغزان آغشته به آب، به پای کارگاه ساختمانی منتقل می‌شدند. در واقع، مصریان نخستین کسانی بودند که زنجیره‌ی کامل تولید، حمل و نصب اجزای سازه را طراحی کردند؛ چیزی که امروز آن را «فرایند صنعتی ساخت» می‌نامیم.نکته‌ی مهم در روش مصریان، استانداردسازی مصالح بود. آنان به‌خوبی درک کرده بودند که تکرار دقیق ابعاد و شکل‌ها، سرعت و دقت ساخت را افزایش می‌دهد. در هرم خوفو بیش از دو میلیون و سیصد هزار بلوک سنگی با دقتی حیرت‌انگیز در کنار هم قرار گرفته‌اند؛ فاصله‌ی بین برخی

سنگ‌ها کمتر از چند میلی‌متر است، امری که بدون تولید منظم و کنترل کیفیت ممکن نبود. هر بلوک پس از آماده‌سازی علامت‌گذاری می‌شد تا در هنگام چیدمان، موقعیت دقیق آن مشخص باشد. در برخی کتیبه‌ها، حتی دستوراتی برای ترتیب نصب، جهت سنگ و محل قرارگیری دیده شده است که نشان از وجود نوعی مدیریت پروژه‌ی اولیه دارد.از سوی دیگر، مصریان درک بالایی از ماژولار بودن اجزا داشتند. معابد آنان همچون معبد کارناک از ستون‌ها و دیوارهای مشابه تشکیل شده که هرکدام قابل تولید جداگانه و نصب سریع در محل بودند. ستون‌ها در چند بخش ساخته می‌شدند؛ پایه، بدنه و سرستون، که هرکدام در کارگاه آماده و سپس در محل با دقت روی‌هم سوار می‌شدند. این روش باعث می‌شد بتوان بخش‌های مختلف معبد را هم‌زمان ساخت و بعد در مدت کوتاهی آن‌ها را به هم متصل کرد. چنین نگرشی به‌نوعی نخستین نمونه‌ی تولید موازی در تاریخ مهندسی است.در کنار آن، مصریان از فناوری‌های پیشرفته برای انتقال و نصب استفاده می‌کردند. سیستم‌های شیب‌دار، اهرم‌ها، غلتک‌ها و طناب‌های گیاهی مقاوم، همه برای جابه‌جایی اجزای سنگین طراحی شده بودند. آنان حتی مسیرهای اختصاصی حمل‌ونقل سنگ را مهندسی کرده بودند که از ساحل رود نیل تا پای کوه ادامه داشت. در این مسیرها، گروه‌های متعدد کارگران با نظمی نظامی کار می‌کردند؛ هر گروه وظیفه‌ی خاصی داشت، از تراش‌کاری تا حمل و نصب. این تقسیم کار دقیق، مصریان را قادر ساخت تا در مدت چند دهه، سازه‌هایی بسازند که هنوز پس از پنج هزار سال پابرجاست.اما نگاه مصریان به پیش‌ساخته‌سازی فقط جنبه فنی نداشت. آنان آن را بخشی از فلسفه نظم و جاودانگی می‌دانستند. در باور دینی‌شان، نظم هندسی بازتاب نظم آسمانی بود و ساخت بنا با قطعات منظم، نمادی از هماهنگی با جهان خدایان به شمار می‌رفت. بنابراین دقت در چیدمان، تقارن و تکرار در مصالح، نه تنها از جهت مهندسی بلکه از دیدگاه معنوی نیز اهمیت داشت. هر سنگ در جای خود نشان‌دهنده‌ی توازن میان زمین و آسمان بود.میراث مهندسی مصریان، بعدها الهام‌بخش تمدن‌های بزرگ دیگر شد. یونانیان در ساخت پارتنون، از همان اصول تقسیم اجزا و مونتاژ استفاده کردند؛ رومیان با بتن‌های قالبی خود، ایده‌ی تولید خارج از سایت را گسترش دادند؛ و حتی در ایران باستان، مهندسان هخامنشی در تخت‌جمشید از همان منطق استفاده کردند که هر بخش در کارگاه آماده و در محل نصب شود. بدین ترتیب، می‌توان گفت مصریان باستان بنیان‌گذاران حقیقی صنعت پیش‌ساخته در جهان بودند؛ مردمانی که هزاران سال پیش، با

ابزارهای ابتدایی ولی اندیشه‌ای صنعتی، راهی را گشودند که امروز در قالب کارخانه‌های مدرن و سازه‌های ماژولار ادامه یافته است.

۴-تمدن بین النهرین و فناوری ساخت قطعات پیش ساخته

در تمدن بین‌النهرین، سومریان و آشوریان از آجرهای سفالی هم‌اندازه استفاده می‌کردند. این آجرها که در قالب‌های استاندارد تولید می‌شدند، اساس ساخت زیگورات‌ها و شهرهای چندطبقه‌ی آنان را تشکیل می‌دادند. نظم و یکدستی مصالح در این سازه‌ها، نشانگر نخستین گام‌های استانداردسازی صنعتی در تاریخ است . تمدن بین‌النهرین که در سرزمین‌های میان دجله و فرات شکل گرفت، از نخستین تمدن‌های بشری بود که اصول ساخت‌وساز سازمان‌یافته و مبتنی بر تکرار، نظم و تولید اجزای مشابه را به‌کار گرفت. در این تمدن که شامل شهرهای باستانی سومر، اکد، بابل و آشور بود، ایده‌ی ساخت قطعات از پیش آماده و استفاده‌ی دوباره از آن‌ها در بناهای مختلف، نوعی درک ابتدایی از مفهوم پیش‌ساخته را به نمایش می‌گذارد.در میان آثار برجای‌مانده از این دوران، زیگورات اور در شهر سومر یکی از شاخص‌ترین نمونه‌هاست. این بنای عظیم پلکانی که حدود دو هزار سال پیش از میلاد ساخته شد، از هزاران آجر پخته و خام تشکیل شده بود که در قالب‌های استاندارد و یکسان تولید می‌شدند. هر ردیف از بنا با ترکیب آجرهای مشابه و چیدمانی منظم شکل می‌گرفت. این آجرها در کارگاه‌های مجزا در اطراف شهر تولید، خشک و سپس به محل ساخت منتقل می‌شدند. اندازه‌ی ثابت، نظم چیدمان و قابلیت تولید انبوه آجرها موجب شد ساخت چنین سازه‌ی عظیمی ممکن شود. در واقع، مصریان با سنگ‌های استاندارد و سومریان با آجرهای قالبی، دو مسیر متفاوت از یک اندیشه مشترک را دنبال کردند.

در شهرهای دیگر چون اور، بابل و نیپور نیز سیستم مشابهی مشاهده می‌شود. خانه‌های مسکونی، معابد و دیوارهای شهر با آجرهایی ساخته می‌شدند که دارای ابعاد ثابت و علائم مخصوص بودند. برخی از این آجرها مهر یا نقش برجسته‌ی سلطنتی داشتند که نشان‌دهنده‌ی محل تولید، کارگاه سازنده و هدف مصرف آن‌ها بود؛ این خود نوعی «کدگذاری صنعتی» محسوب می‌شود که بعدها در صنایع مدرن دوباره ظهور یافت.

شکل ۳- در بناهای باستانی سومر، اکد، بابل و آشور ایده‌ی ساخت قطعات از پیش آماده و استفاده‌ی دوباره از آن‌ها در کالبد معماری به عنوان بخش کلیدی عمرانی به شمار میروند.

در شهر بابل، به‌ویژه در دروازه معروف «ایشتر»، استفاده از آجرهای لعاب‌دار پیش‌ساخته جلوه‌ای باشکوه از هنر و فناوری مهندسی را به نمایش می‌گذارد. این آجرها با لعاب‌های رنگی در کارگاه‌های جداگانه پخته می‌شدند و نقش‌های برجسته‌ی حیوانات مقدس مانند شیر، اژدها و گاو نر روی آن‌ها از پیش طراحی می‌گردید. سپس هر آجر بر اساس نقشه‌ی کلی در محل مناسب خود نصب می‌شد تا تصویر نهایی شکل بگیرد. این روش در واقع همان اصولی است که امروز در ساخت پانل‌های پیش‌ساخته نما به‌کار می‌رود.نوآوری دیگر معماران بین‌النهرین، استفاده از ترکیب مصالح در ساخت مدولار بود. آنان آجر خام (گلی) را با آجر پخته ترکیب می‌کردند تا استحکام و عایق‌بندی بیشتری به دست آورند. همچنین از قیر طبیعی و نی‌های خشک برای آب‌بندی و اتصال لایه‌ها استفاده می‌کردند. این فناوری در معابد، دیوارهای شهر و حتی سازه‌های آبی به‌کار گرفته می‌شد. در سیستم‌های آبیاری و کانال‌سازی، دیواره‌های کانال‌ها از بلوک‌های قالبی گلی ساخته می‌شدند که در محل‌های دیگر تولید و سپس به‌صورت ماژولار نصب می‌شدند؛ به این ترتیب، نگهداری و تعمیر این سازه‌ها نیز آسان‌تر بود.در بخش شمالی بین‌النهرین، در شهر نمرود و نینوا، که در دوران آشوریان شکوفا شدند، روش‌های پیشرفته‌تری در ساخت دیده می‌شود. در این شهرها، ستون‌ها و قطعات سنگی تزئینی به‌صورت جداگانه تراشیده می‌شدند تا در بناهای سلطنتی مورد استفاده قرار گیرند. دیوارهای کاخ آشوربانی‌پال از صفحات سنگی بزرگ تشکیل شده که با نقش‌های برجسته‌ی مشابه ساخته و

سپس در محل نصب شده‌اند؛ هر صفحه بخشی از یک روایت تصویری بزرگ‌تر بوده است. این صفحه‌ها را می‌توان به‌نوعی نخستین نمونه از «پانل‌های تزئینی پیش‌ساخته» دانست.نظام شهرسازی بین‌النهرین نیز نشانگر درک عمیق از استانداردسازی است. خیابان‌ها و خانه‌ها طبق الگوهای تکرارشونده طراحی می‌شدند و این خود امکان ساخت هم‌زمان چند واحد مشابه را فراهم می‌کرد. در برخی شهرها مانند اوروک، خانه‌های مسکونی دارای نقشه‌ای واحد و مصالح یکسان بودند، و این شباهت در مقیاس بالا یادآور سیستم‌های تولید انبوه امروزی است.از دیدگاه مهندسی، نوآوری بزرگ بین‌النهرینی‌ها در یکپارچه‌سازی طراحی، تولید و ساخت بود. آنان نخستین کسانی بودند که متوجه شدند می‌توان با قالب‌های تکرارپذیر و مصالح یکسان، سازه‌هایی بزرگ، زیبا و ماندگار بنا کرد. تولید آجر در کارگاه‌های متعدد ولی با اندازه‌های دقیق، نوعی هماهنگی صنعتی ایجاد می‌کرد که قرن‌ها بعد در اروپا با انقلاب صنعتی دوباره ظهور یافت.از سوی دیگر، در جنبه‌ی زیبایی‌شناسی، استفاده از لعاب و رنگ بر روی آجرهای پیش‌ساخته، تلفیقی از هنر و صنعت بود. دروازه ایشتر با بیش از پانزده متر ارتفاع و هزاران آجر لعاب‌دار، نمونه‌ای بی‌نظیر از ترکیب هنر و فناوری پیش‌ساخته است. هر قطعه‌ی لعاب‌دار در محل خود نصب شده تا تصویر حیوانات و نمادهای اسطوره‌ای به شکلی بی‌نقص نمایان شود.در مجموع، می‌توان گفت تمدن بین‌النهرین با استانداردسازی ابعاد آجر، ایجاد کارگاه‌های تولید انبوه مصالح، استفاده از نشانه‌گذاری برای نصب، و تلفیق هنر در صنعت ساخت، نخستین نظام ساختمانی پیش‌ساخته جهان را پدید آورد .آنان نشان دادند که می‌توان اجزای مشابه را در مکان‌های مختلف تولید و در یک ساختار هماهنگ به‌کار برد. این روش، پایه‌گذار اندیشه‌ای شد که بعدها در ایران، مصر، یونان و روم به شکل‌های متفاوت ادامه یافت و تا امروز الهام‌بخش صنعت پیش‌ساخته مدرن باقی مانده است.

۵-تاریخچه ساخت قطعات پیش ساخته در ایران

ایرانیان باستان نیز درک عمیقی از مفهوم پیش‌ساخته داشتند. در ساخت پرسپولیس (تخت جمشید)، که در سده پنجم پیش از میلاد به دستور داریوش بزرگ آغاز شد، تمامی اجزای اصلی از قبیل ستون‌ها، سرستون‌ها، پله‌ها و درگاه‌ها در کارگاه‌هایی مجزا تراشیده و شماره‌گذاری می‌شدند. شواهد باستان‌شناسی نشان می‌دهد هر قطعه پس از آماده‌سازی به محل اصلی حمل و در جای مشخص خود نصب می‌گردید. ستون‌های عظیم تالار آپادانا از چند بخش مجزا ساخته شده بودند: پایه، بدنه و سرستون، که هرکدام جداگانه آماده و سپس در محل مونتاژ

می‌شدند. این روش، امکان ساخت هم‌زمان اجزا در کارگاه‌های مختلف را فراهم می‌کرد و سرعت اجرای پروژه را افزایش می‌داد. در واقع، پرسپولیس نمونه‌ای درخشان از مدیریت صنعتی و نظام تولید انبوه در دوران باستان است . در ایران باستان، مفهوم ساخت‌وساز پیش‌ساخته در سطحی کاملاً پیشرفته و نظام‌مند به کار گرفته شد و جلوه‌ای چشمگیر در بناهای شاخصی چون تخت‌جمشید، پاسارگاد، بیستون، شوش و سازه‌های آبی شوشتر یافت. مهندسان ایرانی نه‌تنها به تولید اجزای هم‌اندازه و قابل حمل دست زدند، بلکه نوعی هماهنگی میان کارگاه، نقشه‌برداری، حمل‌ونقل و نصب در محل را بنیان نهادند که بسیار شبیه به زنجیره‌ی تولید صنعتی امروزی است.

در تخت‌جمشید، که اوج شکوه مهندسی و معماری هخامنشی به‌شمار می‌رود، بیشتر اجزای سازه پیش از نصب در کارگاه‌های سنگ‌تراشی اطراف سایت ساخته می‌شد. ستون‌ها، سرستون‌ها، پله‌ها، درگاه‌ها و سنگ‌فرش‌ها هرکدام در قالب‌های مشابه و بر اساس ابعاد دقیق تراش داده می‌شدند. این قطعات پس از آماده‌سازی با سیستم شماره‌گذاری و علامت‌گذاری ویژه مشخص می‌شدند تا در مرحله‌ی نصب دقیقاً در محل خود قرار گیرند. هر ستون عظیم تالار آپادانا از سه بخش اصلی تشکیل شده بود: پایه، بدنه و سرستون که جداگانه ساخته و در محل مونتاژ می‌شدند. دقت در تراش سطح‌ها به‌گونه‌ای بود که اتصال قطعات بدون ملات و با فشردگی کامل انجام می‌گرفت. این روش نمونه‌ای بارز از پیش‌ساخته‌سازی سنگی است که امروزه در نماهای ماژولار سنگی به‌کار می‌رود.در پاسارگاد، نخستین پایتخت هخامنشی، آرامگاه کوروش نمونه‌ای دیگر از ساخت مدولار است. پله‌های شش‌گانه‌ی زیرین و اتاق سنگی فوقانی از بلوک‌های سنگی هم‌اندازه ساخته شده‌اند که در کارگاه‌های بیرونی تراشیده و سپس به محل نصب حمل شده‌اند. اتصال دقیق سنگ‌ها بدون ملات و استفاده از گیره‌های فلزی دم‌چلچله‌ای از نوآوری‌های بزرگ ایرانیان بود. این گیره‌ها قطعات را به‌گونه‌ای در کنار هم نگاه می‌داشتند که نیروهای فشاری و کششی در کل سازه توزیع یکنواخت داشته باشد؛ روشی که بعدها در معماری یونان و روم نیز الگوبرداری شد.در شوش، پایتخت زمستانی هخامنشیان، استفاده از آجرهای لعاب‌دار پیش‌ساخته با نقوش رنگی به اوج خود رسید. دیوارهای کاخ داریوش با هزاران آجر لعاب‌دار ساخته شده بود که هر کدام در کارگاه‌های مستقل قالب‌گیری، پخته و لعاب‌زده می‌شدند. نقش‌های شیر بالدار، سربازان جاویدان و گل‌های نیلوفر آبی بر روی

هر آجر از پیش طراحی شده بود تا هنگام نصب، تصویر کلی شکل بگیرد. این شیوه همان اصول پیش‌ساخته‌ی تزئینی امروزی است که در نمای سرامیکی مدرن نیز دیده می‌شود. نوآوری شگفت‌انگیز دیگر در این پروژه، تنظیم رنگ لعاب‌ها برای ایجاد هارمونی تصویری در فاصله‌ی دور بود که نشان‌دهنده‌ی شناخت پیشرفته از طراحی بصری و هماهنگی جزئیات است.در سازه‌های آبی شوشتر که به دوره‌ی ساسانیان بازمی‌گردد، ایده‌ی پیش‌ساخته در حوزه‌ی مهندسی آب به‌کار رفت. در این مجموعه، بندها، آسیاب‌ها و کانال‌های سنگی با قطعات تراش‌خورده‌ی قابل مونتاژ ساخته شدند تا در برابر جریان شدید آب مقاومت کنند. هر سنگ یا قطعه‌ی دیوار در قالبی مشخص آماده می‌شد و سپس با بست‌های فلزی و دوغاب مخصوص در محل نصب می‌گردید. تکرار و نظم در ابعاد و زاویه‌ها موجب شد این سیستم بیش از هزار سال دوام آورد و تا قرون میانه نیز مورد استفاده باشد.در دوران ساسانی، ساخت ایوان مدائن نیز از الگوی مشابهی بهره برد. آجرهای عظیم به ابعاد یکسان در کارگاه‌ها قالب‌گیری و سپس در قوس بلند بنا چیده شدند. چیدمان مدولار آجرها باعث شد نیروی فشاری به صورت یکنواخت در قوس توزیع شود. این ساختار بزرگ‌ترین طاق خشتی جهان است و هنوز پس از پانزده قرن پابرجاست.نوآوری‌های ایرانیان در پیش‌ساخته‌سازی فقط محدود به مصالح نبود؛ آن‌ها نظام مدیریتی دقیقی نیز برای کنترل کیفیت و زمان ساخت به‌کار می‌بردند. در تخت‌جمشید، مدارکی به‌جا مانده که نشان می‌دهد کارگاه‌های مختلف با سرپرستان و نقشه‌کشان مستقل فعالیت می‌کردند اما طبق استاندارد مشترک. این نظام تقسیم کار، نخستین گام به سوی مدیریت صنعتی پروژه بود.از دیدگاه فنی، ایرانیان در اتصال قطعات نیز پیشرو بودند. استفاده از گیره‌های فلزی، بست‌های سربی، شیارهای دقیق و فاق و زبانه، همگی راهکارهایی بودند برای اطمینان از پایداری و دوام سازه بدون نیاز به ملات حجیم. در برخی بناها همچون پل‌های ساسانی، قطعات طاق به‌صورت تکرارشونده و قابل تعویض طراحی شده بودند تا در صورت آسیب، بتوان قطعه‌ی مشابه را جایگزین کرد؛ مفهومی که امروز در تعمیرات صنعتی و نگهداری پیشگیرانه نیز وجود دارد.

شکل ۴- در تخت‌جمشید بیشتر اجزای سازه پیش از نصب در کارگاه‌های سنگ‌تراشی اطراف ساخته شده و با مهارت تمام به این منطقه منتقل میگردیدند

از منظر زیبایی‌شناسی نیز، ایرانیان پیوندی میان نظم هندسی و معنا برقرار کردند. تکرار دقیق نقش‌ها و تناسبات در کاخ‌ها، بازتاب اندیشه‌ی نظم الهی و سلطه‌ی خرد در جهان بود. هر قطعه، بخشی از کل بود و هماهنگی آن با دیگر اجزا نشان از تسلط معمار بر مفهوم ترکیب‌پذیری داشت.در جمع‌بندی می‌توان گفت ایران باستان یکی از پیشرفته‌ترین مراکز پیش‌ساخته‌سازی در جهان کهن بود. از بلوک‌های سنگی تخت‌جمشید و پله‌های آرامگاه کوروش تا آجرهای لعاب‌دار شوش و سازه‌های آبی شوشتر، همگی نشان می‌دهند که معماران ایرانی هزاران سال پیش اصول استانداردسازی، تولید خارج از سایت، کنترل کیفیت، اتصالات دقیق و نصب ماژولار را به‌کار می‌بردند. آن‌ها با تلفیق هنر، دانش مهندسی و نظم فلسفی، مفهوم پیش‌ساخته را نه‌تنها در معماری بلکه در فرهنگ فکری خویش نهادینه کردند و میراثی پدید آوردند که پایه‌ی بسیاری از فناوری‌های ساخت مدرن به‌شمار می‌آید.

۶-تمدن چین باستان و فناوری ساخت قطعات پیش ساخته

در شرق آسیا، چینیان باستان نیز مفهوم قطعات قابل تکرار و ترکیب‌پذیر را به‌خوبی می‌دانستند. در ساخت دیوار بزرگ چین، بخش‌هایی از خاک فشرده، آجر و سنگ به‌صورت ماژولار تولید و

در امتداد هزاران کیلومتر در کنار هم قرار گرفت. هر قسمت از دیوار با قطعاتی ساخته می‌شد که قابلیت چفت شدن و ادامه در بخش بعدی را داشت، به‌طوری که اتصال میان قطعات، استحکام کلی سازه را افزایش می‌داد . در دوران سلسله‌های «چین» و «هان»، ساخت دیوار بزرگ نه‌تنها یک پروژه دفاعی، بلکه بزرگ‌ترین تجربه‌ی مهندسی صنعتی باستان بود. این سازه که بیش از بیست‌هزار کیلومتر طول دارد، از میلیون‌ها بلوک خاک فشرده، آجر و سنگ تشکیل شده است. در مناطقی که سنگ در دسترس نبود، مهندسان چینی با استفاده از قالب‌های چوبی، خاک و کاه را به‌صورت لایه‌لایه فشرده می‌کردند تا بلوک‌هایی هم‌اندازه و مقاوم به‌دست آورند. این بلوک‌ها پس از خشک شدن از قالب خارج می‌شدند و همانند مصالح پیش‌ساخته‌ی امروزی، به محل نصب منتقل می‌شدند. در مناطق کوهستانی یا سنگی نیز از قطعات تراش‌خورده‌ی سنگی استفاده می‌شد که با روش‌های مشابه در محل‌های دیگر آماده و در دیواره‌ها نصب می‌گردید.یکی از ویژگی‌های جالب دیوار بزرگ، استانداردسازی در ابعاد و مصالح است. در سراسر طول دیوار، اندازه‌ی بلوک‌ها، ارتفاع برج‌های دیده‌بانی و فاصله‌ی بین آن‌ها تقریباً یکسان است. این نشان می‌دهد که دولت مرکزی چین از یک نظام دقیق مهندسی و مدیریتی برای کنترل کارگاه‌ها، مصالح و تیم‌های اجرایی استفاده کرده است. وجود این استانداردها، یادآور سیستم‌های کنترل کیفیت در صنایع مدرن است.دیگر جنبه‌ی پیش‌ساخته‌سازی در دیوار بزرگ، تقسیم کار منطقه‌ای بود. هر بخش از دیوار توسط گروه‌های مستقل کارگران و نظامیان ساخته می‌شد که بر اساس نقشه و الگوی واحد عمل می‌کردند. این یعنی طراحی مرکزی و اجرای محلی، مفهومی که امروزه در پروژه‌های مدولار بزرگ‌مقیاس نیز به‌کار می‌رود.چینیان همچنین در ساخت دیوار، از فناوری‌های ترکیبی استفاده کردند. در بخش‌های جنوبی، آجر پخته را جایگزین خاک کردند و با ملات برنج چسبناک، دیوارهایی مقاوم‌تر در برابر فرسایش ساختند. این ملات زیستی که از ترکیب آهک و نشاسته‌ی برنج به‌دست می‌آمد، دوام بسیار بالایی داشت و سبب شد بخش‌های زیادی از دیوار پس از دو هزار سال همچنان پایدار بماند. در واقع، می‌توان گفت آنان نخستین استفاده‌کنندگان از ملات‌های پیش‌ساخته‌ی ترکیبی بودند.نوآوری دیگر، تکرارپذیری در طراحی برج‌ها و دروازه‌ها بود. برج‌های دیده‌بانی در فواصل منظم و با پلان مربع‌شکل ساخته می‌شدند و همگی از اجزایی مشابه برخوردار بودند: پایه‌ی سنگی،

دیوارهای آجری، سقف چوبی و پلکان داخلی. این طراحی مدولار، امکان ساخت هم‌زمان چند برج را در نقاط مختلف فراهم می‌کرد و روند اجرا را سرعت می‌بخشید.از منظر مدیریتی، پروژه‌ی دیوار بزرگ چین نمونه‌ای از نخستین نظام‌های تولید انبوه ساختمانی است. هزاران کارگاه کوچک در طول مسیر فعال بودند، اما همگی بر اساس نقشه، ابعاد و دستورالعمل‌های واحد کار می‌کردند. این هماهنگی نشان از وجود ساختاری مشابه «زنجیره تأمین» امروزی دارد که از تولید تا نصب را پوشش می‌داد.از نظر فلسفی نیز، چینیان درک عمیقی از ارتباط میان نظم، قدرت و تکرار داشتند. دیوار بزرگ نه‌فقط مرزی دفاعی، بلکه نمادی از اقتدار و وحدت ملی بود. نظم تکرارشونده‌ی آجرها و برج‌ها، بیانگر دیدگاه فلسفی کنفوسیوسی درباره‌ی هماهنگی و انسجام جامعه بود.در مجموع، می‌توان گفت چین باستان با پروژه‌ی دیوار بزرگ، نخستین الگوی جهانی از ساخت صنعتی و پیش‌ساخته را پدید آورد. ویژگی‌هایی چون تولید مصالح در کارگاه‌های متعدد، استانداردسازی اجزا، استفاده از قالب‌های مشابه، تقسیم کار منطقه‌ای، و اتصالات خشک میان بلوک‌ها، همگی پایه‌هایی هستند که بعدها در صنعت پیش‌ساخته‌ی مدرن تداوم یافتند. دیوار بزرگ چین نه‌تنها یک سازه‌ی دفاعی، بلکه کارخانه‌ای عظیم در مقیاس سرزمینی بود که اندیشه‌ی ساخت سریع، تکرارپذیر و مهندسی‌شده را برای نخستین‌بار در تاریخ بشر معنا کرد.

۷-یونان باستان و فناوریهای ساخت قطعات پیش ساخته

در یونان باستان، ساخت معابد بزرگ مانند پارتنون در آتن، با بهره‌گیری از سیستم‌های پیش‌ساخته انجام می‌گرفت. ستون‌های این بنا از چند قطعه‌ی دایره‌ای‌شکل تشکیل شده بودند که به‌صورت مجزا در کارگاه تراشیده، سپس در محل روی هم قرار می‌گرفتند تا بدنه‌ی ستون را بسازند. این قطعات دارای اتصالات دقیق بودند تا پس از مونتاژ، سطحی یکپارچه و بدون درز ایجاد کنند. مهندسان یونانی با درک کامل از وزن، نیرو و مرکز ثقل، نحوه‌ی قرارگیری هر بخش را محاسبه کرده بودند، به‌گونه‌ای که هنوز پس از هزاران سال استوار مانده‌اند. ۶۰۰ سال قبل از میلادیونانی‌ها یک واکنش شیمیایی را کشف کردند که روش‌های استفاده از بتن را تغییر داد. با اختلاط پوزولان (Pozzolan) طبیعی موجود در جزیره سانتورینی که حاوی سیلیس- آلومینا با آهک بود، بتنی ایجاد کردند که در زیر آب و همچنین در هوا سخت می‌شد. آنها از این ماده برای

ایجاد پوشش‌های محافظ بر سازه‌های ساخته شده از آجر نسوز استفاده می‌کردند.یونانی‌های قدیمی برای ایجاد بتن، از سنگ شکسته شده با ملات آهک و ماسه استفاده می‌کردند. اما این مخلوط به نسبت قوی نبود و برای اهداف ساختمانی نمی‌توانستند از آن استفاده کنند.در یونان باستان، مفهوم ساخت پیش‌ساخته در قالب نظم هندسی، تکرار دقیق اجزا و اجرای هماهنگ سازه‌ها به بالاترین سطح هنری و فنی زمان خود رسید. یونانیان نخستین کسانی بودند که میان زیبایی، سازه و فناوری، توازن کاملی برقرار کردند و همین نگاه، بعدها اساس بسیاری از فناوری‌های مدرن پیش‌ساخته در معماری شد.مهم‌ترین عرصه‌ی بروز این تفکر، در ساخت معبدها و کاخ‌های یونانی بود؛ سازه‌هایی مانند معبد پارتنون در آکروپولیس آتن، معبد زئوس در المپیا، معبد آپولون در دیدیم و کاخ‌های کنوسوس و تیرینس در کرت و پلوپونز، همگی با اصولی مشابه ساخته شدند که نشانه‌های آشکاری از پیش‌ساخته‌سازی در آن‌ها دیده می‌شود.در این بناها، هر ستون از چندین بخش استوانه‌ای (درم) تشکیل می‌شد که در کارگاه‌های سنگ‌تراشی نزدیک معادن آماده می‌گردید. این قطعات پس از تراش دقیق، شماره‌گذاری می‌شدند و سپس در محل پروژه به‌صورت عمودی روی هم قرار می‌گرفتند. بر روی هر قطعه، شیارها و برجستگی‌های خاصی تراشیده می‌شد تا هنگام نصب، هم‌محور و هم‌سطح شوند. این همان اصل اتصال مکانیکی خشک است که امروز در سیستم‌های پیش‌ساخته به کار می‌رود.یونانیان برای ساخت ستون‌های بلند از روش پیش‌مونتاژ بخش‌ها در کارگاه استفاده می‌کردند تا از صحت ابعاد و تراز آن‌ها اطمینان حاصل کنند. سپس با جرثقیل‌های ابتدایی و سیستم قرقره و اهرم، قطعات را در محل اصلی نصب می‌کردند. هر ستون نه یک قطعه‌ی واحد، بلکه مجموعه‌ای از اجزای تکرارشونده بود که پس از نصب، ظاهری یکپارچه می‌یافت.در پارتنون، نظم ریاضی در ابعاد قطعات به حدی دقیق است که انحراف خطوط راست از دید انسان اصلاح شده است. کف بنا کمی قوس دارد، ستون‌ها اندکی به داخل متمایل‌اند، و فاصله‌ی میان آن‌ها با محاسباتی دقیق تنظیم شده است. اجرای چنین دقتی بدون تولید اجزای پیش‌ساخته و کنترل‌شده ممکن نبود.

شکل ۵- روند ساخت بناهای یونانی نشان میدهد که اکثر قسمتها اصلی سازه به صورت قطعات بزرگ تراش خورده و در نهایت برروی هم قرارداده میشدند

در معابد دوری و ایونی، سقف‌ها از تیرهای سنگی موازی تشکیل شده بود که پیش‌تر در اندازه‌های ثابت تراشیده می‌شدند. این تیرها روی ستون‌ها قرار می‌گرفتند و سپس صفحات افقی موسوم به «افریز» و «کتیبه» بر روی آن‌ها نصب می‌شد. تکرار و یکنواختی این قطعات، موجب شد سرعت ساخت معابد بالا رود و نگهداری آن‌ها آسان‌تر باشد.از نظر تزئینات نیز، یونانیان ابداع‌گر نوعی از پیش‌ساخته‌سازی تزئینی بودند. نقش‌برجسته‌ها و تندیس‌های معابد معمولاً در کارگاه‌های مجزا ساخته و سپس در محل نصب می‌شدند. این روش اجازه می‌داد چند گروه هنرمند هم‌زمان روی اجزای مختلف کار کنند، بی‌آنکه روند ساخت کل بنا متوقف شود؛ همان رویکردی که امروز در خطوط مونتاژ معماری مدولار دیده می‌شود.در کاخ‌های مینوسی و میسنی، استفاده از ستون‌های چوبی و سنگی هم‌اندازه و سقف‌های پیش‌قالب‌ریزی‌شده نیز دیده می‌شود. در کاخ کنوسوس، ستون‌های چوبی مخروطی‌شکل از قبل آماده و سپس در پایه‌های سنگی نصب می‌شدند. این ستون‌ها قابل تعویض و جابه‌جایی بودند و از این نظر نخستین نمونه از اجزای سازه‌ای قابل بازاستفاده در تاریخ محسوب می‌شوند.یونانیان همچنین در حمل‌ونقل قطعات سنگی بزرگ، از چرخ‌دست‌ها، قرقره‌ها و مسیرهای شیب‌دار مهندسی‌شده استفاده

می‌کردند. آن‌ها برای کاهش اصطکاک، از روغن زیتون یا گل مرطوب در زیر غلتک‌ها بهره می‌بردند. این روش‌ها نه‌تنها جابه‌جایی را آسان‌تر می‌کرد بلکه به آن‌ها امکان می‌داد مصالح را از مناطق دوردست به‌صورت استاندارد به محل پروژه برسانند.ویژگی جالب دیگر، استاندارد بودن تناسبات معماری یونانی است. آن‌ها نسبت‌هایی ثابت برای قطر ستون، فاصله بین ستون‌ها، و ارتفاع بنا تعریف کرده بودند . این نظام تناسب، همان نظام مدولار امروزی است که در طراحی پیش‌ساخته به کار می‌رود. هر قطعه با توجه به این نسبت‌ها ساخته می‌شد تا در ترکیب کلی سازه هماهنگ باشد.به‌طور کلی، می‌توان گفت که یونان باستان با تلفیق هنر، ریاضیات و مهندسی، صنعت پیش‌ساخته را از یک تجربه‌ی کارگاهی به سطح علم ارتقا داد. معابد آن‌ها نه‌تنها زیباترین بناهای جهان باستان بودند، بلکه از نظر فنی نیز پیشرفته‌ترین نمونه‌های ساخت مدولار زمان خود به‌شمار می‌رفتند. در این سازه‌ها، هر جزء به‌عنوان ماژولی مستقل طراحی می‌شد که در کنار اجزای مشابه ساختاری منسجم، پایدار و هماهنگ را پدید می‌آورد.در نتیجه، یونانیان پایه‌گذار اندیشه‌ی «پیش‌ساخته‌سازی هندسی» شدند؛ یعنی ساخت اجزای مشابه بر اساس نظم ریاضی و اتصال دقیق، که از پارتنون تا معابد زئوس و آپولون، همچون امضایی فنی و زیبایی‌شناختی در سراسر معماری آنان دیده می‌شود. این میراث، بعدها در روم، رنسانس و حتی در معماری صنعتی قرن بیستم تداوم یافت و همچنان منبع الهام طراحان سازه‌های مدرن پیش‌ساخته است.

۸- فناوری ساخت قطعات پیش ساخته در روم باستان

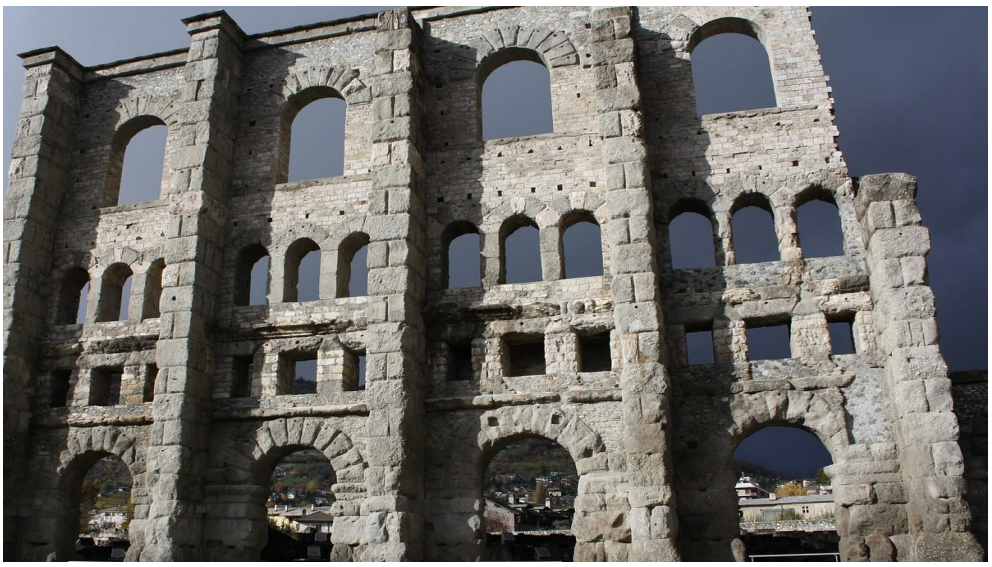
در امپراتوری روم، پیش‌ساخته‌سازی به مرحله‌ای صنعتی‌تر رسید. رومیان برای ساخت پل‌ها، قنات‌ها و جاده‌های سنگی از قطعات برش‌خورده و قالب‌دار استفاده می‌کردند. پل پونت دو گار در فرانسه، نمونه‌ای برجسته از این فناوری است. سنگ‌های این پل در معادن اطراف برش خورده و با اندازه‌های دقیق به محل حمل شدند تا بدون ملات بر روی یکدیگر بنشینند. جاده‌های شاهی روم نیز با لایه‌های مختلف سنگ‌فرش استاندارد ساخته می‌شدند، که باعث سهولت در نگهداری و تعویض قطعات می‌گردید . صنعت پیش‌ساخته در یونان باستان، بستر فکری و فنی لازم را برای شکوفایی فناوری‌های ساخت در امپراتوری روم فراهم کرد. رومیان، با بهره‌گیری از دانش هندسی، تناسبات، و روش‌های ساخت یونانی، توانستند این الگوها را به مرحله‌ای

صنعتی‌تر و کارآمدتر برسانند و در حقیقت، معماری یونانی را به یک فناوری سازمان‌یافته‌ی پیش‌ساخته تبدیل کنند.یونانیان پایه‌گذار اندیشه‌ی ساخت مدولار بودند؛ در معابدشان مانند پارتنون، هر ستون از چند بخش هم‌اندازه تشکیل می‌شد، تیرهای سنگی سقف در قالب‌های مشابه تراشیده می‌شدند، و تمامی اجزا طبق نظم ریاضی طراحی می‌گردیدند. این مفهوم که «هر جزء باید قابل تکرار، قابل مونتاژ و هماهنگ با کل سازه باشد»، مستقیماً در معماری روم تداوم یافت.رومیان این اصول را با افزودن فناوری بتن پوزولانی (Pozzolanic Concrete) و قالب‌های سنگی و چوبی توسعه دادند. آن‌ها نخستین تمدنی بودند که ساخت‌وساز را به شکل کارخانه‌ای سازمان‌دهی کردند؛ اجزای سازه مانند ستون‌ها، طاق‌ها و بلوک‌های بتنی در محل‌های دیگر ریخته، خشک و سپس به محل پروژه منتقل می‌شدند. به‌این‌ترتیب، رومیان عملاً صنعت پیش‌ساخته را از سنگ‌تراشی دستی یونانی به تولید قالبی و مهندسی‌شده ارتقا دادند.ویژگی برجسته‌ی معماری رومی، استفاده از فرم‌های هندسی بزرگ‌مقیاس و قابل تکرار بود. در سازه‌هایی مانند پانتئون، کولوسئوم، و حمام‌های کاراکالا، قطعات به‌صورت ماژولار طراحی شده بودند: طاق‌ها و گنبدها از واحدهای بتنی مشابه ساخته می‌شدند که در قالب‌های مشترک تولید و سپس در محل نصب می‌گردیدند. در پانتئون، قطر گنبد بیش از ۴۳ متر است و لایه‌های بتنی آن با تغییر چگالی مصالح از پایین به بالا ساخته شده‌اند—نمونه‌ای از طراحی هوشمند ماژولار که در کارخانه قابل کنترل بود.کولوسئوم رم نیز یکی از شگفت‌انگیزترین سازه‌های پیش‌ساخته‌ی جهان باستان است. ۸۰ دهانه‌ی طاقی با قوس‌های سنگی مشابه، هرکدام از قطعات تراش‌خورده‌ی یکسان تشکیل شده‌اند. این تکرار و تقارن باعث شد ساخت آن ظرف کمتر از یک دهه کامل شود—دستاوردی که بدون استفاده از اجزای پیش‌ساخته ممکن نبود.در کاخ‌ها و ویلاهای رومی نیز، بخش‌های تزئینی مانند ستون‌های مرمری، کتیبه‌ها و مجسمه‌ها در کارگاه‌های جدا ساخته و سپس در بنا نصب می‌شدند. حتی کف‌پوش‌های موزائیکی نیز در صفحات مستقل تولید و به محل حمل می‌گردیدند؛ روشی مشابه پانل‌های آماده در معماری امروزی.رومیان با ایجاد سیستم راه‌ها و پل‌های پیش‌ساخته، پیش‌ساخته‌سازی را از سطح معماری به زیرساخت گسترش دادند. پل‌های قوسی از بلوک‌های سنگی مشابه تشکیل می‌شدند که هرکدام در قالب‌های یکسان تراشیده و با اتصال خشک روی هم سوار می‌شدند. قنات‌ها نیز با قطعات بتنی نیم‌دایره‌ای ساخته می‌شدند که به‌آسانی در طول مسیر نصب می‌گردیدند.از نظر

مدیریتی، امپراتوری روم نخستین ساختار «مهندسی پروژه» را پایه‌گذاری کرد. هزاران کارگر، صنعتگر و مهندس در پروژه‌های بزرگ هم‌زمان کار می‌کردند، اما همه بر اساس استانداردهای واحد امپراتوری پیش می‌رفتند. این نظام یکپارچه‌ی طراحی، تولید و اجرا، یادآور سیستم‌های صنعتی مدرن است.به بیان دیگر، یونانیان پایه‌گذار تفکر هندسی و تناسب در پیش‌ساخته‌سازی بودند، و رومیان آن را به‌صورت فنی و صنعتی بسط دادند. اگر معابد یونان الگوی زیبایی و دقت در مونتاژ بودند، سازه‌های روم نمایش قدرت تولید انبوه، قالب‌سازی، و مدیریت هماهنگ اجزا بودند.در نتیجه، می‌توان گفت تحول صنعت پیش‌ساخته در امپراتوری روم، نتیجه‌ی مستقیم میراث فکری و فنی یونان بود. یونانیان نشان دادند که سازه می‌تواند از اجزای هم‌اندازه تشکیل شود و این اجزا می‌توانند در قالب‌های صنعتی تولید، به‌صورت انبوه ساخته، و در مقیاس امپراتوری به کار گرفته شوند.از دل این پیوستگی، مفاهیمی چون بتن پیش‌ساخته، قالب‌های ماژولار، اتصالات خشک، و طراحی تکرارشونده متولد شد. در حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد، رومی‌ها با مخلوط کردن خاکستر آتشفشان و پوزولان با آهک، واکنش شیمیایی مشابه یونانیان را کشف کردند. سیلیس، آلومینا و اکسید آهن موجود در خاکستر با هیدروکسید کلسیم موجود در آهک واکنش داده و بتن محکمی را تشکیل می‌داد. بتن ساخته شده با این ترکیب می‌توانست حین غوطه‌ور شدن در آب از خود مقاومت نشان دهد. این ویژگی دقیقاً همان چیزی بود که از مصالح قبلی مانند گچ ساخته شده از آهک و ماسه، انتظار نمی‌رفت.اگرچه استفاده از ملات ساخته شده از ماسه، آهک و آب به‌عنوان یک ماده پیونددهنده در سنگ‌تراشی‌های باستانی تا آن زمان وجود داشت، اما رومی‌ها با استفاده از ماسه آتشفشانی ایتالیایی یا "پوزولانا" در این زمینه نوآوری داشتند.هنگامی که معماران رومی، پوزولانا را به جای ماسه معمولی (و آب دریا به جای آب شیرین که به نظر می‌رسد مقاومت بتن را در طول زمان افزایش می‌دهد) به مخلوط ملات خود اضافه کردند، متوجه شدند که ملات حاصل به‌طور قابل توجهی قوی‌تر و بادوام‌تر است. همچنین می‌تواند در زیر آب دوام بیاورد؛ چیزی که با مواد قبلی امکان‌پذیر نبود. بتن تولید شده از نظر زیبایی‌شناسی مورد نظر معماران آن دوران نبود ، به همین دلیل رومی‌ها اغلب روی آن را با آجر و کاشی و سنگهای نمای می پوشاندند؛ اما این بتن به‌طور کامل امکانات ساختاری معماری رومی را تغییر داد و یک انقلاب معماری را آغاز کرد.

۹- توسعه فناوری ساخت قطعات پیش ساخته در دوران رنسانس

در دوران قرون وسطی و سپس رنسانس، صنعت ساخت‌وساز پیش‌ساخته به‌تدریج از یک مهارت سنتی و کارگاهی به مرحله‌ای از سازمان و تفکر مهندسی نزدیک شد. این دوران، پلی میان معماری باستان و معماری صنعتی نوین بود؛ جایی که پیش‌ساخته‌سازی دیگر تنها یک ابزار صرف برای سرعت ساخت نبود، بلکه به عنوان روشی برای دستیابی به نظم، زیبایی، و دوام در ساختمان‌ها شناخته می‌شد.



شکل ۶- در دوران رنسانس استقاده از اتصالات خشک در نصب قطعات معماری به طرز ماهرانه ای توسعه پیدا نمود.

در قرون وسطی، به‌ویژه از سده‌ی دوازدهم به بعد، ساخت کلیساهای عظیم گوتیک مانند نوتردام پاریس، شارتر، کلن و میلان به رشد چشمگیر فناوری ساخت ماژولار کمک کرد. این کلیساها از صدها هزار قطعه‌ی سنگی مشابه تشکیل می‌شدند که در کارگاه‌های سنگ‌تراشی نزدیک سایت یا در مناطق مجاور تولید می‌شدند. هر قطعه بر اساس نقشه‌های دقیق معمار، تراشیده، شماره‌گذاری و در محل نصب می‌شد. ستون‌ها، طاق‌ها، کمان‌ها و پنجره‌های عظیم همگی بر اساس واحدهای تکرارشونده طراحی می‌شدند. در واقع، این سازه‌ها نخستین نمونه از مدیریت زنجیره‌ی تأمین در صنعت ساختمان بودند، زیرا ساخت هر بخش در کارگاه خاصی

انجام و سپس به پروژه منتقل می‌شد.در همین دوران، صنعتگران اروپایی به مهارت بالایی در استانداردسازی اجزا دست یافتند. سنگ‌های اشلار (Ashlar) که در قلعه‌ها و دیوارهای شهرها به کار می‌رفتند، همگی با ابعاد و زاویه‌های یکسان تراشیده می‌شدند. این هماهنگی نه‌تنها سرعت ساخت را افزایش می‌داد، بلکه امکان تعویض و بازسازی آسان‌تر بخش‌های آسیب‌دیده را نیز فراهم می‌کرد. در واقع، مفهوم مدرن «نگهداری و تعمیر ماژولار» از همین دوره شکل گرفت.با گسترش تجارت و شهرنشینی در قرن سیزدهم و چهاردهم، صنوف سنگ‌تراشان، نجاران و آهن‌گران به‌صورت سازمان‌یافته فعالیت می‌کردند. هر صنف استانداردها و روش‌های خود را داشت و این منجر به همسانی در تولید اجزا در سراسر اروپا شد. ساخت کلیساها و قلعه‌ها در مناطق مختلف با اجزایی مشابه انجام می‌شد و به‌نوعی نخستین نظام صنعتی چندمنطقه‌ای در تاریخ شکل گرفت.در دوران رنسانس (قرن پانزدهم تا شانزدهم)، با احیای علوم هندسی و مهندسی، ساخت‌وساز پیش‌ساخته از تجربه‌ی سنتی به یک علم مبتنی بر ریاضیات تبدیل شد. معمارانی چون فیلیپو برونلسکی در گنبد کلیسای سانتا ماریا دل فیوره در فلورانس، از قطعات آجری مدولار و اتصالات هندسی خاص استفاده کردند که در کارگاه‌ها ساخته و در ارتفاعات مونتاژ می‌شدند. این گنبد عظیم، یکی از نخستین سازه‌هایی بود که با رویکرد پیش‌ساخته‌سازی حجمی طراحی شد.در همین زمان، لئوناردو داوینچی ایده‌ی ساخت سازه‌هایی با اجزای قابل انتقال را مطرح کرد. او در طرح‌های خود برای پل‌ها و ساختمان‌های نظامی، پیشنهاد می‌داد که اجزا در کارگاه ساخته و سپس در میدان نبرد یا محل پروژه سرهم شوند. این تفکر، جوهره‌ی مدرن پیش‌ساخته‌سازی نظامی و سازه‌های موقت امروزی است.در رنسانس همچنین نظام‌های تناسبات ریاضی و مدولار که از اندیشه‌های ویتروویوس و افلاطون سرچشمه می‌گرفت، دوباره زنده شد. معمارانی چون آلبرتی و پالادیو، سازه‌ها را بر اساس مدول‌های عددی طراحی کردند تا هر جزء با دیگری قابل جایگزینی باشد. این منطق بعدها در طراحی صنعتی قرن نوزدهم احیا شد و مبنای تولید انبوه گردید.در همین دوره، مصالح جدید مانند آجرهای قالبی، صفحات سنگی نازک و تیرهای چوبی استاندارد به کار گرفته شدند. کارگاه‌ها شروع به تولید قطعات هم‌شکل کردند تا نیازهای چند پروژه را به‌طور هم‌زمان پاسخ دهند. این تحول، گامی به سوی پیش‌تولید مصالح ساختمانی بود.در اواخر رنسانس و آغاز دوران باروک، ساخت قصرهای عظیم مانند

لوور در فرانسه و واتیکان در رم نیز با همین اصول صورت گرفت. بخش‌های تزئینی، ستون‌ها، گنبدها و دیوارهای سنگی در کارگاه‌های جدا تولید و سپس در محل نصب شدند. حتی برخی از نقش‌های مرمری و مجسمه‌ها در کارگاه‌های ونیز یا فلورانس ساخته و با کشتی به شهر مقصد ارسال می‌شدند—نمونه‌ای از زنجیره‌ی تأمین فراملی در ساخت‌وساز.از نظر فنی، بزرگ‌ترین نوآوری این دوران، تلفیق هنر و مهندسی در تولید کنترل‌شده‌ی اجزا بود. در حالی که قرون وسطی بیشتر بر مهارت دستی تکیه داشت، رنسانس بر علم هندسه و نظم عقلی تأکید کرد. استفاده از نقشه‌های دقیق، ترسیمات سه‌بعدی و ماکت‌های مقیاس‌دار باعث شد ساخت هر قطعه با دقت و انطباق بالا انجام شود—همان چیزی که امروزه در طراحی دیجیتال و مدل‌سازی BIM می‌بینیم.در نتیجه، از قرون وسطی تا رنسانس، صنعت پیش‌ساخته مسیر بلوغ خود را پیمود: از ساخت کلیساهای سنگی با قطعات مشابه، تا طراحی علمی سازه‌ها با مدول‌های هندسی و تولید کارگاهی هماهنگ. این دو دوره زمینه‌ساز جهش بزرگ قرن نوزدهم و تولد رسمی صنعت پیش‌ساخته مدرن شدند—جایی که تفکر یونانی درباره‌ی نظم، ابتکار رومیان در تولید انبوه، مهارت قرون وسطایی در سنگ‌تراشی، و دقت هندسی رنسانس، همگی در قالب مهندسی صنعتی به هم پیوستند.

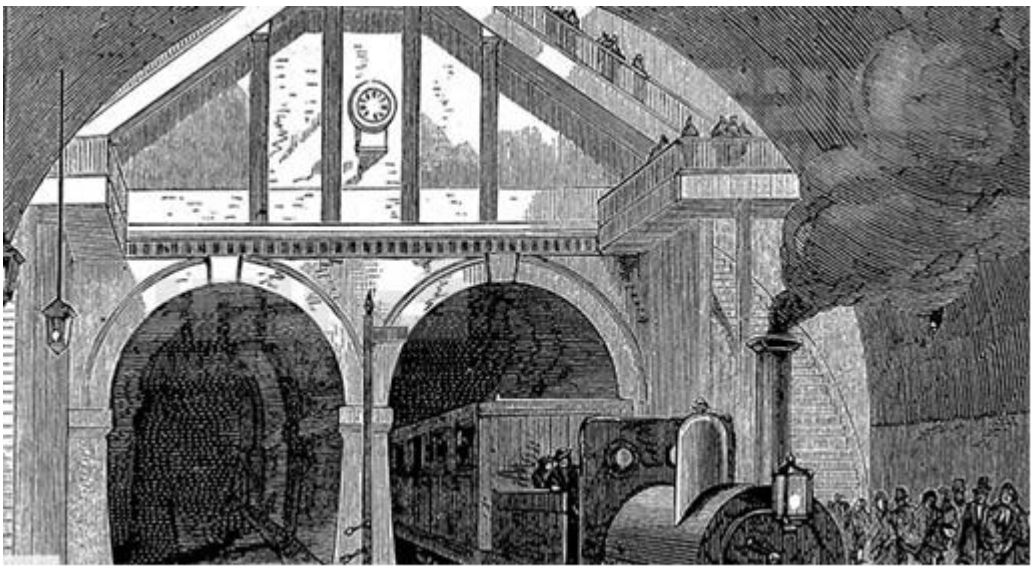
۱۰-انقلاب صنعتی و توسعه فناوری قطعات پیش ساخته

با آغاز انقلاب صنعتی در اواخر قرن هجدهم و اوایل قرن نوزدهم، ساخت‌وساز از یک کارگاهِ دستیِ غیر حرفه ای به زنجیره‌ای صنعتی، سریع و قابل تکرار دگرگون شد و همین بستر، تفکر «پیش‌ساخته» را از تجربه‌های پراکنده به روشی رایج رساند.نیروی بخار و سپس موتورهای صنعتی، کارخانه‌های چوب‌بُری، ریخته‌گری آهن و تولید شیشه را پیوسته و پرظرفیت کردند؛ در نتیجه تیرآهن، ستون چدنی، ورق و پروفیل، و شیشه تخت در ابعاد استاندارد به‌صورت انبوه در دسترس قرار گرفت.راه‌آهن—به‌عنوان شاه‌راه لجستیک—امکان داد قطعات سنگین و حجیم با سرعت و هزینه کمتر از کارخانه به سایت برسد؛ استانداردسازی ریل و واگن، ذهنیت «اندازه واحد و قابل‌حمل» را به بدنه صنعت تزریق کرد.استانداردهای فنی نو مانند رزوه ویت‌وُرث، اندازه‌های پیچ‌ومهره و پروفیل‌های تکرارشونده، باعث شد اتصالِ «خشک و پیچی» میان قطعات فلزی عمومیت پیدا کند و مونتاژ در محل، به‌جای بستن کارگاه درجا، ترجیح داده

شود.در همین زمینه، نماهای چدنیِ پیش‌ساخته در محله سوهوِ نیویورک (دهه ۱۸۴۰ به بعد) با پانل‌های ریخته‌گری‌شده و ستون‌های آماده، نمونه درخشانی از مدولارشدنِ پوسته ساختمان بودند؛ قطعات در کارخانه قالب‌گیری و در محل، همچون لگو پیچ می‌شدند.در اروپا، اسکلت‌های فلزیِ کارخانه‌ها و ایستگاه‌های راه‌آهن با دهانه‌های وسیع—مثل سوله‌های ایستگاهی در لندن و پاریس—از قوس‌ها و خرپاهای یک‌شکل ساخته می‌شد و نشان می‌داد که سازه بزرگ را می‌توان از واحدهای همسان، سریع و ایمن برپا کرد.نماد اوج این رویکرد، کاخ بلورین لندن (۱۸۵۱) بود: شبکه‌ای از تیر و ستون چدنی و صفحات شیشه‌ای استاندارد که تمام اجزا در کارخانه ساخته، شماره‌گذاری و در هایدپارک طی چند ماه مونتاژ شد و حتی بعداً به محل جدید منتقل گردید؛ یعنی محصولی کاملاً قابل جداسازی و نصب‌مجدد.رونقِ شیشه ارزانِ صفحه‌ای، کنار ریخته‌گری دقیق، امکان داد «پوسته‌های سبک و تکرارشونده» شکل بگیرند؛ پنجره‌ها و لانترن‌های سقفی به‌صورت ماژول‌های هم‌اندازه تولید و مثل کمربند به اسکلت فلزی بسته می‌شدند.اختراع سیمان پرتلند (۱۸۲۴) و پیشروی آزمایش‌های سازه‌ای روی چدن و فولاد، راه را برای بتن‌ریزی در قالب‌های مکرر و بعدها بتن مسلح هموار کرد؛ یعنی ماده‌ای با قابلیت قالب‌گیری صنعتی که ذاتاً به پیش‌ساخته شدن گرایش دارد. در نیمه‌ی نخست قرن نوزدهم، اختراع سیمان پرتلند توسط جوزف اسپدین در انگلستان، نقطه‌ی عطفی بود که امکان تولید بتن مقاوم و پایدار را فراهم کرد. این دستاورد با توسعه‌ی ماشین‌آلات اختلاط، حمل و قالب‌ریزی بتن همراه شد و در نتیجه تولید اجزای بتنی در محیط کنترل‌شده‌ی کارخانه آغاز گردید.

شکل ۷- چوزف آسپدین معمار و مخترع سیمان پرتلند

جوزف آسپدین (Joseph Aspdin) معمار و مخترع انگلیسی بود که در سال ۱۷۷۸ در لیدز به دنیا آمد و بعدها یکی از تأثیرگذارترین چهره‌ها در تاریخ مصالح ساختمانی شد. او در جریان کار های متداول بنایی، به دنبال یافتن ملاتی مقاوم‌تر و پایدارتر از آهک سنتی بود. تلاش‌های او سرانجام در سال ۱۸۲۴ به ثبت اختراع ماده‌ای انجامید که «سیمان پرتلند» نام گرفت؛ محصولی که به دلیل شباهت ظاهری ملات سخت‌شده به سنگ پرتلند چنین نام‌گذاری شد. روش او شامل پخت مخلوطی از سنگ آهک و رس و آسیاب آن به پودر نرم بود، هرچند هنوز با سیمان پرتلند مدرن تفاوت‌هایی داشت. آسپدین با این اختراع گامی بنیادین در توسعه سیمان‌های هیدرولیکی برداشت و زمینه تولید صنعتی سیمان در جهان را فراهم کرد. او سال‌های پایانی عمرش را در ویکفیلد گذراند و در ۱۸۵۵ درگذشت. میراث او همچنان در زیربنای تقریباً تمام سازه‌های بتنی جهان دیده می‌شود و اختراع او زمینه ساز اقدامات بعدی در زمینه تولید قطعات پیش ساخته بتنی گردید .



شکل ۸- تونل بتنی تامس در شمال لندن یکی از دستاوردهای بزرگ اولین صنعت بتن در دهه هشتاد می باشد .

ساخت تونل تامس (Thames Tunnel) به رهبری ویلیام آسپدین، پسر بزرگ جوزف آسپدین در دهه ۱۸۳۰، یکی از بزرگترین پروژه‌های مهندسی و ساختمانی تاریخ بود. این پروژه که به دستور همینگ و رهبری ایزامبارد کینگد برونل، مهندس عمران معروف و پدر برونل، به اجرا درآمد و از سیمان پرتلند به عنوان ماده اصلی برای بتن کردن تونل استفاده کرد.تونل تامس در طول ساخت خود با چالش‌های بسیاری مواجه شد. این چالش‌ها شامل مشکلات فنی، مالی و حتی مسائل اجتماعی بودند. اما با تلاش و تحمل این مشکلات، ساخت تونل در سال ۱۸۴۳ به پایان رسید و با افتتاح آن، اتصال دائمی بین لندن و شمال فراهم شد.استفاده از سیمان پرتلند در این پروژه تاریخی، نشان داد که این ماده ساختمانی نه تنها برای کارهای کوچک و محلی، بلکه برای پروژه‌های بزرگ و مهم مانند ساخت تونل تامس نیز مناسب و موثر است. تونل تامس نه تنها یک دستاورد فنی بلکه نمادی از همکاری و توانمندی انسان‌ها در مواجهه با چالش‌های بزرگ است.

شکل ۹- سیمان پرمقاومت تراس که از آندرناخ آلمان به تمام اروپا صادر میگردید

سیمان ترَس نتیجه یک روند طولانی و تدریجی در تاریخ مهندسی مصالح است و کشف آن توسط یک فرد مشخص انجام نشد، بلکه در چند مرحله شکل گرفت. نخستین بار در دوران **روم باستان**، حدود دو هزار سال پیش، مهندسان رومی متوجه شدند که برخی خاکسترهای آتشفشانی، وقتی با آهک و آب مخلوط می‌شوند، سختی و دوام بسیار بالایی پیدا می‌کنند و حتی در زیر آب نیز سفت می‌شوند. یکی از مناطقی که رومی‌ها از خاکستر آن استفاده می‌کردند، نواحی آتشفشانی نزدیک شهر **Andernach** در آلمان بود؛ جایی که بعدها این خاکستر با نام **Trass** شناخته شد. پس از سقوط امپراتوری روم، استفاده از این نوع ملات‌ها برای چندین قرن کاهش یافت، اما در **قرن هجدهم** مهندسان اروپایی دوباره به خواص خاکسترهای آتشفشانی علاقه‌مند شدند و استخراج گسترده Trass در منطقه Andernach آغاز شد. با اختراع سیمان پرتلند توسط **جوزف آسپدین** در سال **1824**، تحول بزرگی در صنعت ساختمان رخ داد. در نیمه دوم قرن نوزدهم، مهندسان دریافتند که ترکیب سیمان پرتلند با پودر Trass می‌تواند ملات

و بتنی بسیار بادوام، پایدار در برابر رطوبت و مقاوم در برابر عوامل شیمیایی ایجاد کند. به این ترتیب، سیمانی به نام **Trass Cement**یا «سیمان ترس» شکل گرفت که حاصل ترکیب دانش باستانی رومی و فناوری مدرن سیمان‌سازی بود.

ویلیام بی. ویلکینسون (William B. Wilkinson) مهندس و مخترع بریتانیایی قرن نوزدهم بود که نقش مهمی در شکل‌گیری ایده‌های اولیه استفاده از بتن تقویت‌شده و همچنین تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی داشت. در دوره‌ای که او فعالیت می‌کرد، صنعت ساختمان هنوز تا حد زیادی به مصالح سنتی مانند چوب، آجر و سنگ وابسته بود و استفاده از بتن در مراحل ابتدایی توسعه قرار داشت. در چنین شرایطی ویلکینسون با ارائه ایده‌هایی نوآورانه تلاش کرد روش‌های جدیدی برای افزایش مقاومت و کارایی سازه‌ها معرفی کند. یکی از مهم‌ترین اقدامات او ثبت اختراعی در دهه ۱۸۵۰ بود که در آن روشی برای ساخت اجزای ساختمانی بتنی با تقویت فلزی ارائه می‌داد.در این اختراع، ویلکینسون پیشنهاد کرد که می‌توان قطعاتی از بتن را در قالب‌های مشخص و در شرایط کنترل‌شده تولید کرد و سپس آنها را در محل ساختمان نصب نمود. این ایده در واقع یکی از نخستین نمونه‌های مطرح‌شده از مفهوم قطعات بتنی پیش‌ساخته بود. او معتقد بود که اگر قطعات بتنی به جای ساخت مستقیم در محل پروژه، در محیطی مناسب و با کیفیت کنترل‌شده ساخته شوند، استحکام و دوام بیشتری خواهند داشت. علاوه بر این، تولید قطعات در خارج از محل پروژه می‌توانست سرعت ساخت‌وساز را افزایش داده و نظم بیشتری به فرآیند اجرا بدهد.

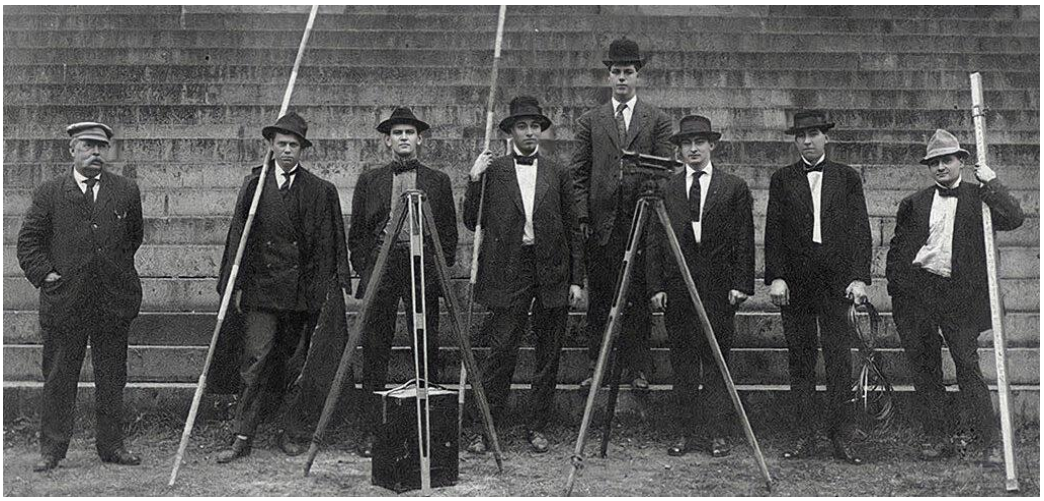
شکل ۱۰- ویلیام بی. ویلکینسون نقش مهمی در تولید بتن تقویت شده و تولید اولین قطعات پیش ساخته بتنی داشت

ویلکینسون همچنین به این نکته توجه داشت که بتن به تنهایی در برابر فشار مقاومت بالایی دارد اما در برابر نیروهای کششی و خمشی ضعیف است. به همین دلیل او پیشنهاد داد که در داخل قطعات بتنی از میله‌ها یا شبکه‌های آهنی استفاده شود تا مقاومت آنها افزایش یابد. این ایده بعدها به عنوان یکی از اصول اساسی بتن مسلح شناخته شد. وجود تقویت‌کننده‌های فلزی در قطعات پیش‌ساخته علاوه بر افزایش مقاومت سازه، باعث می‌شد این قطعات در هنگام حمل‌ونقل و نصب نیز دچار شکست یا ترک نشوند.در طرح‌های پیشنهادی ویلکینسون، قطعاتی مانند کف‌ها و سقف‌های بتنی می‌توانستند به صورت پیش‌ساخته تولید شوند. این قطعات پس از قالب‌گیری و سخت شدن بتن، از محل تولید به محل ساخت‌وساز منتقل می‌شدند و در سازه نصب می‌گردیدند. چنین روشی امکان تولید انبوه اجزای ساختمانی را فراهم می‌کرد و به نوعی آغازگر ایده صنعتی‌سازی ساختمان محسوب می‌شد. او همچنین اشاره کرد که استفاده از بتن در این قطعات می‌تواند مقاومت ساختمان در برابر آتش‌سوزی را افزایش دهد، زیرا بتن نسبت به چوب و بسیاری از مصالح دیگر دیرتر آسیب می‌بیند.اگرچه در زمان ویلکینسون فناوری و

امکانات صنعتی برای گسترش سریع این روش‌ها محدود بود، اما ایده‌های او بعدها توسط مهندسان دیگر توسعه پیدا کرد. در دهه‌های بعد، پیشرفت در صنعت فولاد و بتن باعث شد سیستم‌های بتن مسلح و قطعات پیش‌ساخته به شکل گسترده‌تری مورد استفاده قرار گیرند. امروزه بسیاری از ساختمان‌ها، پل‌ها، تونل‌ها و سازه‌های بزرگ با استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته ساخته می‌شوند و این روش یکی از مهم‌ترین فناوری‌های ساخت‌وساز مدرن به شمار می‌آید.در مجموع می‌توان گفت که ویلکینسون با ارائه ایده تولید قطعات بتنی تقویت‌شده در قالب‌های از پیش طراحی‌شده و انتقال آنها به محل پروژه، یکی از نخستین گام‌ها را در مسیر توسعه فناوری پیش‌ساخته برداشت. هرچند نام او در مقایسه با برخی از مهندسان بعدی کمتر مطرح شده است، اما نقش او در شکل‌گیری مفاهیم اولیه استفاده از بتن تقویت‌شده و تولید صنعتی اجزای ساختمانی در تاریخ مهندسی عمران اهمیت قابل توجهی دارد.در بریتانیا و مستعمرات، «کلیساها و خانه‌های ورق‌موج‌دار (Tin Tabernacles) «به‌صورت بسته‌های پیش‌ساخته فولادی/چوبی با پیچ‌ومهره به اقصی نقاط صادر می‌شد؛ سازه‌های سبکِ قابل حمل که در چند روز در محل سرپا می‌شدند.در فرانسه و بریتانیا، پل‌های قوسی و خرپاییِ فلزی با المان‌های تکراری تولید و کنار هم نصب شدند؛ از پل‌های لوله‌ای تا خرپاهای پرریوت، همه تابع یک منطق: قطعه استاندارد، تولید در کارخانه، حمل سریع، نصب خشک.در آمریکا، ظهور «بالون‌فریم» چوبی (دهه ۱۸۳۰) با میخ‌های ارزان و تیرچه‌های یک‌اندازه، ساخت خانه چوبی را شتاب داد؛ الوارهای استاندارد از کارخانه می‌آمد و دیوارها مثل ماژول بالا می‌رفتند.نمونه مشهور دیگر، کلبه قابل‌حملِ مانینگ (دهه ۱۸۳۰) بود که به استرالیا صادر شد: قطعات چوبیِ از پیش‌بُریده، بسته‌بندی و در مقصد مونتاژ؛ الگویی عینی از «خانه کیتی» پیش از عصر کاتالوگ‌ها.در نیمه دوم سده نوزدهم، فناوری فولادِ بسمر (۱۸۵۶) وزن سازه‌ها را کم و دهانه‌ها را بزرگ کرد؛ خرپاهای تکراری فولادی به‌سرعت کارخانه‌ای شدند و کیفیت و ایمنی را قابل پیش‌بینی کردند.سازه‌های نمایشیِ اواخر سده مثل برج ایفل (۱۸۸۹) با قطعات آهنِ پرریوتِ شماره‌خورده به‌صورت خشک بالا رفتند؛ هر قطعه نقشه نصب داشت و کل پروژه نوعی «خط مونتاژ در مقیاس شهری» بود.در سویی دیگر، بیمارستان‌ها و پادگان‌های موقتِ نظامی با کابین‌های پرتابل و سوله‌های ماژولار، درمان و اسکان سریع را ممکن کردند؛ تجربه‌هایی که

بعدها به مسکن کارگری و مدرسه پیش‌ساخته تسری یافت.در شهرهای صنعتی، کارخانه‌های ریسندگی و انبارها با شبکه‌های ستون-تیرِ چدنیِ یک‌اندازه بالا می‌رفتند؛ پیمانکاران ساختمانی فقط «دهانه و تراز» را از کاتالوگ های کارخانه ای انتخاب می‌کرد و بقیه عملیات نصب براحتی توسط پیچ و مهره صورت میپذیرفت.در همین دوران ریسک تولید قطعات بتنی نیز کاهش یافت و تاثیر شرایط نامساعد جوی هوا و فصل کمتر شد؛ چرا که ۶۰٪ اقدامات تولیدی در فضای سرپوشیده کارخانه انجام می‌گرفت و در سایت، صرفا عملیات نصب در مدت کوتاهی رخ می‌داد—همان مزیتی که امروز هم جوهر پیش‌ساخته استدر این دوران به تدریج کیفیت همگن شد و نظام کنترل کیفی تولید قطعات در کارخانه و آزمون مصالح و قالب‌های تولید شکل گرفت و این فناوری رو به توسعه گذاشت.

در انتها، نمایشگاه‌های جهانی—از لندن ۱۸۵۱ تا پاریس ۱۸۸۹—به ویترین فناوری‌های پیش‌ساخته بدل شدند: دولت‌ها می‌خواستند سرعت، مقیاس و نظم صنعتی را به جهانیان نشان دهند.در قرن نوزدهم و بیستم، با گسترش انقلاب صنعتی و رشد کارخانه‌های سیمان در اروپا و آمریکا، صنعت ساخت‌وساز پیش‌ساخته بتنی وارد دوره‌ای تازه از بلوغ شد. این دوره نه‌تنها از نظر فناوری مصالح و ماشین‌آلات، بلکه از لحاظ تفکر مهندسی، سازمان تولید و اقتصاد ساخت نیز تحولی بنیادین به همراه داشت. در همین دوران، اروپاییان دریافتند که بتن در صورت مسلح شدن با میلگرد فولادی، می‌تواند هم فشار و هم کشش را تحمل کند و از این‌جا بود که بتن مسلح شکل گرفت.در فرانسه، مهندس فرانسوا هنّیکو نخستین کسی بود که اصول بتن مسلح را در سیستم ساختمانی خود به کار برد. او در دهه‌ی ۱۸۹۰ ساختمان‌هایی طراحی کرد که در آن تیرها، ستون‌ها و سقف‌ها از قطعات بتن مسلح پیش‌ساخته تشکیل می‌شدند و در محل نصب می‌گردیدند. این سیستم، پایه‌ی فکری ساخت مدرن در قرن بیستم شد. هم‌زمان در آلمان، اتو میر و سپس آگوست پره در فرانسه نیز از بتن مسلح برای خلق سازه‌هایی با فرم‌های تکرارشونده استفاده کردند.



شکل ۱۱- کاپیتان روی پانل Captain J. Roy Pennell (در سمت چپ تصویر) ، در کنار اعضای شرکت ساختمانی Pennell & Harley ایستاده است (۱۹۰۵ میلادی)

در اواخر قرن نوزدهم، با افزایش تقاضا برای ساختمان‌های صنعتی، انبارها و پل‌ها، تولید قطعات بتنی در قالب‌های ثابت کارخانه‌ای رواج یافت. قالب‌های فولادی جایگزین قالب‌های چوبی شدند و امکان تکرار بی‌نقص فرم‌ها را فراهم کردند. هم‌زمان، ماشین‌آلات ارتعاش‌دهنده و سیستم‌های بخار برای عمل‌آوری بتن ابداع شدند که کیفیت و سرعت تولید را افزایش می‌دادند.شرکت پانل روی بعدها به‌عنوان هسته اولیه و پایه‌گذار Metromont در زمینه تولید قطعات بتنی پیش ساخته شناخته شد. این تصویر نشان‌دهنده دورانی است که گروهی از مهندسان پیشرو، با تخصص در ساخت‌وسازقطعات پیش ساخته بتنی و رویکردهای نوآورانه، همکاری خود را برای توسعه زیرساخت‌های صنعتی و عمرانی آغاز کردند. حضور کاپیتان Pennellدر کنار همکارانش نه‌تنها بیانگر نقش محوری او در راهبری تیم است، بلکه نشان‌دهنده آغاز مسیری است که در نهایت به شکل‌گیری یکی از شرکت‌های مهم در صنعت قطعات پیش‌ساخته منجر شد.

۱۱- توسعه فناوری ساخت قطعات پیش ساخته در قرن بیستم

در قرن بیستم، فناوری ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی به یکی از مهم‌ترین تحولات در صنعت ساخت‌وساز تبدیل شد. این دوره را می‌توان زمان بلوغ و گسترش گسترده روش‌های صنعتی در معماری و مهندسی عمران دانست؛ زمانی که بتن از یک ماده ساختمانی نسبتاً ساده به محصولی مهندسی‌شده و استاندارد تبدیل شد. رشد سریع شهرنشینی در اروپا و آمریکا در آغاز قرن بیستم، همراه با افزایش جمعیت و شکل‌گیری طبقه متوسط شهری، تقاضای فراوانی برای ساخت مسکن سریع، مقاوم و مقرون‌به‌صرفه ایجاد کرد. در چنین شرایطی، مهندسان و معماران به دنبال روش‌هایی بودند که بتوانند فرآیند ساخت‌وساز را از کارگاه‌های سنتی به محیط‌های صنعتی و کارخانه‌ای منتقل کنند. یکی از راه‌حل‌های مهم، تولید قطعات بتنی در کارخانه و مونتاژ آن‌ها در محل پروژه بود؛ رویکردی که بعدها با عنوان «ساخت پیش‌ساخته» شناخته شد.

در نخستین سال‌های قرن بیستم، پروژه‌های آزمایشی متعددی برای ساخت خانه‌های پیش‌ساخته بتنی در کشورهای انگلستان و ایالات متحده انجام شد. در این پروژه‌ها، دیوارها، سقف‌ها و گاه حتی پله‌ها به‌صورت پانل‌های بتنی در کارخانه ریخته می‌شدند و سپس به محل ساختمان منتقل شده و با اتصالات ساده در کنار یکدیگر قرار می‌گرفتند. بین سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۵ نمونه‌هایی از خانه‌های مسکونی با این روش ساخته شد که نشان داد استفاده از قطعات پیش‌ساخته می‌تواند سرعت ساخت را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش دهد. در همین دوره، برخی شرکت‌های ساختمانی در آمریکا به ارائه «خانه‌های کاتالوگی» پرداختند؛ خانه‌هایی که طرح آن‌ها در کاتالوگ‌ها ارائه می‌شد و قطعات آن‌ها به‌صورت آماده برای نصب به خریداران تحویل داده می‌شد. با آغاز جنگ جهانی اول، اهمیت روش‌های صنعتی در ساخت‌وساز بیشتر شد. کمبود نیروی کار، نیاز فوری به ساخت پناهگاه‌ها، انبارهای نظامی، جاده‌ها و پل‌ها، و همچنین محدودیت منابع، دولت‌ها را وادار کرد تا از روش‌های سریع و صنعتی استفاده کنند. در این دوران، استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته در ساخت زیرساخت‌های نظامی و حمل‌ونقل گسترش یافت. اما نقطه عطف واقعی در توسعه این فناوری پس از پایان جنگ جهانی دوم رخ داد. در سال ۱۹۴۵ بخش بزرگی از شهرهای اروپا ویران شده بود و میلیون‌ها نفر خانه‌های خود را از دست داده بودند. بازسازی این شهرها با روش‌های سنتی تقریباً غیرممکن به نظر

می‌رسید، زیرا هم نیروی کار کافی وجود نداشت و هم زمان لازم برای ساخت طولانی‌مدت در دسترس نبود. به همین دلیل، بسیاری از کشورها برنامه‌های گسترده‌ای برای صنعتی‌سازی ساخت‌وساز و استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی آغاز کردند.

شکل ۱۲- ساخت خانه های اضطراری در بریتانیا با استفاده از قطعات پیش ساخته بتنی پس از جنگ جهانی دوم به یکی از طرحهای مهم دولت تبدیل گردید.

در بریتانیا، دولت برنامه‌ای بزرگ برای ساخت «خانه‌های اضطراری» اجرا کرد که در آن صدها هزار واحد مسکونی به‌سرعت و با استفاده از فناوری پیش‌ساخته ساخته شدند. در فرانسه نیز معماران و مهندسانی همچون ژان پرووه و لوکوربوزیه نقش مهمی در گسترش ایده‌های صنعتی در معماری ایفا کردند. لوکوربوزیه در پروژه معروف «یونیت دابیتاسیون» در سال ۱۹۵۲ از عناصر بتنی تکرارشونده و ماژولار استفاده کرد تا نشان دهد که معماری مدرن می‌تواند با تولید صنعتی هماهنگ شود. در همین زمان، کشورهای اروپای شرقی و اتحادجماهیر شوروی نیز به‌طور گسترده از سیستم‌های پیش‌ساخته استفاده کردند. در دهه ۱۹۵۰، پروژه‌های عظیم مسکونی موسوم به «خرُشچفکا» در شوروی با استفاده از پانل‌های بزرگ بتنی

اجرا شدند. این ساختمان‌ها معمولاً چندطبقه بودند و دیوارها و دال‌های آن‌ها در کارخانه تولید شده و با جرثقیل در محل نصب می‌شدند. در آلمان شرقی نیز سیستم مشابهی با نام «پلاتن‌باو» توسعه یافت که امکان ساخت سریع مجتمع‌های بزرگ مسکونی را فراهم می‌کرد.

در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، پیشرفت در فناوری بتن و فولاد افق‌های تازه‌ای برای صنعت پیش‌ساخته گشود. یکی از مهم‌ترین نوآوری‌ها در این دوره، توسعه بتن پیش‌تنیده بود. در این روش، میلگردها یا کابل‌های فولادی پیش از بتن‌ریزی تحت کشش قرار می‌گرفتند و پس از سخت شدن بتن، نیروی فشاری دائمی در عضو بتنی ایجاد می‌کردند. این فناوری باعث افزایش مقاومت و ظرفیت باربری سازه‌ها شد و امکان ساخت تیرها و دال‌هایی با دهانه‌های بلندتر را فراهم کرد. بتن پیش‌تنیده به‌سرعت در ساخت پل‌ها، ساختمان‌های صنعتی، پارکینگ‌های طبقاتی و سالن‌های بزرگ مورد استفاده قرار گرفت و به یکی از ارکان اصلی صنعت پیش‌ساخته تبدیل شد.

شکل ۱۳- تست لوله پیش ساخته بتنی در زیر بار ۲۱ تنی (کانادا)

کشورهای اسکاندیناوی، به‌ویژه فنلاند و سوئد، در سازماندهی تولید صنعتی قطعات بتنی پیش‌ساخته پیشگام بودند. در این کشورها کارخانه‌های بزرگ با خطوط تولید پیوسته و قالب‌های متحرک ایجاد شد که امکان تولید انبوه قطعات استاندارد را فراهم می‌کرد. قطعات تولیدشده با کامیون یا قطار به محل پروژه منتقل می‌شدند و با دقت بالا در کنار یکدیگر قرار می‌گرفتند. در این کشورها استانداردهای دقیقی برای ابعاد، مقاومت، کیفیت سطح، رنگ و نوع اتصالات تدوین شد که بعدها به الگوی بسیاری از کشورهای دیگر تبدیل شد.

شکل ۱۴- نمونه ای از ساختمانهای کوچک بتنی پیش ساخته بتنی در ابتدای قرن بیستم

در ایالات متحده آمریکا نیز صنعت بتن پیش‌ساخته در نیمه دوم قرن بیستم رشد قابل توجهی داشت. ساختمان‌های اداری، پارکینگ‌های چندطبقه، استادیوم‌ها و پل‌های بزرگ با استفاده از قطعات بتنی آماده ساخته شدند. تأسیس مؤسسه بتن پیش‌ساخته (PCI) در دهه ۱۹۵۰ نقش مهمی در توسعه دانش فنی، آموزش مهندسان و تدوین آیین‌نامه‌های طراحی ایفا کرد. این مؤسسه استانداردهایی برای طراحی، تولید و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته ارائه داد که هنوز هم در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد.در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، با رونق اقتصادی در کشورهای صنعتی، استفاده از فناوری پیش‌ساخته در پروژه‌های عمومی و زیربنایی گسترش یافت. مدارس، بیمارستان‌ها، کارخانه‌ها، ایستگاه‌های حمل‌ونقل، پل‌های بزرگراهی و حتی برج‌های بلندمرتبه با استفاده از قطعات پیش‌ساخته ساخته شدند. این روش نه‌تنها سرعت اجرای پروژه‌ها را افزایش داد، بلکه باعث بهبود کیفیت ساخت نیز شد، زیرا قطعات در شرایط کنترل‌شده کارخانه تولید می‌شدند.

شکل ۱۵- پوستر تبلیغاتی یک شرکت امریکایی که نشان میدهد با تولید قطعات پیش ساخته بتنی کارهای عمرانی و ساختمانی به راحتی انجام میشود

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، پیشرفت‌های علمی در حوزه بتن موجب تولید انواع جدیدی از بتن شد، از جمله بتن‌های سبک، بتن‌های با مقاومت بالا، بتن خودتراکم و افزودنی‌های شیمیایی پیشرفته. این نوآوری‌ها امکان تولید قطعات پیچیده‌تر و مقاوم‌تر را فراهم کردند. همچنین سیستم‌های اتصالات مکانیکی پیشرفته توسعه یافتند که به جای ملات سنتی از پیچ‌ها، صفحات فولادی و مهارهای فلزی استفاده می‌کردند. این سیستم‌ها علاوه بر افزایش سرعت نصب، امکان تعویض و تعمیر قطعات را نیز فراهم می‌کردند.

از نظر معماری نیز بتن پیش‌ساخته در این دوره به عنصری مهم در طراحی ساختمان‌ها تبدیل شد. سبک معماری بروتالیسم که بر نمایش صریح بتن و ساختار سازه تأکید داشت، در بسیاری از کشورهای اروپایی گسترش یافت. سبک «بروتال» یا بروتالیسم یکی از مهم‌ترین جریان‌های معماری قرن بیستم است که ریشه‌های آن از دهه‌های نخست این قرن شکل گرفت، اما در میانه قرن به بلوغ کامل رسید. خاستگاه اولیه این سبک را باید در چند روند مهم جست‌وجو کرد: نخست، تغییرات تکنولوژیک و صنعتی که استفاده از بتن مسلح را به‌عنوان ماده‌ای قابل اعتماد، ارزان و انعطاف‌پذیر ممکن ساخت؛ دوم، جریان‌های مدرن‌گرایی اولیه که به‌دنبال شکستن تزئینات تاریخی و حرکت به سمت فرم‌های ناب، عملکردی و صادقانه بودند. در دهه ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ معمارانی مانند لوکوربوزیه به‌طور گسترده از بتن استفاده کردند و مفهوم «صراحت سازه‌ای» و «بی‌پیرایگی» را ترویج دادند. اصطلاح béton brut یا «بتن خام» که بعدها نام سبک بروتالیسم از آن مشتق شد، در همین آثار اولیه به‌چشم می‌خورد.پس از جنگ جهانی دوم، اروپا و بخش‌هایی از جهان با کمبود منابع، نیاز به بازسازی سریع و فشار اجتماعی گسترده برای ساخت مسکن، مدارس و ساختمان‌های عمومی روبه‌رو شد. در این فضا، معماری بروتال با رویکرد صادقانه، اقتصادی و فاقد تزئین، پاسخ مناسبی به نیازهای دوران بود. این سبک تلاش می‌کرد واقعیت مصالح و کارکرد را بدون پنهان‌کاری نشان دهد: بتن همان‌گونه که هست دیده می‌شود، رد قالب‌ها بر سطح باقی می‌ماند، سازه پنهان نمی‌شود و فرم بیش از آنکه تزیینی باشد، نتیجه نیاز و عملکرد است.در دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، بروتالیسم به‌طور روشن به‌عنوان یک سبک مستقل تثبیت شد. معماران انگلیسی مانند آلیسون و پیتر اسمیتسون این واژه را به‌عنوان نشانه‌ای از صداقت سازه، صراحت اجتماعی و گرایش ضدتجمل‌گرایی به‌کار بردند. در این دوره، بروتالیسم از یک روش صرفاً سازه‌ای فراتر رفت و تبدیل به نوعی موضع‌گیری فرهنگی شد: یک زبان معماری که خواهان نمایش بی‌پرده مواد، عملکرد و سازمان فضایی بود. ساختمان‌های بزرگ دولتی، دانشگاه‌ها، کتابخانه‌ها و مجموعه‌های مسکونی غالباً با این سبک ساخته شدند. خطوط تیز، فرم‌های حجیم، تناسبات قوی و حضور قدرتمند در بافت شهری ویژگی‌های برجسته این دوره بودند.در همین زمان، کشورهای مختلف هرکدام خوانش خاصی از بروتالیسم ارائه دادند. در ژاپن، این زبان با تکنیک‌های پیشرفته بتن‌ریزی ترکیب شد و به

آثاری پیچیده و شاعرانه انجامید. در آمریکا، بروتالیسم بیشتر در دانشگاه‌ها و مراکز اداری به‌کار رفت و با نگاهی عملکردگرایانه‌تر گسترش یافت. در شوروی و اروپای شرقی نیز این سبک در مقیاس وسیع، به‌ویژه برای پروژه‌های عمومی، مورد استفاده قرار گرفت. از دهه ۱۹۷۰ به بعد، بروتالیسم با نقدهایی مواجه شد: برخی آن را سرد، سنگین یا بیش از حد خشن می‌دانستند و برخی دیگر آن را نمادی از معماری دولتی بزرگ‌مقیاس می‌دیدند. با این حال، در دهه‌های اخیر، موجی از بازخوانی و بازکشف ارزش‌های بروتالیسم شکل گرفته است. بسیاری از آثار این سبک به‌عنوان میراث معماری حفظ می‌شوند و نسل جدید معماران، زیبایی صداقت مصالح، توانایی فرم‌های اسکلتی و حس قدرت خام بتن را دوباره مورد توجه قرار داده‌اند.به‌طور کلی، بروتالیسم از ترکیب سه عامل اصلی به‌وجود آمد: توسعه فناوری بتن پیش ساخته، اصول مدرنیسم اولیه و نیازهای اجتماعی-اقتصادی پس از جنگ جهانی دوم. این سبک با تاکید بر مصالح آشکار، فرم‌های سنگین، عملکردگرایی صریح و پرهیز از تزئین، یکی از اصیل‌ترین و تأثیرگذارترین زبان‌های معماری قرن بیستم شد و امروز نیز همچنان الهام‌بخش جریان‌های معاصر است.در پایان این فصل باید به این مسئله اشاره نمود که ناوری ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی در قرن بیستم به یکی از مهم‌ترین دستاوردهای صنعت ساختمان تبدیل شد و نقش اساسی در تغییر شیوه‌های ساخت‌وساز ایفا کرد. توسعه این فناوری در پاسخ به نیاز روزافزون به ساخت سریع، اقتصادی و استاندارد ساختمان‌ها شکل گرفت؛ به‌ویژه پس از جنگ جهانی دوم که بسیاری از کشورها با کمبود شدید مسکن و زیرساخت روبه‌رو بودند. تولید قطعات بتنی در کارخانه و انتقال آن‌ها به محل پروژه باعث شد کیفیت ساخت افزایش یابد، زمان اجرای پروژه‌ها کاهش پیدا کند و کنترل دقیق‌تری بر فرآیند تولید مصالح و اجزای سازه‌ای اعمال شود.در طول قرن بیستم، پیشرفت در طراحی قالب‌ها، روش‌های حمل و نصب، و همچنین بهبود ترکیبات بتن و فناوری‌های مسلح‌سازی، امکان تولید قطعات متنوع‌تری مانند دیوارها، ستون‌ها، تیرها، دال‌ها و پانل‌های نما را فراهم کرد. این تحولات نه‌تنها سرعت ساخت را افزایش داد، بلکه موجب استانداردسازی اجزای ساختمانی و شکل‌گیری سیستم‌های صنعتی ساختمان شد. در نتیجه، پروژه‌های بزرگ مسکونی، صنعتی و شهری با هزینه کمتر و بهره‌وری بالاتر قابل اجرا شدند.

در مجموع، فناوری قطعات پیش‌ساخته بتنی در قرن بیستم زمینه‌ساز صنعتی‌شدن ساختمان، افزایش کیفیت و دوام سازه‌ها و پاسخ‌گویی به نیازهای گسترده شهرنشینی شد. این فناوری با ایجاد تعادل میان سرعت ساخت، دقت اجرایی و کارایی اقتصادی، به یکی از پایه‌های اصلی توسعه معماری و مهندسی معاصر تبدیل شده و همچنان در قرن بیست‌ویکم نیز به‌عنوان یکی از روش‌های مهم و کارآمد در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۱۶- از اوایل قرن بیستم سبک بروتالیسم به واسطه فناوری ساخت قطعات پیش ساخته بتنی توسعه چشمگیری پیدا نمود.

ساختمان‌های دانشگاهی، مراکز فرهنگی و برج‌های مسکونی در فرانسه، انگلستان و آلمان با استفاده از پانل‌های بتنی پیش‌ساخته طراحی شدند. این پانل‌ها نه‌تنها نقش سازه‌ای داشتند بلکه به‌عنوان عناصر نمای ساختمان نیز استفاده می‌شدند.در همین دوران، پژوهش‌های علمی گسترده‌ای درباره رفتار سازه‌ای قطعات پیش‌ساخته، عملکرد اتصالات، دوام بتن، مقاومت در برابر آتش و عملکرد لرزه‌ای انجام شد. دانشگاه‌های فنی برجسته‌ای مانند ETH زوریخ، TU برلین و École des Ponts در فرانسه نقش مهمی در پیشبرد این تحقیقات داشتند. نتایج این

مطالعات نشان داد که سازه‌های پیش‌ساخته می‌توانند از نظر ایمنی و دوام با سازه‌های بتن درجا رقابت کنند و حتی در بسیاری موارد عملکرد بهتری داشته باشند.در پایان قرن بیستم، صنعت بتن پیش‌ساخته به یکی از پایه‌های اصلی ساخت‌وساز مدرن در اروپا و آمریکا تبدیل شده بود. کارخانه‌های تولید قطعات بتنی نه‌تنها مراکز تولید مصالح بلکه مراکز فناوری، طراحی مهندسی و نوآوری محسوب می‌شدند. در این مرحله، ساخت‌وساز به سمت سیستم‌های مدولار و صنعتی حرکت کرد؛ سیستم‌هایی که در آن هر جزء ساختمان در کارخانه با دقت بالا تولید می‌شود و سپس در محل پروژه مانند قطعات یک پازل در کنار یکدیگر قرار می‌گیرد. این تحول، پایه‌گذار رویکردهای نوین ساخت‌وساز صنعتی و هوشمند در قرن بیست‌ویکم شد و راه را برای فناوری‌هایی مانند پانل‌های سه‌بعدی، سیستم‌های پیش‌تنیده پیشرفته و حتی چاپ سه‌بعدی بتن هموار کرد. ناوری ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی در قرن بیستم به یکی از مهم‌ترین دستاوردهای صنعت ساختمان تبدیل شد و نقش اساسی در تغییر شیوه‌های ساخت‌وساز ایفا کرد. توسعه این فناوری در پاسخ به نیاز روزافزون به ساخت سریع، اقتصادی و استاندارد ساختمان‌ها شکل گرفت؛ به‌ویژه پس از جنگ جهانی دوم که بسیاری از کشورها با کمبود شدید مسکن و زیرساخت روبه‌رو بودند. تولید قطعات بتنی در کارخانه و انتقال آن‌ها به محل پروژه باعث شد کیفیت ساخت افزایش یابد، زمان اجرای پروژه‌ها کاهش پیدا کند و کنترل دقیق‌تری بر فرآیند تولید مصالح و اجزای سازه‌ای اعمال شود.در طول قرن بیستم، پیشرفت در طراحی قالب‌ها، روش‌های حمل و نصب، و همچنین بهبود ترکیبات بتن و فناوری‌های مسلح‌سازی، امکان تولید قطعات متنوع‌تری مانند دیوارها، ستون‌ها، تیرها، دال‌ها و پانل‌های نما را فراهم کرد. این تحولات نه‌تنها سرعت ساخت را افزایش داد، بلکه موجب استانداردسازی اجزای ساختمانی و شکل‌گیری سیستم‌های صنعتی ساختمان شد. در نتیجه، پروژه‌های بزرگ مسکونی، صنعتی و شهری با هزینه کمتر و بهره‌وری بالاتر قابل اجرا شدند.در مجموع، فناوری قطعات پیش‌ساخته بتنی در قرن بیستم زمینه‌ساز صنعتی‌شدن ساختمان، افزایش کیفیت و دوام سازه‌ها و پاسخ‌گویی به نیازهای گسترده شهرنشینی شد. این فناوری با ایجاد تعادل میان سرعت ساخت، دقت اجرایی و کارایی اقتصادی، به یکی از پایه‌های اصلی توسعه معماری و مهندسی معاصر تبدیل شده و همچنان در قرن بیست‌ویکم نیز به‌عنوان یکی از روش‌های مهم و کارآمد در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرد.