استراتژی‌های حمل بار در عصر هخامنشی با تکیه بر شناسایی روش‌های حمل مصالح سنگی در تخت‌جمشید

مهدی معتمدمنش*
مریم کوراوند**
زهرا شیرزادنیا***
خسرو دانشجو****

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

علمی پژوهشی

چکیده

جابه‌جایی مصالح در محورهای افقی و عمودی، یکی از چالش‌های اساسی در ساخت همهٔ ابنیه ازجمله بناهای تاریخی است. معماران و مهندسان تمدن‌های باستان، راهبردهای ساده ولی کاربردی برای حل این چالش‌ها توسعه دادند. در معدود پژوهش‌های محققان حوزهٔ فناوری تاریخی ساختمان موضوع حمل بار در دنیای باستان مورد توجه قرار گرفته، اما پاسخی قاطع برای ابزارها و روش‌های حمل مصالح در بخش‌های مختلف فرایند استخراج تا اجرا وجود ندارد. تمدن هخامنشی ازجمله تمدن‌های برجستهٔ تاریخی بوده و مجموعه تخت‌جمشید به‌عنوان شاخص‌ترین پروژهٔ این تمدن، دربرگیرندهٔ دستاوردهای بدیع مهندسی و هنری است. با توجه به استفاده از قطعات سنگی بسیار بزرگ و سنگین در ساخت این مجموعه، و به‌ویژه مسیرهای طولانی میان معادن برداشت سنگ و محل کاربرد آن‌ها، استفاده از راهکارهای هوشمندانه و ابزارهای کارآمد برای فائق آمدن بر مشکلات جابه‌جایی مصالح، اهمیتی ویژه داشت. در این مقاله، نویسندگان در جست‌وجوی شناسایی استراتژی‌های به‌کار گرفته‌شده توسط سازندگان هخامنشی برآمده‌اند؛ بدین منظور با بررسی روش‌های حمل بار در تمدن‌های پیش از هخامنشی یا هم‌عصر با آنان، که مطابق با شواهد تاریخی تأثیر قابل توجهی بر شکل‌گیری فرهنگ معماری هخامنشی داشته‌اند، به فرضیه‌پردازی درخصوص روش‌های حمل مصالح در فرایند ساخت تخت‌جمشید پرداخته‌اند. شواهد باستانی، برداشت‌های میدانی، و داده‌های جغرافیایی در بستری از تاریخ فناوری معماری، پارامترهایی هستند که محققان حاضر برای شناسایی صحت فرضیات خود بر آن‌ها اتکا کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان از آن دارد که بنا بر موقعیت شیب طبیعی زمین، ماشین‌های ساده متکی بر چرخ و سورتمه، برای حمل بار بر روی زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در دامنه‌های با شیب بسیار تند استفاده از صفه‌بندی‌های محدود نیز دور از انتظار نیست. مواجهه با آب برای سازندگان چالش‌برانگیز نبوده است و شناورها یا پل‌های موقت برای انتقال بار کاربرد می‌یافتند. جرثقیل‌هایی متشکل از قرقرهٔ مرکب و طناب محتمل‌ترین راه برای بالا بردن مصالح سنگین در محور عمودی است.

کلیدواژه‌ها:

فناوری ساخت هخامنشیان، استراتژی حمل بار، حمل افقی و عمودی مصالح، جرثقیل، سورتمه.

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۳ ـ بهار و تابستان ۱۴۰۲
صفحات ۹۴-۶۹ ۶۹

* استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، نویسنده مسئول، m.motamed@modares.ac.ir
** دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه تربیت مدرس
*** دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه تربیت مدرس
**** دانشیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس

پرسش پژوهش

استراتژی‌های به‌کار گرفته‌شده برای حمل عناصر معماری سنگی برای ساخت مجموعه تخت‌جمشید چه بوده است؟

مقدمه

مجموعه تخت‌جمشید در شمال شهرستان مرودشت در استان فارس واقع شده و دربرگیرندۀ ویرانۀ کاخ‌های عظیم بر روی صفه‌ای به وسعت حدوداً ۱۲۵۰۰۰ مترمربع است. علاوه بر این کاخ‌ها، بناهای متعدد برزن جنوبی و نیز گوردخمه‌های کوه رحمت، از دیگر آثار تاریخی قابل توجه در محدودۀ ثبت‌شدۀ تخت‌جمشید به شمار می‌روند. تخت‌جمشید پایتخت ایدئولوژیک هخامنشیان بوده و هرساله برای برپایی آیین‌های مذهبی و سیاسی، نمایندگانی از سرتاسر جهان باستان را گرد هم می‌آورده است (محمدی خبازان و حبیبی ۱۴۰۱، ۲۶ و ۲۷؛ Root 2015, 12-15)؛ ازاین‌رو هخامنشیان غایت دستاوردهای فنی و هنری خویش را در ساخت آن به کار بسته بودند. بنا به اذعان محققان، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای هخامنشیان در ساخت این مجموعه، تلفیقی چیره‌دست از هنر و فناوری معماری نقاط گوناگون یک امپراتوری عظیم است که در عین یادآوری دستاوردهای معماری و هنری ملل تابعه، کاملاً بدیع و یکپارچه بوده و در همان نگاه اول هخامنشی می‌نماید (شاپورشهبازی ۱۳۸۹، ۲۸).

در طی دو قرن گذشته که محققان غربی به مطالعۀ مستمر آثار تاریخی ایران پرداخته‌اند (Mousavi 2002, 212) بناهای هخامنشی توجه آنان را به خود جلب کرده‌اند؛ به‌ویژه از اواسط قرن بیستم که اصالت هنری آثار هخامنشی به لطف فعالیت‌های علمی محققانی چون مارگارت کول روت[۱]، هلین سنچیزی–ویردنبورگ[۲] و مارگارت میلر [۳]مورد توجه مجامع علمی قرار گرفت (Motamedmanesh 2022, 300)، ارزش‌های این ابنیه برای به دست آوردن درک صحیحی از ویژگی‌های بارز و متمایزکنندۀ این تمدن از سایر تمدن‌های باستان، بیش از پیش نمایان گردید. بااین‌حال، نگاه اکثر محققان معطوف به ویژگی‌های هنری آثار معماری هخامنشی بوده و کمتر به فناوری به‌کاررفته در اجرای ابنیه پرداخته شده است. پر کردن این خلأ دانش در حوزۀ فناوری‌های ساختمانی هخامنشی، فعالیت جدید پژوهشی محققان را می‌طلبد. مقالۀ حاضر، در این خصوص تهیه گردیده است.

ستون‌های سربه‌فلک‌کشیدۀ کاخ‌های تخت‌جمشید، که برخی از آن‌ها به‌رغم حضور دوهزاروپانصدساله در برابر عوامل ویرانگر طبیعی و انسان هنوز هم سالم مانده‌اند، به‌خوبی یادآور دستاوردهای فنی و مهندسی هخامنشیان است (معتمدمنش ۱۳۹۷، ۸). ارتفاع برخی از ستون‌ها که از اجزای کوچک‌تر سنگی که با تکنیک آناثیروزیس[۴] به هم اتصال یافته تشکیل شده‌اند، به بیش از ۱۹ متر می‌رسد. حمل و جابه‌جایی این قطعات سنگی که بزرگ‌ترین آن حدوداً ۸ متر طول داشته و وزن بعضی از آن‌ها تا ۴۵ تن می‌رسد (کرفتر ۱۳۸۸، ۳۴ و ۳۸)، موضوع درخور توجهی است. به‌ترتیبی مشابه، موضوع جابه‌جایی قطعات سنگی عظیم به‌کاررفته در کانال‌های آب واقع در زیر صفۀ تخت‌جمشید که طولی بالغ بر ۱۰ متر و عرض تا ۵ متر دارند (Gondet 2015, 294-321) نیز برای سازندگان چالش‌برانگیز بوده است. جالب آنکه فواصل طولانی میان معادن برداشت سنگ و محل کاربرد آن، که گاه به ده‌ها کیلومتر می‌رسید (امان‌اللهی ۱۳۸۹، ۴۰)، وضعیت ناهموار توپوگرافی در این مسیرها، و به‌ویژه ابزارهای ابتدایی که برای برداشت و جابه‌جایی مصالح ساختمانی در اختیار سازندگان بوده، سبب شده است تا انسان مدرن حتی تصور دستیابی به چنین دستاوردهای شگرف معماری در عهد باستان را غیرممکن بداند.

محدودیت دسترسی به منابع برای استحصال مصالح ساختمانی مرغوب برای ساخت بناهای عظیم پیکر، و نیز محدودیت‌های فناورانه برای استخراج و جابه‌جایی محصول برداشت‌شده از منابع سبب شده بود تا موضوع انتقال بار برای ساخت بناهای یادمانی، به یکی از چالش‌های مهم در دنیای باستان تبدیل شود؛ درنتیجه هریک از تمدن‌ها روش‌های کاربردی برای حمل و جابه‌جایی مصالح توسعه دادند. به‌رغم فواصل قابل توجه میان مراکز تمدن‌های باستان و نبود وسایل حمل‌ونقل سریع امروزین، آثار نوشتاری و تصویری برجای‌مانده بر ارتباط متداوم و پیوستۀ میان این فرهنگ‌ها، نیز

پویایی زندگی و کار در گذشته‌های دور حکایت دارند. آنچنان‌که از شواهد تاریخی استنباط می‌شود، صنعتگران و هنرمندان بسیاری از سراسر دنیا برای ساخت کاخ‌های هخامنشی گرد هم آمدند. کتیبه‌های معروف به «منشورهای بنیاد» بازمانده از دوران پادشاهی داریوش اول، اطلاعات ارزشمندی را دراین‌باره در اختیار ما قرار می‌دهد. کتیبهٔ منصوب به «سنگ بنا»[۵] یافت‌شده در سایت هخامنشی شوش، که به زبان‌های گوناگون باستانی و بر روی مصالح مختلف حکاکی شده بود، جزئیات فراوانی را در این خصوص بیان می‌دارد؛ این کتیبه توضیح می‌دهد چگونه هخامنشیان برای ساخت کاخ‌هایشان در شوش ـ و احتمالاً در سایر اقامتگاه‌های سلطنتی ـ به گرد هم آوردن مصالح مرغوب و صنعتگران ماهر از سراسر امپراتوری وسیعشان متکی بودند. بر اساس این اسناد، بابلی‌ها مسئول حفر پی، تولید خشت خشک، و پخت آجر بودند، درحالی‌که مردمانی از لیدی و یونان کار با مصالح سنگی را بر عهده داشتند (Lecoq 1997, 235-237). فراهم آوردن الوار درخت سرو لبنانی (که توسط آشوری‌ها و یونانی‌ها انجام می‌شد)، کارگران ماهر لیدیایی و مصری را قادر می‌ساخت تا به ساخت‌وساز با این چوب ارزشمند بپردازند. طلای استخراج‌شده در آسیای مرکزی و صغیر در شوش توسط زرگران مادی و مصری مورد استفاده قرار می‌گرفت و سایر مواد گران‌بها همچون نقره، آبنوس، عاج و لاجورد از مناطق دورافتادهٔ امپراتوری همچون شمال شرق آفریقا، شبه‌قارهٔ هند، یا آسیای مرکزی به دست می‌آمد (همان). چنین تنوعی در به‌کارگیری مصالح ساختمانی برداشت‌شده از اقصانقاط امپراتوری، نیز به همکاری گرفتن برترین هنرمندان و استادکاران اقوام گوناگون، نشان از علاقه‌مندی تمدن هخامنشی به جمع‌آوری علوم مختلف داشته و انعطاف‌پذیری آنان را در ترکیب، توسعه و بهینه‌سازی امور ساختمانی به نمایش می‌گذارد. ازاین‌رو مطالعهٔ روش‌های حمل بار در دیگر تمدن‌های باستانی می‌تواند گام آغازین برای شناسایی روش‌هایی باشد که هخامنشیان آن‌ها را استفاده می‌کردند. درنهایت، بررسی و تحلیل آثار و شواهد باستانی برجای‌مانده در سایت‌های هخامنشی می‌تواند در پاسخ‌گویی به معمای چگونگی حمل قطعات سنگی راهگشا باشد.

۱. شیوه‌های حمل بار در دوران باستان از دیدگاه محققان امروزی

بناهای یادمانی[۶] به بیانی بی‌بدیل، از غلبهٔ سازندگان بر مصالح، فنون ساختمان و حجم بالای نیروی کار می‌پردازند (Trigger 1990, 119-132). با در نظر گرفتن ابعاد این بناها، تأمین مصالح مرغوب و به‌ویژه انتقال آن به محل ساخت، امری چالش‌برانگیز بوده و این مهم توجه محققان عصر حاضر را برای شناسایی این روش‌ها برانگیخته است. در معدود پژوهش‌های محققانِ حوزهٔ فناوری ساختمان در دوره‌های تاریخی، موضوع حمل بار در دنیای باستان مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، جان فیچن[۷] مورخ معماری، در کتاب خود با موضوع ساخت بناها پیش از عصر مکانیزه شدن، ضمن معرفی برخی چالش‌های عمومی پیش روی سازندگان باستانی در حمل بارهای سنگین، مشخصاً در دو بخش تحت عنوان ابزارآلات بالابر، و حمل‌ونقل در ساخت‌وساز، به شناسایی انواع ماشین‌آلات، مکانیزم عملکرد آن‌ها، نیز شیوه‌های حمل‌ونقل مصالح ازطریق زمین و آب پرداخته است (Fitchen 1986). جورج رایت[۸] باستان‌شناس در مجموعه کتاب‌های خود، به معرفی فناوری معماری باستان و مصالح ساختمانی پرداخته است. او در بخش مربوط به مصالح سنگی علاوه بر سنگ‌شناسی، نحوهٔ استخراج از معادن و تراش سنگ، به شناسایی استراتژی‌های حمل سنگ در تمدن‌های کهن پرداخته و با معرفی شواهد باستانی برجای‌مانده، نظریاتی را درخصوص ارتباط این نشانه‌ها با روش‌های جابه‌جایی مصالح مطرح می‌سازد (Wright 2000; 2005; 2009). مطالعات هرل و استورمر[۹] پژوهشگران فعال در حوزهٔ زمین–باستان‌شناسی سنگ‌های قدیمی، از جهت بررسی فناوری‌ها و ابزارآلات به‌کاربرده‌شده در فرایند استخراج و حمل قطعات سنگی حائز اهمیت است (Harrell and Storemyr 2009, 30-32). به‌طور ویژه، استراتژی‌های حمل مصالح در تمدن‌هایی که الهام‌بخش هنر و فناوری هخامنشیان شناخته می‌شوند، توسط محققان متعدد بررسی شده است. برای مثال، مصرشناس آلمانی دیتر آرنولد[۱۰] در کتاب *ساختمان در مصر*[۱۱] به بررسی روش‌های ساخت ابنیهٔ سنگی در عهد فراعنه پرداخته و جنبه‌های گوناگون ساختمان‌سازی ازجمله حمل مصالح را پوشش داده است (Arnold 1991). همچنین جان راسل[۱۲] باستان‌شناس حوزهٔ خاورمیانه و هنر آشوری، در مقالهٔ خود[۱۳] با مطالعهٔ کتیبه‌ها و نقش‌برجسته‌های بازمانده از کاخ‌های آشوری به روش‌های احتمالی استخراج و حمل قطعات عظیم سنگی پرداخته است (Russell 1987, 522-530). مسئلهٔ

حمل بار در تمدن یونان توسط محققان برجسته ازجمله جان کالتن[۱۴] بررسی شده است. او در تحقیقات خود با تکیه بر اطلاعات تاریخی و شواهد ناشی از برداشت‌های باستان‌شناسان، به شناسایی ابزارآلات و ماشین‌هایی می‌پردازد که عناصر معماری عظیم یونانی به‌وسیلهٔ آن‌ها حمل می‌شدند (Coulton 1974). در سال‌های اخیر، الساندرو پیراتینی[۱۵] ضمن مطالعهٔ تاریخچهٔ بهره‌گیری از جرثقیل برای حمل عمودی عناصر سنگین ساختمانی، شرایط و الزامات قطعات ساختمانی برای حمل با این روش را بررسی نمود (Pierattini 2018).

تاریخچهٔ مطالعات فناوری معماری ایرانی به حضور معماران و باستان‌شناسان غربی در ایران پیوند خورده است (Motamedmanesh 2022, 302). از قرن نوزدهم میلادی که مطالعات مربوط به معماری باستان در ایران رونق یافت (Abdi 2001, 60-62)، مجموعه تخت‌جمشید مورد مراجعهٔ مکرر این دسته از محققان قرار گرفت. به‌رغم حجم قابل توجه آثار منتشرشده در حوزهٔ معماری و هنر هخامنشی، تنها معدودی به تحلیل مهندسی و فناورانه از ابنیهٔ باستانی پرداخته‌اند. مارسل دیالافوآ[۱۶] مهندس عمران و شرق‌شناس فرانسوی که اولین کاوش‌های علمی در شهر باستانی شوش را بر عهده گرفت، در کتاب خود با عنوان *آکروپولیس شوش*[۱۷]، به شباهت میان آپادانای شوش و کاخ‌های تخت‌جمشید پرداخته و نظریات خویش درخصوص نحوهٔ برپا کردن این بناها را ارائه داده است (Dieulafoy 1890, 332). پس از منسوخ شدن قانون منوپولی حفاری در ایران برای فرانسویان در سال ۱۹۲۷، هرتزفلد، معمار و باستان‌شناس آلمانی، در زمرهٔ اولین نفراتی است که کار کاوش را در سایت‌های هخامنشی فارس آغاز می‌کند (Mousavi 2005, 452-457). در سال ۱۹۳۱ فردریش کرفتر[۱۸] به دعوت ارنست هرتزفلد[۱۹]، معمار و باستان‌شناس آلمانی، برای کمک در حفاری تخت‌جمشید به ایران آمد و پس از عزیمت هرتزفلد[۲۰]، به‌تنهایی تا سال ۱۹۳۵ عملیات کاوش را ادامه داد. وی سال‌ها پس از ترک تخت‌جمشید به ارائهٔ طرح بازسازی این سایت باستانی پرداخت. در این میان، وی نکات فنی حمل قطعات سنگی موجود در سایت، و به‌ویژه نظریات دیالافوآ را در این خصوص بررسی کرد (کرفتر ۱۳۸۸، ۵۳). در فرایند عملیات محافظت و بازسازی سایت‌های هخامنشی فارس، مؤسسهٔ ایتالیایی ایزمئو[۲۱] به شواهد و نکات مهمی در ارتباط با نحوهٔ ساخت و برپا کردن این سازه‌ها دست یافت (Tilia 1968; 1972; 1978). به‌طور ویژه، این گروه در شناسایی معدودی از معادن باستانی، کیفیت مصالح سنگی به‌کاررفته، نیز نحوهٔ تراش و کنار هم چیدن اجزای سنگی عناصر معماری، دانش بی‌بدیلی را در اختیار محققان قرار داد.[۲۲] در خلال سال‌های پایانی دههٔ هفتاد میلادی، کارل نیلاندر[۲۳] باستان‌شناس سوئدی، به مطالعات میدانی گسترده برای شناسایی و مقایسهٔ فناوری‌های به‌کار گرفته‌شده در تمدن‌های هخامنشی و یونان پرداخت و به‌طور ویژه نحوهٔ اتصالات در سازه‌های هخامنشی پاسارگاد را مورد بررسی قرار داد (Nylander 1970, 36). تمرکز وی بر الگوهای تراش عناصر سنگی و نیز کاربردهای باستانی حجاری‌هایی که امروز در سطح آثار باستانی قابل مشاهده است، دریچهٔ نوینی را در درک بهتر نحوهٔ عملکرد اجزای معماری پیش روی محققان باز نمود. از سال ۱۳۸۰ شمسی، بنیاد پژوهشی پارسهٔ پاسارگاد فعالیت‌های متعددی را درزمینهٔ تاریخ و باستان‌شناسی هخامنشی، نیز حفاظت، مرمت و سامان‌دهی محوطهٔ ابنیهٔ باستانی در دستور کار خود قرار داده (Talebian 2010, 300) و نتیجهٔ آن را سالانه در قالب کتب و مقالات متعدد در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Persepolis.info). برای مثال، مجلد منتشرشدهٔ کارنامهٔ پارسه ازجمله کتبی است که بخشی از این دستاوردهای جدید تحقیقاتی را به نمایش می‌گذارد. به‌طور اخص، همکاری‌های بین‌المللی این پژوهشکده در سال‌های اخیر، به حضور سباستین گندت[۲۴]، باستان‌شناس فرانسوی، در ایران منجر شد که به بررسی معادن سنگ به‌کاررفته در ساخت تخت‌جمشید و شواهد باستانی موجود در محل این معادن در کوه حسین و کوه رحمت پرداخت. بررسی‌های وی نکات قابل تأملی را درخصوص توجه ویژهٔ معدن‌کاران هخامنشی در استحصال سنگ‌های مرغوب روشن ساخته است. اهتمام این معدن‌کاران به برداشت از معادن با کیفیت بالای سنگ که دسترسی بدان به‌دلیل شیب زمین با دشواری هموار بود، قابل توجه است (Gondet 2015, 280). از زمان بررسی‌های زمین‌شناسی معادن موجود در مرودشت (Zare 2004)، نمونه‌های متعدد سنگ برای مقایسه با سنگ‌های موجود در مجموعه تخت‌جمشید جمع‌آوری شده است. روش‌شناسی این تحقیقات براساس مشاهدات سنگ‌نگاری مقاطع نازک از نمونه‌هایی بود که از سنگ‌های معادن واقع در کوه مجدآباد، کوه رحمت، کوه حسین، کوه گندشلو و سیوند گرفته شده بود (Guidi et al. 2017, 26). بر

این اساس، امروزه می‌دانیم که تنها دو نوع سنگ در تخت‌جمشید به‌کار رفته است: نوع اول یک سنگ بیوکلاستیک[۲۵] آهک‌دار به رنگ خاکستری روشن است؛ دومین سنگ حجم قابل توجهی آهک داشته و به رنگ خاکستری تیره (تقریباً سیاه) است که فشرده‌تر ولی دارای رگه‌های ظریف است. هر دوی آن‌ها سخت بوده ولی به‌راحتی پوسته‌پوسته می‌شوند؛ ازاین‌رو کار کردن با آن‌ها از سنگ سفید پاسارگاد دشوارتر است. سنگ آهک خاکستری روشن از معادن نه‌چندان دور از کوه‌های اطراف مرودشت و همچنین از گوشهٔ شمال غربی خود صفه گرفته شده است. سنگ آهک تیره از مجدآباد می‌آید؛ مکانی در چند ده کیلومتری غرب تخت‌جمشید (Tilia 1968; Zare 2004, 32). مهدی معتمدمنش از دیگر محققانی است که موضوع حمل مصالح ساختمانی در مسافت‌های طولانی توسط هخامنشیان را مورد توجه قرار داده است. پژوهش وی درخصوص نحوهٔ پوشش کاخ‌های هخامنشی به کاربرد رودخانه‌های دائمی منطقهٔ بین‌النهرین برای جابه‌جایی الوارهای عظیم در طی مسافت‌های چندصدکیلومتری اشاره دارد (Motamedmanesh 2018, 963-964).

همان‌طور که در بالا اشاره شد، محققان بسیاری در تلاش بوده‌اند تا نحوهٔ رویایی سازندگان باستان با چالش‌های تأمین مصالح مرغوب و حمل آن‌ها به محل ساختمان‌سازی را مورد بررسی قرار دهند. اما روش پژوهش، نقطهٔ توجه تحقیق و به‌ویژه حیطهٔ تخصصی محقق در این پژوهش‌ها، واگرا و پراکنده هستند. چنین مطالعاتی نمی‌توانند به‌راحتی در یک تحقیق جدید، که در آن براساس روش استدلال منطقی و تکیه بر استقرا برای تعمیم فرایندها کوشش می‌شود، مورد استفاده قرار گیرند. ازاین‌رو به‌رغم حجم قابل توجه مطالعات صورت‌گرفته در حوزهٔ معماری هخامنشی یا معادن باستانی آن‌ها، پاسخ بسیاری از پرسش‌ها هنوز در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. برای مثال، امروز نمی‌توان با قطعیت اعلام داشت که سازندگان آن عصر برای حمل مصالح خود در بخش‌های مختلف فرایند استخراج تا اجرا از چه روش‌ها و ابزارهایی استفاده کرده‌اند. پاسخ متقن به چنین پرسشی نیازمند برخورداری از یک روش تحقیق، و نیز توجه هم‌زمان محقق به متغیرهای تأثیرگذاری هستند که شناختشان برخورداری از دانش در حوزه‌های متفاوت همچون باستان‌شناسی، معماری و مهندسی مکانیک را می‌طلبد.

تحقیق حاضر یک پژوهش کاربردی و بین‌رشته‌ای است که محققان در جست‌وجوی پاسخ به سؤالات مطرح‌شدهٔ فوق هستند. بدین منظور، آن‌ها در ابتدا به گردآوری مطالب پراکندهٔ موجود می‌پردازند تا درک کاملی از نظریات محققانی که حمل بار در تمدن‌های کهن ازجمله هخامنشی را مطالعه کرده‌اند، به دست آورند. در مرحلهٔ بعد، از دریچهٔ مهندسی به چگونگی عملکرد هریک از روش‌های حمل بار پرداخته شده و سعی بر آن است تا فراتر از یک دیدگاهِ صرفاً نظری به انطباق این روش‌ها با شرایط واقعی هر سایت باستانی پرداخته شود. ازاین‌رو با بررسی شواهد تاریخی و ویژگی‌های جغرافیایی منحصربه‌فرد سایت‌های باستانی، رد یا تأیید کاربرد هریک از روش‌ها در تخت‌جمشید مورد توجه قرار می‌گیرد. این تحقیق برای تشریح فناورانهٔ ویژگی‌های ساختاری روش‌های متفاوت انتقال مصالح در عصر کهن تهیه گردیده و ازاین‌رو برای واشکافی و درک بهتر از روش‌های ساخت دیگر آثار تاریخی ایران نیز می‌تواند مورد استفاده واقع شود. همچنین آگاهی بهتر از این روش‌ها در کاوش‌های باستان‌شناسی نیز کاربرد خواهد داشت؛ چراکه با ایجاد شناخت نسبت به یکی از مؤلفه‌های مهم در ساخت‌پذیری، که بالطبع از ویژگی‌های تفکیک‌ناپذیر سایت‌های تاریخی است، توجه محقق کاوشگر را به جزئیاتی فرامی‌خواند که در نگاه اول ممکن است حائز اهمیت تلقی نشده و در لابه‌لای یافته‌های انبوه کاوش به بوتهٔ فراموشی سپرده شوند.

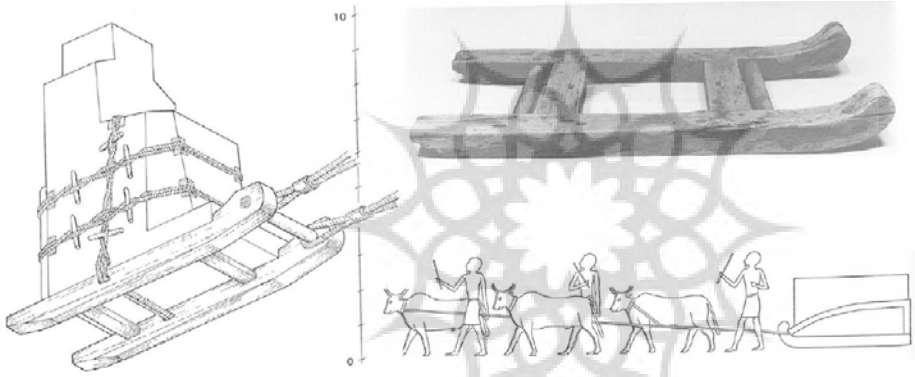
۲. انتقال بار در محور افقی، چالش‌ها و راهکارها

به‌رغم عدم دسترسی به مصالح مقاوم در برابر نیروهای ویرانگر و ماشین‌آلات پیشرفته، سازندگان باستانی روش‌های کاربردی را ابداع کردند که ازطریق آن بر مشکلات موجود در مسیر ساخت و به‌ویژه حمل‌ونقل فائق آیند. از معضلات موجود در مسیر حمل افقیِ بارها می‌توان به وزن بالای قطعات، دشواری‌های کنترل آن‌ها در دامنه‌های پرشیب، مسیرهای ناهموار و کم‌عرض، نیز آسیب دیدن ابزار حمل بار اشاره کرد. به‌طور کلی، هریک از روش‌ها و استراتژی‌های به‌کار برده‌شده توسط سازندگان باستانی دارای مزایا و معایب منحصربه‌فردی است که در انتخاب روش و ابزار مؤثر بوده است. ازاین‌رو در

انتقال عناصر معماری، متناسب با اندازهٔ قطعات، شرایط جغرافیایی و اقلیمی سایت، و نیز الزامات کاری استراتژی‌های معینی به کار گرفته می‌شد. نشانه‌های کاربرد این روش‌ها هنوز هم پس از سال‌ها روی آثار تاریخی دیده می‌شوند.

۲. ۱. ابزارهای ابتدایی برای غلبه بر نیروی گرانش و اصطکاک

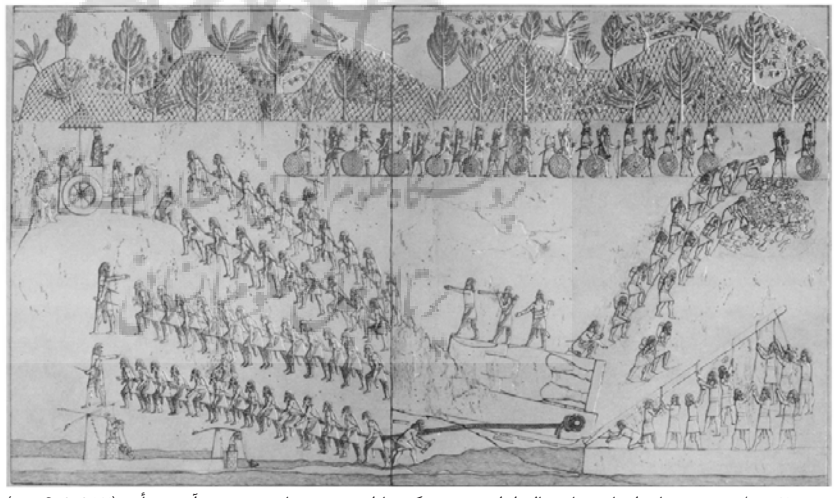
در پژوهش‌های مربوط به انتقال مصالح، تمدن مصر به‌عنوان یکی از اولین تمدن‌ها که به ساخت بناهای یادمانی با استفاده از عناصر عظیم‌الجثهٔ معماری می‌پرداخت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مصریان باستان در ثبت و مستندسازی روش‌های به‌کار گرفته‌شده در ساخت آثار خود دقت ویژه‌ای داشتند. تکنیک‌ها و ابزار حمل به‌کاررفته در ساخت مقابر باستانی برجای‌مانده از این تمدن که به‌صورت تصاویر هیروگلیف ثبت شده‌اند، از منابع موثق و حائز اهمیت برای باستان‌شناسان است. بر اساس این شواهد، در مصر باستان قطعات سنگی که بیش از حد بزرگ بوده و توسط انسان یا حیوانات بارکش (عمدتاً الاغ، نیز شتر از اواخر دورهٔ دودمانی نخست) قابل حمل نبودند، به‌وسیلهٔ ابزارآلات سادهٔ مکانیکی حمل می‌شدند. گروهی از ماشین‌آلات عظیم‌الجثه، مشابه سورتمه‌های[۲۶] چوبی امروزی (که طول آن‌ها تا ۹ متر بالغ می‌شد) (Wright 2005, 283) از اولین ابزارهایی بودند که توسط سازندگان مصری مورد استفاده قرار گرفتند (تصویر ۱).



تصویر ۱: نمونه‌ای از سورتمه‌های به‌کاررفته در حمل بارهای سنگین، مصر دوران پادشاهی میانه (۲۱۳۴ـ۱۶۹۰ق.م)
(Arnold 1991, fig. 6.36-6.39)

نیروی اصطکاک یکی از قوی‌ترین نیروهای موجود در طبیعت است که از دیرباز، مهندسان برای ساخت بناهای خود یا باید بر آن غلبه می‌کردند و یا آن را در جهت حل معضلات ساختمان به کار می‌گرفتند. ازنظر مکانیکی برای سهولت در جابه‌جایی بارها، نیروی اصطکاک میان جسم منقول و زمین باید کاهش یابد. هرچه سطوح صیقلی و صاف‌تر باشند، جسم راحت‌تر به حرکت درخواهد آمد. ازاین‌رو در تمدن‌های مختلف با توجه به شرایط توپوگرافی و جنس خاک شیوه‌های مختلف کاربرد داشت. در مصر باستان به‌دلیل وجود زمین‌های سست و با ظرفیت باربری محدود (Clarke and Engelbach 1930, 69-77) ابتدا سطح مسیر کوبیده می‌شد، سپس با استفاده از آب به متراکم کردن خاک می‌پرداختند. این عمل باعث افزایش پتانسیل باربری سطوح شده، سبب می‌شود بار با سهولت بیشتری در سطح افق به حرکت درآید. پس از فراهم آوردن شرایط مناسب جاده، قطعات عظیم سنگی را روی سورتمه‌هایی متشکل از تیرهای چوبی[۲۷] قرار می‌دادند و برای حفظ تعادل بار در مرکز سورتمه و جلوگیری از حرکات اضافی، ریسمانی به طرفین آن متصل می‌کردند. ریسمان‌های دیگری برای کشیدن بار به ابتدای سورتمه متصل می‌شد تا با کشیدن آن‌ها حرکت کنترل شود. غلتک‌های مدور چوبی[۲۸] که زیر سورتمه قرار می‌گرفتند، در کاهش اصطکاک و مدیریت انتقال مصالح اهمیت ویژه‌ای داشت. گروهی از کارگران وظیفهٔ جابه‌جایی این غلتک‌ها را بر عهده داشتند؛ به‌طوری‌که پس از عبور سورتمه از روی هر غلتک آن را در فاصله‌ای جلوتر، مجدداً مقابل سورتمه قرار می‌دادند. غلتک‌های چوبی دارای سطح مقطعی مدورند؛ به‌همین دلیل تنها روی زمین‌های کاملاً مسطح و سخت مؤثرند. ازآنجاکه امکان فراهم ساختن چنین شرایط محیطی در اطراف همهٔ معادن وجود نداشت، استفاده از آن محدودیت داشت (Harrell and Storemyr 2009, 30).

از دیگر ابزارآلاتی که برای سهولت در حرکت اولیهٔ سورتمه برای غلبه بر نیروی عظیم اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گرفت، اهرم[۲۹] بوده است. اهرم را می‌توان قدیمی‌ترین و ساده‌ترین ابزار برای کاهش نیروی لازم برای بلند کردن بارها معرفی کرد (Drachmann 1963, 203). این ماشین ساده شامل یک میله است که از سه قسمت بازوی محرک، بازوی مقاوم و تکیه‌گاه تشکیل می‌شود. مزیت مکانیکی اهرم که از نسبت طول بازوی محرک به طول بازوی مقاوم ($IMA = \frac{L_e}{L_r} IMA = \frac{L_e}{L_r}$) به دست می‌آید (Ibid, 66)، چرایی کارایی آن را نمایش می‌دهد. طبق این فرمول، با افزایش طول بازوی محرک و ثابت ماندن نیروی وارد بر جسم، مزیت مکانیکی افزایش یافته و می‌توان بارهای سنگین را در راستای عمودی اندکی حرکت داد و این‌گونه نیروی اصطکاک بین سطوح را کاهش داد. شواهد استفاده از اهرم برای حمل بار در تمدن‌های باستانی فراوان دیده می‌شود. برای مثال، آثار گرافیکی برجای‌مانده در کاخ خرساباد (تمدن آشور) نحوهٔ به‌کارگیری اهرم را نمایش می‌دهد. براساس این نقوش، عملیات حمل سنگ به کمک بردگان ازطریق اهرم کردن تیرکی بلند به قسمت زیرین مصالح شروع شده، آنگاه با استفاده از طناب‌هایی که از قبل به اهرم متصل شده بود، آن را به‌سمت زمین می‌کشیدند. با کشیدن طناب‌ها، نیرو به انتهای دیگر اهرم وارد شده و بار اندکی از زمین بلند می‌شود (Russell 1987, 522). در ادامه، گروه دیگری از کارگران که در مقابل سورتمه حضور داشتند، به‌وسیلهٔ طناب‌های متصل به ابتدای ارابه و به‌صورت هماهنگ با یکدیگر، بار را در مسیر افقی تعیین‌شده می‌کشیدند. محاسبات امروزی نشان می‌دهد برای جابه‌جایی بار در این روش، به‌ازای یک تن بار سه کارگر فعالیت می‌کردند (Wright 2005, 40). علاوه بر این دو گروه، دستهٔ دیگری از کارگران در بالای تخته‌سنگ ایستاده و به‌وسیلهٔ شیپور، کشیدن ارابه و حرکت اهرم را هماهنگ می‌کردند. کارگرانی که به‌وسیلهٔ اره، تبر، بیل و دیگر ابزارآلات راه‌سازی به آماده‌سازی مسیر می‌پرداختند نیز نقش مهمی در اجرای عملیات ایفا می‌کردند (تصویر ۲) (Russell 1987, 523). نکتهٔ حائز اهمیت آنکه تمدن آشور حدود یک‌هزاره بعد از تمدن مصر، دقیقاً همان روشی را به کار می‌گیرد که پیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته بود (Arnold 1991, 279).

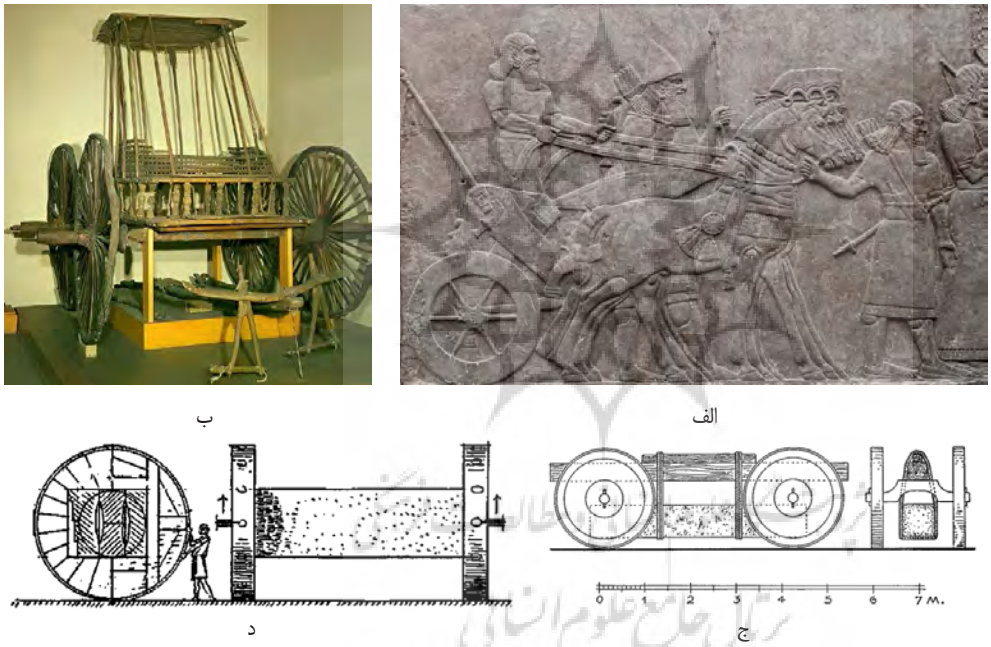


تصویر ۲: حمل مجسمه‌های انسان–جانور بال‌دار از جنس سنگ خارا به وزن ده‌ها تن در عصر آشور متأخر (۹۱۲–۶۰۹ ق.م)، محل نگهداری موزهٔ بریتانیا (Russell 1987, fig. 7)

۲.۲. ماشین‌آلات متکی بر چرخ

همان‌طور که در بالا اشاره شد، استفاده از ابزارهایی که نیروی اصطکاک را به حداقل می‌رساندند، گام مؤثری در جابه‌جایی مصالح محسوب می‌گردید. چرخ[۳۰] یکی از ابزارهایی است که با کاهش این نیرو باعث سهولت در حرکت اجسام می‌شود. شواهد باستانی نشان از آن دارند که مصریان از ابتدای دورهٔ آغازین دودمانی (۲۸۶۶–۳۱۵۰ ق.م) دربارهٔ

چرخ می‌دانستند، اما تا اوایل عصر پادشاهی جدید (۱۰۶۹ـ۱۵۴۹ق.م) آثار و قراین مربوط به بهره‌گیری از چرخ در حمل بار در این سرزمین یافت نشده است (Harrell and Storemyr 2009, 32). ازاین‌رو اظهارنظر دربارهٔ استفاده از ماشین‌آلات چرخ‌دار برای جابه‌جایی افقی بارها تا پیش از این دوره ممکن نیست. یکی از مهم‌ترین عواملی که استفاده از چرخ را تحت‌تأثیر قرار می‌داد، وجود جاده‌های مناسب و همواری است که در آن‌ها ماشین‌آلات چرخ‌دار به‌راحتی حرکت کنند. در زمین‌های سست کنار بستر رودخانه‌ها یا در جاده‌های باریک کوهستانی به‌دلیل فرو رفتن چرخ در شن و یا برخورد چرخ با سنگ و اجسام سخت، امکان آسیب افزایش می‌یافت. ازاین‌رو شسته شدن و فرسایش جاده‌ها از دغدغه‌های سازندگان باستانی بود که باید تمهیداتی برای غلبه بر آن می‌یافتند. در تمدن‌های متأخر، با توسعهٔ شبکهٔ راه‌های قابل اتکا و حل معضلات فوقِ امکان استفاده از چرخ در جابه‌جایی‌های افقی مصالح سنگین تسهیل شد. یونانیان ازجمله تمدن‌هایی بودند که احتمالاً در اوایل دورهٔ بطلمیوسی (۳۰۵ق.م) از چرخ برای حمل عناصر غول‌پیکر معماری بهره بردند. بعدها در دورهٔ رومی‌ها واگن‌های چرخ‌دار که توسط حیوانات بارکش کشیده می‌شد، وسیلهٔ اصلی حمل‌ونقل زمینی برای انتقال مصالحی چون سنگ بود (Ibid, 32).



تصویر ۳: نمونه ابزارهای حمل بار متکی بر چرخ در تمدن‌های باستان: الف. تمدن آشور که بعدها به تابعیت هخامنشیان درآمد؛ ب. تمدن پازیریک یا سکاها که متأثر از تمدن هخامنشی بود (وب‌سایت موزهٔ ارمیتاژ)؛ ج. حمل بار به‌وسیلهٔ چهارچرخ در یونان باستان؛ د. حمل بار به‌وسیلهٔ دو چرخ در یونان باستان (Wright 2005, fig. 75-76)

به‌طور کلی، حمل مصالح با کمک چرخ به دو شیوهٔ اصلی انجام می‌گرفت. در روش اول، ماشین‌آلاتی مشابه ارابه‌های چهارچرخ اولیه کاربرد داشت؛ عناصر سنگی به‌صورت آویزان از محور مرکزی چنین ابزاری قرار گرفته و این‌گونه امکان جابه‌جایی قطعات با طول زیاد فراهم می‌شد. نیروی کارگران یا حیوانات بارکش برای کشیدن این مجموعه در طول مسیر مورد استفاده قرار می‌گرفت (تصویر ۳، ج). در روش دوم، عناصر سنگی به‌عنوان محور یک ماشین ساده عمل کرده و با اتصال چرخ در دو انتهای هر قطعه حرکت امکان‌پذیر می‌شد. با وارد کردن نیرو به این مجموعه، بلوک سنگی در مسیر پیش رو انتقال داده می‌شد (تصویر ۳، د). از مزایای روش اول، سهولت کنترل و تغییر جهت حمل بار به‌واسطهٔ وجود چهارچرخ، و امکان بهره‌گیری از گذرگاه‌های باریک برای انتقال قطعات سنگی با طول زیاد است. ازسوی دیگر، احتمال آسیب به تعداد

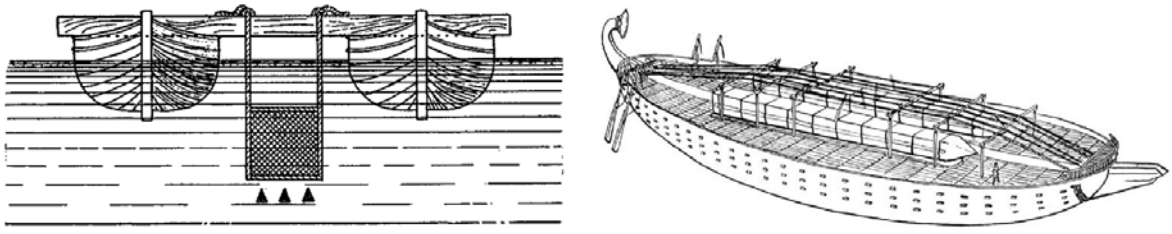
چهارچرخ بیشتر بوده و دقت بالاتری را در عملیات انتقال می‌طلبید. عدم امکان جابه‌جایی بارهای با طول زیاد که استفاده از گذرگاه‌های عریض را الزامی می‌کرد، ازجمله معایب روش دوم است. نحوهٔ اتصال این تک‌محور به عوامل بارکش، نیز دشوار بودن کنترل سرعت این مجموعه در گذرگاه‌هایی با شیب زیاد، از دیگر چالش‌های کاربرد این روش بوده است.

۲. ۳. حمل بارهای سنگین با تکیه بر نیروی آب

به‌رغم تمام مزیت‌های مکانیکی که استفاده از چرخ برای سازندگان تاریخی به ارمغان می‌آورد، مشکلات حمل بار در جاده‌های نامناسبی که به‌دلیل سستی زیرساخت امکان بارگذاری بارهای سنگین را نداشتند، کماکان پابرجا بود. یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکلات بهره‌گیری از نیروها و امکانات موجود در طبیعت مانند مسیرهای آبی و نیروی شناوری سیالات بوده است. این موضوع به توسعهٔ انواع شناورهای حمل بار منجر گردید. برای درک چگونگی کاربرد سیالات در حمل مصالح درک صحیحی از نیروی شناوری[۳۱] (نیروی ارشمیدوس) اهمیت دارد. این نیرو از فرمول $F_b = \rho g V$ قابل محاسبه است. هنگامی که نیروی ارشمیدس بیشتر از نیروی وزن باشد، جسم روی سطح سیال شناور مانده و وقتی نیروی وزن جسم بیشتر از نیروی ارشمیدس باشد، جسم درون سیال فرومی‌رود (اصفهانیان ۱۳۹۶، ۷۹). به‌رغم آنکه سازندگان عهد باستان از اصول نظری نیروی شناوری آگاه نبودند، با کمک تجربه، از این اصل در ساخت قایق‌های حمل بار بهره بردند.

استفاده از شناور در تمدن‌های باستانی که در کنار منابع آبی دائم ساکن بودند آغاز شد. زندگی در کنار چنین منابعی، یکی از شروط اصلی برای ایجاد تمدن در دنیای کهن بود. در مصر (به‌دلیل وجود رود نیل) و منطقهٔ بین‌النهرین (به‌دلیل وجود دجله و فرات) نه‌تنها وجود آب به رونق کشاورزی و تجارت کمک می‌کرد، بلکه در ساخت‌وساز نیز مورد استفاده قرار می‌گرفت. از قدیمی‌ترین شواهد بهره‌گیری از قایق در مصر نقاشی‌های برجای‌مانده روی گل و سفال است که قدمت آن‌ها به سه تا پنج هزار سال قبل از میلاد می‌رسد. مصریان از قایق برای جابه‌جایی سربازان و تجهیزات نظامی نیز بهره می‌بردند و این موضوع سبب ایجاد تجربیات ارزشمندی در به‌کارگیری سیالات شد. از دوران پادشاهی کهن که ساخت‌وسازهای عظیم مقیاس همچون ابلیسک‌های غول‌پیکر مورد توجه قرار گرفتند (Clarke and Engelbach 1930, 34)، حمل مصالح از معدن به محل پروژه به‌وسیلهٔ قایق‌های بسیار بزرگ[۳۲] انجام می‌شد. از قراین باستانی موجود می‌توان به نقش‌برجستهٔ باقی‌مانده روی دیوار معبد حتشپسوت در دیرالبحری اشاره کرد که جزئیات این قایق‌ها را به تصویر کشیده است (Partridge 1996, 379).

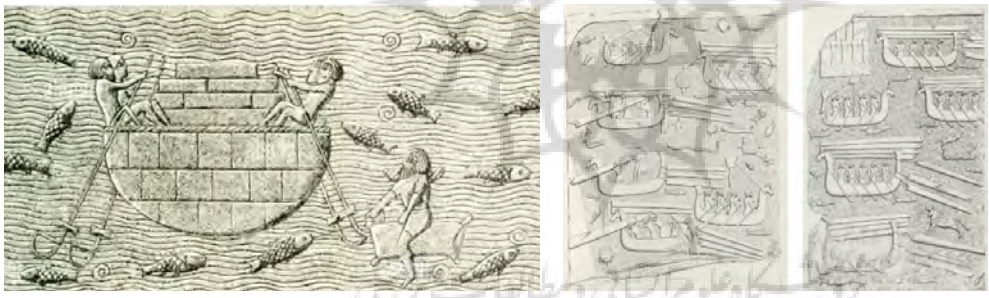
عمدتاً دو روش برای انتقال بار به‌وسیلهٔ قایق در تمدن مصر کاربرد داشت؛ در روش اول، سازندگان قایق‌های بزرگی را آماده و مصالح سنگی به‌طور کامل درون این قایق‌ها قرار می‌گرفت. ابلیسک بازمانده از معبد حتشپسوت به ارتفاع ۲۹٫۶ متر و وزنی حدود ۳۲۳ تن (که یکی از بزرگ‌ترین ابلیسک‌هایی است که تاکنون ساخته شده) به‌وسیلهٔ چنین شناورهایی حمل گردید. چنین قایق‌های غول‌پیکری بیش از ۹۵ متر طول و ۳۲ متر عرض داشت و تا ۷۳۰۰ تن بار به‌وسیلهٔ آن‌ها حمل می‌شد (تصویر ۴، الف) (Ibid). در روش دیگر، دو قایق کوچک در فاصلهٔ چندمتری از یکدیگر قرار گرفته و به‌منظور تثبیت فاصلهٔ بین آن‌ها تیر چوبی مستحکمی میانشان قرار می‌گرفت. عناصر ساختمانی ازطریق طناب به تیر چوبی حدفاصل متصل و در آب غوطه‌ور می‌شدند. این‌گونه با صرف نیروی به‌مراتب کمتری در قیاس با حمل زمینی، امکان جابه‌جایی در طول مسیر آب ایجاد می‌شد (تصویر ۴، ب). در روش اول با توجه به اینکه جرم عناصری که باید جابه‌جا می‌شدند، به‌طور کامل در وسیلهٔ شناور قرار می‌گرفت، امکان حفاظت در برابر شرایط نامساعد جوّی مانند طوفان به‌نحو مؤثرتری فراهم می‌شد. ازاین‌رو این روش برای یک حمل‌ونقل مطمئن در فواصل طولانی کاربرد داشت. با در نظر گرفتن هزینه‌های گزاف مالی و زمانی ساخت شناورهای عظیم، سازندگان از روش دوم در مسافت‌های کوتاه میان معدن تا محل پروژه بهره می‌جستند. به‌رغم کاهش هزینه‌ها در این روش، به‌دلیل احتمال شکستگی الوار چوبی حدفاصل، ظرفیت باربری با محدودیت مواجه بود و بهره‌گیری از الوار با مقاومت بالا را ضروری می‌ساخت که تهیهٔ آن در سرزمین‌های خالی از درختان ستبر چالش‌برانگیز بود. از دیگر خطرات روش فوق، آسیب دیدن یا شکستن قطعات شناور به‌دلیل برخورد با موانع درون آب بوده است.



الف ب

تصویر ۴: الف. حمل مصالح ازطریق قرار گرفتن در قایق، عصر پادشاهی جدید مصر (۱۵۵۰ـ۱۰۶۹ق.م)؛ ب. حمل مصالح ازطریق شناور ماندن در بین دو قایق کوچک (Wright 2005, fig. 78; Partridge 1996, fig. 20.5)

آشوریان نیز برای حمل مصالح ساختمانی، از مسیرهای آبی بهره گرفتند. از شواهد این امر می‌توان به نقش‌برجسته‌های باقی‌مانده از کاخ خرساباد که امروزه در موزهٔ بریتانیا[۳۳] و لوور[۳۴] نگهداری می‌شوند، اشاره کرد (تصویر ۵). این آثار نه‌تنها انواع متفاوتی از شناورهای حمل بار را به تصویر کشیده‌اند، بلکه درخصوص تنوع روش‌های حمل بار در مسیرهای آبی، اطلاعات باارزشی ارائه می‌دهند. برای مثال، آشوریان برای حمل الوارهای چوبی، آن‌ها را ابتدا دسته‌بندی و روی آب شناور می‌ساختند، سپس به کمک ریسمان‌های مستحکم، الوارها را به قایق‌های کوچکی متصل، و در طول مسیر آبی هدایت می‌نمودند (تصویر ۵، الف). در عصر آشور، به‌رغم استفاده از شناورهایی با الگویی متفاوت از مصر (که احتمالاً ریشه در مصالح چوبی در اختیار این تمدن و نیز نیاز به عبور از جریان‌های آبی متفاوت دارد)، الگوی حمل مصالح تقریباً مشابه باقی می‌ماند (تصویر ۵، ب).



الف ب

تصویر ۵: الف. نقش‌برجسته، نحوهٔ حمل چوب از راه آب، باقی‌مانده از کاخ خرساباد، محل نگهداری موزهٔ لوور؛ ب. نقش‌برجسته مربوط به نحوهٔ حمل قطعات سنگی به‌وسیلهٔ قایق، محل نگهداری موزهٔ بریتانیا (Russell 1987, fig. 17) (Public domain)

۳. انتقال بارهای سنگین در محور قائم؛ چالش‌ها و راهکارها

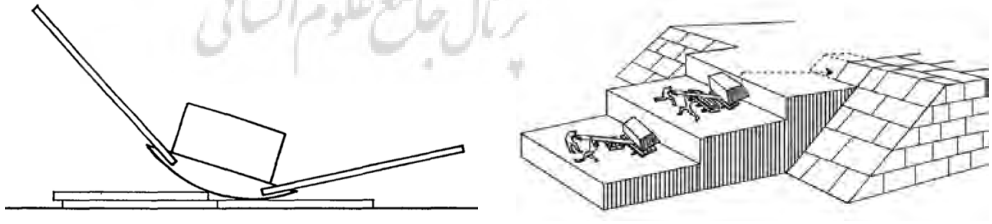
با در نظر گرفتن ابزارهای ساختمانی محدودی که در اختیار سازندگان باستانی قرار داشت، کاربرد قطعات عظیم‌الجثه در بناهای مرتفع، یادآور لزوم توجه به یافتن راه‌حل‌های کاربردی برای انتقال مطمئن عناصر ساختمانی در محور قائم است. در مواجهه با این چالش‌ها، مهندسین با توجه به ویژگی‌های خاص هر پروژه (ابعاد عناصر معماری، مقیاس بنا، شرایط و الزامات محلی) استراتژی متفاوتی را اتخاذ می‌کردند. استفاده از سطوح شیب‌دار و تراسه‌بندی در زمرهٔ روش‌های ساده‌تر، و بهره‌گیری از سیستم‌های متکی به قرقره، به‌عنوان استراتژی‌های پیشرفته کاربرد داشتند. هریک از تکنیک‌های به‌کار گرفته‌شده دارای مزایا و معایب خاص خود هستند که امروزه در بازشناسی کاربرد آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳. ۱. سطح شیب‌دار[۳۵]

قبل از توسعهٔ ماشین‌های متکی به قرقره و طناب[۳۶] تنها روش عملی برای بالا بردن بلوک‌های ساختمانی و قرار دادن

آن‌ها در جای خود ازطریق کشیدن روی سطوح شیب‌دار بود (Wright 2005, 85). مزیت مکانیکی یک سطح شیب‌دار از نسبت طول سطح شیب‌دار به ارتفاع آن از سطح زمین محاسبه می‌شود؛ یعنی: $IMA = \frac{L}{h}$. از اولین ملت‌هایی که از سطح شیب‌دار برای جابه‌جایی عناصر سنگین و عظیم بهره گرفت، می‌توان به مصریان اشاره داشت. نبود فناوری جرثقیل از یک‌سو، و در دسترس بودن نیروی کار غیرماهر فراوان ازسوی دیگر، سازندگان مصری را ترغیب می‌کرد تا از روش‌های ساده‌تر همچون رمپ‌های خاکی در پروژه‌های خود استفاده کنند (Coulton 1974, 11). مزیت‌های این روش موجب شد تا به‌مدت هزاران سال و در ساخت بناهای متعدد و با سیستم‌های سازه‌ای مختلف از آن استفاده شود. برای مثال، محققان امروزه بر این باورند که کاربرد سطوح شیب‌دار در ساخت اهرام ثلاثه سبب شد تا سازندگان بتوانند قطعاتی به وزن ده‌ها تن را تا ارتفاع ۱۵۰ متر از زمین بالا ببرند. با پیشرفت پروژه، سازندگان ضمن حفظ شیب تقریبی ۱۰ درصد، طول رمپ‌ها را افزایش داده و بر مقاومتشان می‌افزودند (Arnold 1991, 98-108). به‌ترتیبی مشابه و در همسایگی جغرافیایی مصر، در جبههٔ جنوبی معبد مشتری در بعلبک لبنان (شروع ساخت از اواسط قرن اول میلادی) برای بالا بردن ابرسنگ‌هایی به وزن حدودی ۱۰۰ تن و مستقر کردن آن‌ها در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین از سطح شیب‌دار کمک گرفته شد (Bessac 2010, 181-182).

گونهٔ پیشرفته‌تر کاربرد سطح شیب‌دار را تراسه‌بندی می‌نامند. یکی از مزیت‌های استفاده از تراسه‌بندی، پرهیز از ساخت سطوح شیب‌دار طولانی است که مستلزم زمان و هزینه برای ساخت می‌باشد. بدین منظور در مجاورت محلی که نقطهٔ نهایی قرارگیری جسم روی ارتفاع است، پلکانی احداث می‌کردند و ارتفاع آن را به‌نحوی در نظر می‌گرفتند که امکان حمل بار از یک سکو به سکوی دیگر، به‌راحتی با استفاده از ماشین‌های ابتدایی همانند الاکلنگ فراهم باشد. نکتهٔ قابل توجه اینکه برای جلوگیری از برخورد ابزار بالابر با پیشانی پلکان باید این ابزارآلات عمود بر سکو و در فاصلهٔ مناسب از آن قرار داده شوند (تصویر ۶، الف). ابزار دیگری که برای جابه‌جایی بار روی سطوح پلکانی کوتاه (به‌ویژه در تمدن مصر) کاربرد داشت، ماشینی ساده مشابه گهواره[۳۷] با انتهای منحنی‌شکل بود (تصویر ۶، ب). به کمک نیروی اهرم، این ابزار امکان بالا بردن مصالح ساختمانی تا ارتفاع بسیار محدود را میسر می‌کرد. در این روش، ابتدا عناصر ساختمانی در قسمت میانی ماشین قرار گرفته، سپس هم‌زمان با حرکت گهواره‌ای به‌سمت جلو و عقب، و با قرار دادن قطعات چوبی در زیر قسمت منحنی می‌توان بار را به‌تدریج در جهت عمودی بالا آورد (Coulton 1974, 11). در مقایسه با این روش، استراتژی اول امکان حمل بار تا ارتفاع بالاتری را مهیا می‌سازد، اما به‌دلیل انتقال بار در راستای کاملاً عمود بر سطح نیروی بیشتری نیز مورد نیاز خواهد بود. یکی از نکاتی که در کاربردی بودن سطوح شیب‌دار در پروژه‌های معماری تأثیر می‌گذارد، میزان احجام پر و خالی ساختمانی است؛ به‌نحوی‌که چیدمان عناصر معماری و فواصل آن‌ها از یکدیگر امکان برپایی این سطوح و به‌ویژه جابه‌جایی قطعات بدون ایجاد خطر تخریب بخش‌های پیش‌تر ساخته‌شده را فراهم آورد.



الف ب

تصویر ۶: الف. تراسه‌بندی؛ ب. ابزار گهواره‌ای‌شکل (Coulton 1974, fig. 6)

۳. ۲. سیستم قرقره و طناب

قرقرهٔ متحرک سیستمی متشکل از تعدادی قرقره و طناب واسطی است که آن‌ها را به یکدیگر متصل کرده و شکل ابتدایی از جرثقیل‌های پرکاربرد امروزی را تشکیل می‌دهد. در این سیستم، نیرویی را که ماشین به جسم وارد می‌کند، نیروی مقاوم، و نیرویی که برای بالا بردن جسم به کار می‌رود، نیروی محرک نامیده می‌شود. مزیت مکانیکی آن با فرمول زیر قابل محاسبه است: نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک. تعداد طناب‌هایی که در بالا بردن بار سهیم هستند، نشان‌دهندهٔ

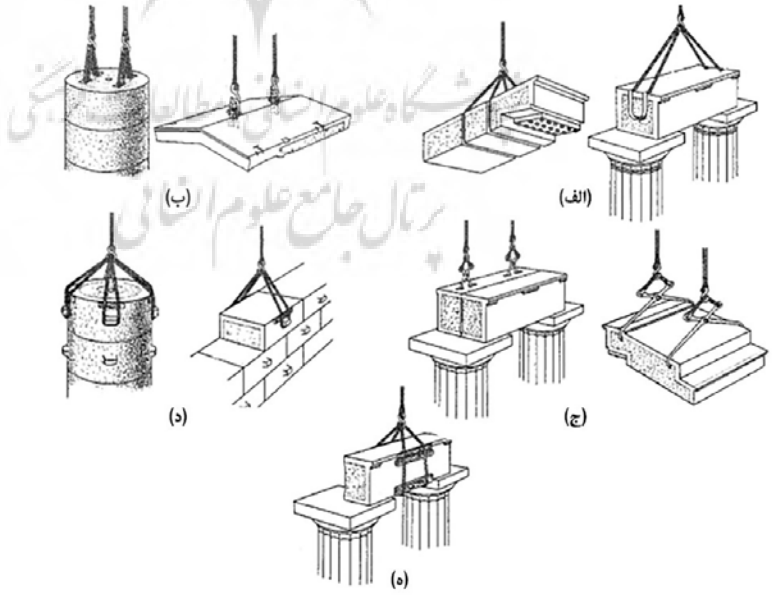
مزیت مکانیکی سیستم قرقره است (Wright 2009, 77). این ماشین ساده که توان افزایش نیرویی به میزان چند برابر نیروی واردهٔ ابتدایی را دارد، جابه‌جایی عناصر بسیار سنگین را مهیا می‌کند. با ترکیب قرقره‌ها و افزایش واسطه‌ها می‌توان مزیت مکانیکی سیستم را افزایش داد (Drachmann 1963, 54). برای مثال، سیستمی شامل سه قرقره دارای مزیت مکانیکی ۳ به ۱ است؛ یعنی با ۱ کیلوگرم نیرو می‌توان ۳ کیلوگرم بار را جابه‌جا کرد.

نوشتن تاریخچهٔ مختصری از این ماشین بدون مراجعه به مطالعات اخیر صورت‌گرفته توسط پیراتینی، مورخ فناوری معماری در یونان و روم باستان، غیرممکن می‌نماید. از دیدگاه وی، پیشینهٔ بالابرهای پیشرفته به نمونه‌های ابتدایی بدون وینچ که شادوف نامیده می‌شوند، بازمی‌گردد. این ابزار در اوایل عصر برنز (۳۵۰۰ـ۱۲۰۰ق.م) در مصر، و در یونان از سدهٔ دهم قبل از میلاد مورد استفاده قرار می‌گرفت. این بالابر در انتقال آب مورد مصرف در کشاورزی در مصر، بابل و آشور کاربرد فراوان یافت (فرشاد ۱۳۷۶، ۷۸). با اشاره به مطالعات محققان پیش از خود، پیراتینی تاریخچهٔ استفاده از قرقره‌های ساده در تمدن مصر (Arnold 1991) و آشور (Drachmann 1963) را حداقل به قرن نهم قبل از میلاد نسبت داده، و ازاین‌رو گسترش فناوری جرثقیل را تا اواخر قرن ششم قبل از میلاد ممکن می‌داند (Pierattini 2018, 1057-1058). شواهد غیرقابل انکاری از بهره‌گیری از دانش مکانیکی سیستم‌های قرقرهٔ مرکب در اواخر قرن هفتم پیش از میلاد موجود است. به‌طور کلی، ازنظر اکثر محققان، تاریخ فناوری ربع آخر قرن ششم قبل از میلاد (۵۷۵ـ۵۹۹ ق.م) به‌عنوان تاریخ متقنی برای اختراع جرثقیل و قرقرهٔ مرکب دانسته می‌شود (Coulton 1974, 17). از نمونه‌های ارزنده‌ای که استفاده از این سیستم را نمایش می‌دهد، معبد مشتری در لبنان است که در ساخت آن، سازندگان دوران باستان برای بالا بردن قطعات سنگی با وزن ۳۰ تا ۵۰ تن از وینچ و چرخ‌دنده[۳۸] بهره برده‌اند (Bessac 2016, 186). هماهنگی مهندسین، و دقت در نصب این قطعات به‌وسیلهٔ جرثقیل قابل توجه است.

حتی امروز نیز آثار برجای‌مانده از تمدن‌های باستان، در شناسایی جزئیات مربوط به حمل مصالح با استفاده از جرثقیل کاربرد دارند. این شواهد حجاری‌شده به‌صورت شیار، حفره و یا برجستگی روی عناصر ساختمانی سنگی قابل مشاهده است. پژوهش‌های پیراتینی درخصوص کاربرد جرثقیل در تمدن یونان، جزئیات اجرای این روش‌ها را تا حدودی روشن ساخته است. برای مثال، او با ارزیابی ابعاد و وزن بلوک‌های سنگ معبد ایسمیا[۳۹] (۶۵۰ـ۶۹۰ق.م)، بررسی عمق شیارهای حکاکی‌شده، نیز ضخامت و استحکام طناب‌های به‌کاررفته، به کاربرد ماشین‌آلات مخصوص جابه‌جایی بار اذعان نموده است (Pierattini 2018, 1054). براساس این شواهد، این شیارها به‌صورت خطوط ممتد دورتادور سنگ تراشیده شده و بدین‌ترتیب امکان آویزان شدن قطعات سنگی از طناب فراهم می‌گردید. نوع دیگری از این شیارها به‌شکل حرف U بوده و به‌صورت متقارن در دو سمت بلوک سنگی تراشیده می‌شد (تصویر ۷، الف). این شیارها کاربرد جرثقیل‌های اولیه در بالا بردن مصالح را تأیید می‌کند. شواهدی ازاین‌دست در بنای معبد آتنا در اسوس[۴۰] و اولین معبد هرا در پستوم[۴۱] (۵۱۵ ق.م) نیز موجود است که پیشرفت کاربرد جرثقیل‌ها را نمایش می‌دهد (Coulton 1974, 16). ایجاد حفره‌هایی با عمق محدود در دل عنصر سنگی، روش دیگری برای برقراری اتصال موقت میان سنگ و ریسمان بوده است. با حفر کانال‌هایی در قسمت فوقانی بلوک‌ها امکان عبور بدون واسطهٔ ریسمان از این حفره‌ها فراهم می‌گردید. روش دیگر عبور ابزار دم‌فاخته‌ای[۴۲] از حفره‌های تعبیه‌شده در قطعات سنگی و اتصال آن به ریسمان است (تصویر ۷، ب). نکتهٔ قابل توجه درخصوص حفره‌های مورد نیاز برای روش‌های فوق، بحث تقارن برای توزیع متعادل نیروهای گرانشی است که از واژگونی قطعه در حین انتقال ممانعت می‌کند. درخصوص حجاری‌هایی که رعایت این اصل در جانمایی آن‌ها دیده نمی‌شود، می‌توان تصور کرد که یا قطعات مزبور قرار نبوده به ترازهای بالای ارتفاعی از بنا انتقال داده شوند، و یا حفرات مورد نظر کاربردهای دیگر (مثلاً اتصال به اهرم چوبی) داشته‌اند (Coulton 1974, 2). انبر[۴۳] ابزار دیگری است که با قفل شدن در حفره‌های تعبیه‌شده در بخش‌های جانبی یا فوقانی قطعات سنگی امکان انتقال عمودی را میسر می‌سازد (تصویر ۷، ج). زایده‌های[۴۴] روی بلوک‌های سنگی نیز می‌توانند محلی برای عبور حلقه‌های طناب باشند تا امکان آویزان شدن از بالابر فراهم گردد (تصویر ۷، د). نکتهٔ حائز اهمیت اینکه باید میان چنین زائده‌های کوچک و نامتقارن، و آن دسته از برجستگی‌های تراشیده‌شده روی عناصر سنگی افقی که از روش‌های تزیینی متداول در دوران باستان است، تمایز قائل شویم. محل قرارگیری این زائده‌ها

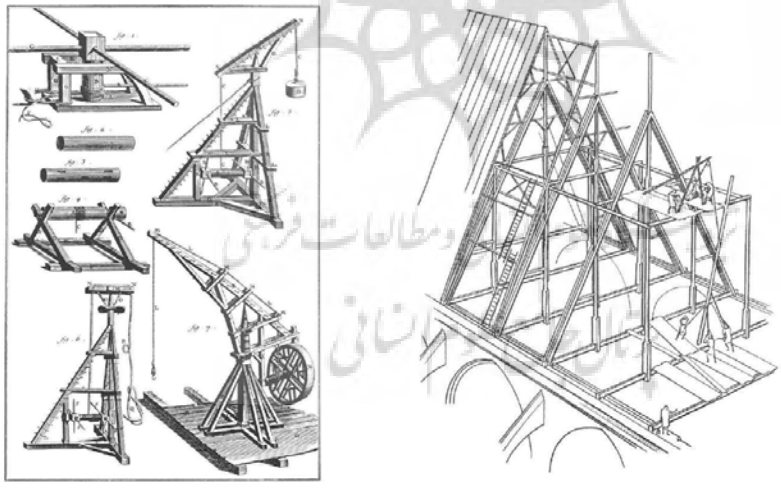
در شناسایی نقش سازه‌ای آن‌ها می‌تواند مؤثر باشد. آن‌هایی که محلی برای اتصال طناب‌های جرثقیل بودند، الزاماً روی نقاطی از بلوک تراشیده می‌شدند که نقطهٔ تعلیق بالاتر از مرکز ثقل جسم قرار گرفته و به‌این‌ترتیب هنگام بالا بردن مصالح با برقراری تعادل از سقوطشان جلوگیری شود (Ibid, 5). از روش‌های ساده و به نسبت سریع‌تر اتصال قطعات، می‌توان به بستن طناب به دور قطعات سنگی اشاره کرد. این طناب‌ها باید به‌گونه‌ای در مرکز ثقل جسم مهار شوند که با حفظ تعادل نیروهای وارده از واژگونی بار در حین انتقال اجتناب شود. برای جلوگیری از آسیب دیدن قطعات سنگی تراشه‌های چوب در محل برخورد با طناب قرار داده می‌شد (تصویر ۷، ه). نباید فراموش کرد که تأمین ریسمان‌هایی با طول و ضخامت مناسب در اجرایی شدن همهٔ روش‌های فوق‌الذکر اهمیت دارد.

هریک از روش‌های اتصال فوق‌الذکر دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص خود هستند که بر تمایل سازندگان در استفاده از آن‌ها تأثیرگذار بوده است. برای مثال، ایجاد شیارهای سرتاسری و Uشکل اگرچه ایمنی لازم برای انتقال عمودی قطعات سنگین را فراهم می‌آورد، کاربرد آن مستلزم صرف انرژی و زمان زیادی برای کار بر روی سنگ بود. ازسوی دیگر، این شیارها می‌توانستند باعث ایجاد جلوهٔ نامناسب در نمای ساختمان شوند، یا امکان ورود رطوبت به داخل بافت سنگ را تسریع نمایند که درنهایت، در کیفیت اثر معماری تأثیر منفی داشت. از این دیدگاه، استفاده از انبر که تنها مستلزم تعبیهٔ حفره‌های محدودی در سطح بلوک سنگی است، برتری نسبی پیدا می‌کرد و درخصوص قطعات سنگی مورد استفاده در محل‌هایی که در معرض دید مستقیم بیننده قرار داشت، مناسب بوده است. درعین‌حال، با در نظر گرفتن کیفیت آلیاژهای آهنی در عصر باستان، شکستن انبرها و واژگون شدن قطعات سنگین سنگی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. آویزان ساختن قطعات عظیم‌الجثه به‌وسیلهٔ ریسمان از زائده‌های بیرون‌زده از سنگ را می‌توان به‌عنوان روشی نسبتاً مطمئن و درعین‌حال سریع و ارزان جهت انتقال بار تلقی کرد. بااین‌حال چگونگی جانمایی صحیح طناب‌ها در پیرامون یک عنصر با فرم معماری نامتقارن می‌توانست با پیچیدگی‌های فنی همراه باشد. همچنین، درصورتی‌که چنین زائده‌هایی در عناصر نمای ساختمان به کار می‌رفتند، نیاز به تراشیده شدن در محل نصب را داشتند که استفاده از نیروی کار ماهر را اجتناب‌ناپذیر می‌ساخت. به‌طور کلی، وزن و ابعاد قطعات سنگی، ابزار و نیروی کار در اختیار، محلی که باید قطعات اجرا می‌شدند، ارتفاع قابل حمل تا محل مورد نظر، و به‌ویژه جنس سنگ در انتخاب شیوهٔ اتصال توسط سازندگان باستانی مؤثر می‌افتاد.



تصویر ۷: گونه‌شناسی نحوهٔ اتصال بلوک‌های سنگی به ریسمان بالابر (Wright 2005, fig. 93)

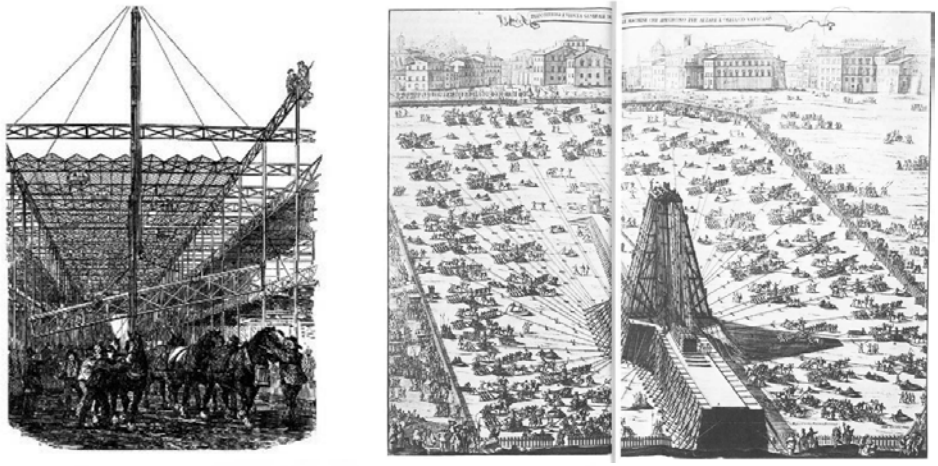
پس از انتخاب روش مناسب برای اتصال قطعات به ریسمان، فرایند حمل به کمک ابزارآلات مخصوصی که جابه‌جایی تا ارتفاع عمودی مورد نیاز را تأمین کند، انجام می‌پذیرفت. روند توسعهٔ ابزارهای حمل بار را فیچن به‌خوبی بیان کرده است (Fitchen 1986). از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین این ابزارها سه‌پایهٔ بالابر[۴۵] است: ابزاری شامل سه تیر به طول ۳/۶ تا ۴/۵ متر که به‌صورت همگرا به یکدیگر متصل می‌شدند. برای برپا کردن این ماشین، ابتدا پایه‌های اصلی با فاصله از یکدیگر روی قسمت‌های مستحکم بنا و در ارتفاع مناسب ثابت شده، سپس در قسمت فوقانی به یکدیگر وصل می‌شدند تا یک قاب فضایی مثلثی‌شکل ایجاد شود (تصویر ۸، الف). قرقره و ریسمان از این سیستم آویزان شده و برای انتقال بارها تا ارتفاع نصب ماشین مورد استفاده قرار می‌گرفت. اگرچه سه‌پایهٔ بالابر از زمان‌های بسیار قدیم استفاده می‌شد، محدودیت‌های کاربرد آن منجر به توسعهٔ دیگر ماشین‌های بالابر بار گردید. علاوه بر اینکه حمل عناصر ساختمانی به‌وسیلهٔ این ابزار محدود به حرکت در محور عمودی و بدون هیچ‌گونه انعطاف‌پذیری در راستای افق بود، محدودیت ارتفاع در حمل مصالح نیز به چالش‌های کار با آن می‌افزود. ازطرف دیگر، به‌دلیل نصب این ماشین در ارتفاع و یا روی تکیه‌گاه‌های با سطح اتکای اندک، بالابر همواره با خطر سقوط در اثر عوامل اقلیمی یا اشتباهات انسانی روبه‌رو بود. جرثقیل[۴۶] از ماشین‌آلاتی است که برای غلبه بر این مشکلات کاربرد پیدا کرد. جرثقیل عموماً روی سطح زمین برپا و از تیرهای عمودی چوبی تشکیل می‌شود که در قسمت فوقانی بازویی افقی به آن متصل است. نوعی از آن به شکل L معکوس است که قرقره‌ای به انتهای آزاد آن متصل و طناب از میان آن عبور می‌یافت. نوع متداول دیگر جرثقیل T شکل است که در آن طناب از قرقره‌ای در یک انتهای آزاد بازوی متقاطع جرثقیل عبور کرده و به قرقرهٔ دوم در انتهای آزاد دیگر متصل می‌شود (تصویر ۸، ب). اگرچه ساخت جرثقیل در مقایسه با سه‌پایهٔ بالابر پیچیده و پرهزینه است، به‌دلیل مکانیزم سه‌بعدی آن در برابر بارهای جانبی و ثقلی مقاومت بیشتری از خود نشان داده و در صورت کاربرد مصالح مناسب،کاربرد آن در ساخت بناهای مرتفع‌تر امکان‌پذیر می‌شود (Ibid, 92-94).



الف ب

تصویر ۸: الف. سه‌پایهٔ بالابر؛ ب. جرثقیل (Fitchen 1986, 93-95)

بررسی تاریخی ابزارآلات حمل مصالح نشان از آن دارد که تا پیش از ابداع ماشین‌آلات نوین ساختمانی در اواخر قرن نوزدهم میلادی، روش‌های حمل بار تغییرات چندانی را شاهد نبودند. به عبارت دیگر، ابزارها و استراتژی‌های باستانی حمل بار در گذر زمان و طی هزاران سال همچنان کاربرد داشتند. این موضوع به‌خوبی در تصویر ۹ دیده می‌شود؛ چراکه برای حمل بارهای سنگین در قرن نوزدهم میلادی در میدان سن‌پیترو[۴۷] ایتالیا و نیز نمایشگاه جهانی قصر بلورین[۴۸] انگلستان از روش‌هایی که هزاران سال پیش‌تر در تمدن‌های باستانی مصر و آشور کاربرد یافت، استفاده شده است.



الف ب

تصویر ۹: الف. نصب ابلیسک در میدان سن‌پیترو در واتیکان؛ ب. حمل بار در نمایشگاه جهانی قصر بلورین لندن، ۱۸۵۰ میلادی
(Fitchen 1986, 122-123; Hobhouse 1937, 48)

٤. تحلیلی بر روش‌های محتمل برای حمل بار در تمدن هخامنشی با تکیه بر ابزارهای مورد کاربرد در تمدن‌های باستان

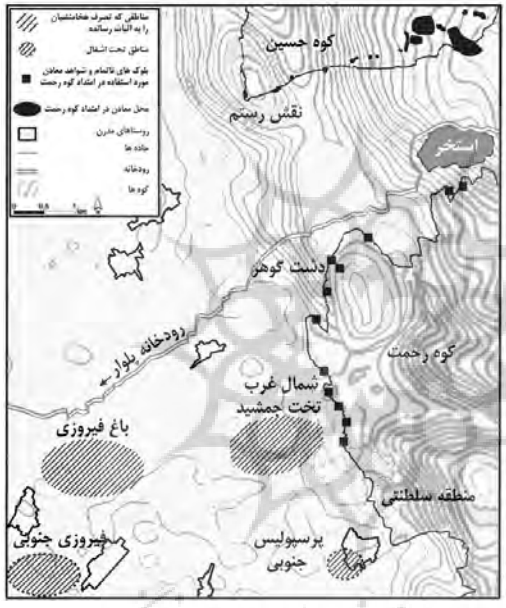
همان‌طور که اشاره شد، حمل مصالح ساختمانی در تمام تمدن‌های تاریخی پیش از عصر جدید، زمانی که ماشین‌آلات متکی به نیروی محرکهٔ بخار مورد استفاده قرار گرفت، موضوعی چالش‌زا بوده و این میان روش‌های به نسبت محدودی توسعه یافت و به کار گرفته شد. با آگاهی از این موضوع، و نیز توجه به نقش مهم تمدن‌های باستانی که به تابعیت امپراتوری هخامنشی درمی‌آمدند در شکل‌گیری روش‌های معماری این عصر (Frankfort 1970, 358-63)، در این بخش از تحقیق به فرضیه‌پردازی درخصوص استراتژی‌های مورد استفاده در حمل مصالح سنگی برای ساخت تخت‌جمشید می‌پردازیم. برای اثبات این دیدگاه‌ها، از یافته‌های پیش‌تر معرفی‌شده و نیز شواهد و قراین باستانی کمک خواهیم گرفت. بدین منظور، ابتدا به مطالعهٔ معادن استخراج سنگ، فواصل آن‌ها از تخت‌جمشید، و به‌ویژه شناسایی موانع جغرافیایی موجود در مسیر حمل بار پرداخته، سپس با بررسی شواهد موجود از روش‌های حمل افقی بار به تحلیل روش‌های محتمل مورد کاربرد توسط سازندگان هخامنشی خواهیم پرداخت. به‌منظور شناسایی چگونگی حمل بار در محور عمودی، روش‌های به‌کار گرفته‌شده توسط دیگر تمدن‌های باستانی و نیز دیدگاه‌های پژوهشگران پیشین در تحلیلی مقایسه‌ای از شواهد موجود در سایت و کالبد آثار باستانی قرار می‌گیرند.

٤. ١. معمار هخامنشی و انتقال مصالح در محور افقی

مطالعهٔ پتروگرافی[۴۹] آثار برجای‌مانده از تمدن هخامنشی در سایت میراث جهانی تخت‌جمشید ثابت می‌کند که سازندگان از سنگ‌های معادن مختلف که خصوصیات زمین‌شناسی و مکانیکی متفاوتی دارند بهره برده‌اند. برای مثال، معادن کوه رحمت در فاصلهٔ ۱ تا ۵ کیلومتری از تخت‌جمشید، معادن کوه حسین در فاصلهٔ ۵ تا ۱۰ کیلومتری، و معدن سیوند در ۳۵ کیلومتری از شمال شرق این محوطهٔ باستانی ازجمله منابع استخراج سنگ است (امان‌اللهی ۱۳۸۹، ۴۰ـ۴۴؛ Guidi et al. 2017, 269) که تاکنون شناسایی شده‌اند. با احتساب فاصلهٔ قابل توجه این معادن از تخت‌جمشید و نیز توپوگرافی متنوع موجود در مسیرهای دسترسی، اهمیت حل مسائل مرتبط با جابه‌جایی مصالح بزرگ و سنگین بیشتر عیان می‌گردد. ایجاد مسیرهای مناسب میان محل استخراج سنگ و سایت تخت‌جمشید، اولین زیرساخت ضروری برای انتقال افقی بارهاست. دور از انتظار نیست که سازندگان برای انتقال مصالح دست به ساخت جاده‌هایی موقت زده باشند.[۵۰]

همان‌طور که اشاره شد، موضوع استخراج سنگ برای ساخت تخت‌جمشید توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار

گرفته، و سباستین گندت یکی از جدیدترین این پژوهش‌ها را به‌تازگی منتشر کرده است. وی ضمن شناسایی و تحلیل معادن مورد استفاده، مسیرهای احتمالی حمل بار در عصر هخامنشی را نیز مورد بررسی قرار داده است (Gondet 2015, 282). با ارائهٔ دو ادلهٔ مستدل، گندت باور دارد که در کنار کوه رحمت، کوه حسین نیز از منابع اصلی استخراج سنگ‌های عظیم بوده است (تصویر ۱۰): ۱. وجود قطعات سنگی عظیم تراشیده‌شده در دامنهٔ کوه حسین که آمادهٔ انتقال به محل ساخت‌وساز بودند (Ibid, 311)؛ ۲. توجه به جنس مصالح سنگی برداشت‌شده از کوه حسین که به‌دلیل جنس آهکی فشرده‌شان برای استخراج قطعات بزرگ که طول آن‌ها حتی به ۱۰ متر هم می‌رسید مناسب‌اند (Ibid, 312). این درحالی است که معادن کوه رحمت تنها برای استخراج قطعات به نسبت کوچک‌تر، مثلاً به طول حداکثر ۵ متر کاربرد دارند (Ibid, 304). ازاین‌رو معادن واقع در کوه حسین یکی از منابع اصلی استخراج قطعات سنگی عظیم بوده است.

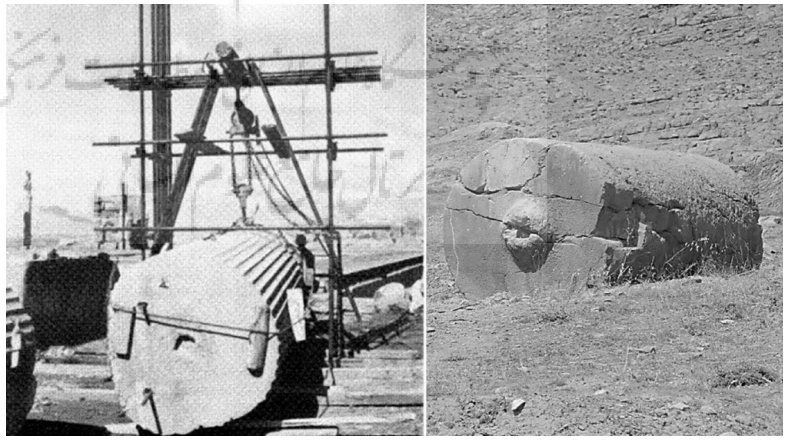


تصویر ۱۰: تخت‌جمشید و معادن اطراف (Gondet 2015, 282) (دخل و تصرف توسط نویسندگان)

وجود رودخانهٔ پلوار میان کوه حسین و تخت‌جمشید ازجمله موانع طبیعی موجود در مسیر حمل و بهره‌برداری از مصالح استخراج‌شده از معادن بوده است. این موضوع، ساخته شدن پل بر روی رودخانه برای عبور و مرور را الزامی می‌ساخت (Ibid, 326). شواهد ساخت پل‌های باستانی در تمدن باستانی ایران و ازجمله هخامنشیان امروزه هنوز موجود است.[۵۱] برخی از این پل‌ها از مصالح بسیار مستحکم مانند بلوک‌های سنگی، لاشه‌سنگ و ملات آهک ساخته شده (کرمی و گرامی ۱۳۹۶، ۱۲۴) که امکان عبور بارهای سنگین را فراهم می‌آورد. اگرچه محل قرارگیری این پل‌ها لزوماً در مسیر اتصال‌دهندهٔ کوه حسین به تخت‌جمشید نقش ندارد، بقایای آن‌ها می‌تواند نشان از وجود سایر پل‌های تخریب‌شده در مسیر مورد مطالعهٔ ما داشته باشد. از دیگر نمونه‌های قابل توجه در این حوزه، می‌توان به بندها و سدهای هخامنشی متعدد در پیرامون رود کر[۵۲] و درهٔ درودزن[۵۳]، که توسط باستان‌شناسان آمریکایی و آلمانی مورد کاوش قرار گرفته‌اند، اشاره داشت. ارزنده‌ترین این آثار سد برده بریده درودزن است (نیکول ۱۳۹۳، ۹۹). همچنین پایه‌های مدفون یک پل در میان چهارباغ پاسارگاد از دیگر نشانه‌های رونق پل‌سازی در عصر هخامنشی است (Stronach 1978, 115). این قبیل یافته‌ها به تسلط این قوم در امور راه‌سازی و غلبهٔ آن‌ها بر چالش‌های محیط طبیعی دلالت دارد. شواهد تاریخی همچنین از تسلط هخامنشیان بر آب‌ها و ساخت شناورهای قابل اتکا در جنگ‌ها حکایت دارد (Haubold 2012). با توجه به اهمیت معماری یادمانی در عصر باستان و توجه به این موضوع که معماری همواره از دانش و تجربهٔ توسعه‌یافته در سایر عرصه‌ها

یا علوم برای توسعهٔ خویش بهره می‌برد، می‌توان انتظار داشت که توانایی‌های فناورانهٔ هخامنشیان در دریانوردی در قلمرو معماری‌شان نیز مورد استفاده قرار گرفته باشد. ازاین‌رو دور از ذهن نیست که معماران هخامنشی همچون دیگر تمدن‌های باستانی در مصر و بین‌النهرین از مسیرهای آبی برای جابه‌جایی بارهای سنگین بهره جسته باشند.

با آگاهی از استراتژی‌های حمل افقی بار در تمدن‌های مختلف، اکنون می‌توان شواهدی از این روش‌ها را در آثار برجای‌مانده در تخت‌جمشید نظاره‌گر بود. برای مثال، حفره‌های حجاری‌شده در بخش مرکزی دو انتهای قلمهٔ برخی از ستون‌ها جلب توجه می‌کنند (تصویر ۱۱). مقایسهٔ نحوهٔ اتصال قلمهٔ ستون‌ها (در محور عمودی) در معماری هخامنشی و سایر تمدن‌های باستان در شناسایی و تفکیک حفره‌های مرتبط با حمل‌ونقل از دیگر حجاری‌های مورد کاربرد برای ایجاد اتصال مناسب بین سنگ‌ها حائز اهمیت است. در سراسر دورهٔ کلاسیک یونان، اتصال قلمه‌های ستون به یکدیگر به‌وسیلهٔ گوه‌های چوبی صورت می‌گرفت (Konstantinidis and Makris 2005,118؛ محمدی خبازان و حبیبی ۱۴۰۱، ۳۴). کارل نیلاندر و آن بریت تیلیا[۵۴] ازجمله محققانی هستند که درخصوص اتصالات عناصر معماری هخامنشی مطالعات ارزنده‌ای انجام داده‌اند. نتایج تحقیقات آنان ثابت می‌کند که برخلاف تمدن یونان و تأثیر فراوان این تمدن بر شکل‌گیری فرهنگ معماری هخامنشی، اتصالات میان قلمه‌های ستون در معماری هخامنشی بدون هیچ المان حد واسط عمودی چوبی صورت می‌گرفته است (Nylander 1970, 36; Tilia 1968, 85). به عقیدهٔ محققان، آثار محدود از سرب یافت‌شده بین قلمهٔ برخی ستون‌ها تنها در زمان برپایی این عناصر و به‌منظور چرخاندن قلمهٔ بالایی روی بخش زیرین و به‌منظور ایجاد کمترین درز در بین قطعات سنگی کاربرد داشته است (Tilia 1968, 73؛ کرفتر ۱۳۸۸، ۳۴). ازاین‌رو، حفره‌هایی که در انتهای قلمهٔ ستون‌ها در تخت‌جمشید دیده می‌شوند،[۵۵] کاربرد سازه‌ای ندارند. بر مبنای مطالعات مؤسسهٔ ایتالیایی ایزمئو، ابعاد این حفره‌ها بین ۸ تا ۱۲ سانتی‌متر بوده و در دو انتهای قلمهٔ ستون‌ها حفاری شده‌اند (Tilia 1968, 73). می‌توان اذعان داشت به‌دلیل وزن زیاد این قطعات سنگی که حمل‌ونقل به کمک روش‌های صرفاً متکی بر نیروی انسان و حیوان را منتفی می‌ساخت، استفاده از ماشین‌آلات ابتدایی متکی به چرخ ضرورت داشته است. ازاین‌رو منطقی است این‌گونه فرض کنیم که حجاری‌های مورد بحث محل اتصال چرخ به دو انتهای قلمهٔ ستون برای تبدیل آن به نوعی ماشین برای انتقال افقی مصالح بوده است (Motamedmanesh 2021, 13). احتمالاً روش حمل این قطعات مطابق با استراتژی معرفی‌شده در تصویر ۳ د بوده است.



تصویر ۱۱: نمونه حفره‌های حجاری‌شده در انتهای قلمهٔ ستون‌ها در تخت‌جمشید و معادن باستانی در ضلع شمالی آن (Tilia 1972, fig. 86, 87)

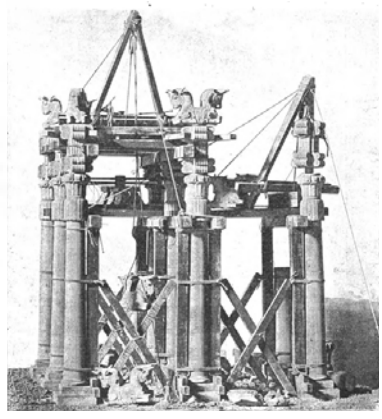
با در نظر گرفتن روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده در دیگر تمدن‌های باستان، و نیز ویژگی‌های توپوگرافی و جغرافیایی محل استخراج و کاربرد سنگ‌ها در فارس، اکنون می‌توان سناریوهای مختلف برای حمل بار توسط معماران تخت‌جمشید را بازنویسی کرد. احتمالاً حمل افقی عناصر سنگی از معادن واقع در ارتفاعات کوه تا سطح هموار دشت به‌وسیلهٔ سورتمه‌هایی

مشابه آنچه در مصر باستان کاربرد داشت، بوده است. شواهد باستانی نشان می‌دهند که صنعتگران مصری در زمان ساخت تخت‌جمشید، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بودند (Henkelman et al. 2017) و ازاین‌رو انتقال فناوری مورد کاربرد در سرزمین مادری آنان در محل جدید استخدامشان، در قلب امپراتوری هخامنشی بدیهی به نظر می‌رسد. مطالعهٔ توپوگرافی دامنه‌هایی از کوه حسین که محل معادن باستانی در آن مشخص گردیده نیز این تئوری را تقویت می‌کند؛ چراکه کنترل ماشین‌های چرخ‌دار حامل قطعات سنگین چند ده‌تنی در شیب تند این دامنه‌ها بسیار دشوار یا حتی امکان‌ناپذیر می‌نماید. ازسوی دیگر، جهت حمل بار به ترازهای ارتفاعی پایین‌تر از کوه، ایجاد تراسه‌بندی محدود در برخی دامنه‌ها برای استفاده از انواع ماشین‌های سادهٔ الاکلنگی، مشابه تصویر ۶، که انتقال مصالح به ترازهای پایین‌تر یا با توپوگرافی هموار که در آن‌ها سورتمه‌های حمل بار مشابه با تصویر ۱ به‌راحتی حرکت می‌کردند، نیز منطقی می‌نماید. ازاین‌رو انتخاب هریک از این روش‌ها برآمده از ویژگی‌های مخصوص زمین‌شناسی هر نقطه بوده و برداشت‌های میدانی در محدودهٔ بلافصل معادن باستانی برای شناسایی دقیق‌تر استراتژی مورد کاربرد موضوعیت خواهد داشت. پس از انتقال سنگ‌های استخراج‌شده به سطح دشت، سازندگان با چالش‌های متفاوتی روبه‌رو می‌شدند. به‌نظر می‌رسد ماشین‌آلات چرخ‌دار مناسب‌ترین روش برای حمل قطعات سنگی در مسیر حمل سنگ از پای کوه تا محل نصب در تخت‌جمشید بوده‌اند. علی‌القاعده این جابه‌جایی در طی فصول خشک سال و در دشت‌های هموار صورت گرفته و گاه مسیری به طول ده‌ها کیلومتر را بالغ می‌شده است. بهره‌گیری از چرخ این مزیت‌ها را در بر داشته است: سرعت حمل مناسب در قیاس با سایر روش‌ها، نیز هدایت‌پذیری به نسبت آسان که با استفاده از حداقل نیروی کارگر ممکن بوده است. با توجه به اینکه هخامنشیان به نیروی کار فعال در تخت‌جمشید دستمزد می‌پرداختند (Ibid)، استفاده از روش‌هایی که نیازمند نیروی ماهر کمتری باشد، اهمیت داشت. برای کاهش هزینه‌ها و نیز افزایش سرعت عملیات، اجتناب از ساخت ماشین‌آلات مخصوص برای این منظور منطقی می‌نماید. ازاین‌رو احتمالاً معماران تخت‌جمشید هوشمندانه از خود مصالح برای ایجاد ماشین‌هایی اولیه بهره می‌جستند. برای نمونه، همان‌طور که در تصویر (۳. د) دیده می‌شود، اتصال دو عدد چرخ به دو انتهای قطعات سنگی با طول زیاد امکان ایجاد یک ماشین ابتدایی برای حمل قطعهٔ مورد نظر را فراهم می‌کرد. نه‌تنها حفره‌های تعبیه‌شده در انتهای قلمهٔ ستون‌ها یکی از مهم‌ترین شواهد استفاده از چرخ به روش فوق است، بلکه قراین تاریخی نشان از آن دارد که استفاده از چرخ در فلات قارهٔ ایران تاریخچه‌ای طولانی داشته و هزاران سال پیش از هخامنشیان، عیلامیان نمونه‌های کاربردی و ظریف از چرخ را با استفاده از چوب و برنز ساخته بودند. نمونهٔ چرخ یافت‌شده در چغازنبیل مربوط به اواسط هزارهٔ دوم پیش از میلاد، که امروزه در موزهٔ ایران باستان نگهداری می‌شود، شاهدی بر این مدعاست. در اجرای تخت‌جمشید استفاده از ماشین‌های متکی به چهارچرخ به‌دلیل نیاز به جاده‌های با عرض زیاد و نیز دردسرهای نگهداری از چنین ماشین‌هایی منطقی نمی‌نماید. در مسیر انتقال مصالح از پای کوه تا محل ساخت، گذر از رودخانه‌های فصلی که عمود بر مسیر حرکت بار جریان داشتند (و به‌ویژه رودخانهٔ پلوار) اجتناب‌ناپذیر بوده است، با در نظر گرفتن محل جغرافیایی عبور از رودخانه و زمانی از سال که حمل سنگ‌ها قرار بود صورت گیرد، جریان آب با عمق و عرضی متفاوت در مقابل سازندگان قرار می‌گرفت و ازاین‌رو استراتژی‌های متفاوت کاربرد می‌یافتند. درصورتی‌که سرعت زیاد جریان آب امکان کنترل و هدایت قایق‌های کوچک حمل بار را فراهم نمی‌کرد، استفاده از پل ضرورت داشت. اما در فصل‌های کم‌آبی رودخانه‌ها یا برخورد با جریان‌های آبی محدود، استفاده از انواع شناورهای کوچک متصل به یکدیگر، مشابه آنچه در دیگر تمدن‌های باستان دیدیم، خارج از تصور نیست.[۵۶]

٤. ۲. معمار هخامنشی و انتقال مصالح در محور قائم

اگرچه ابعاد عناصر سنگی عظیم‌الجثه، بسیاری از محققان را از فرضیه‌پردازی درخصوص روش‌های به‌کار گرفته‌شده برای برپایی آثار هخامنشی منصرف کرده است، اما در طول تاریخ، محققان محدودی در این حوزه قلم‌فرسایی کرده‌اند. برای مثال، دیالافوآ به محدودیت هخامنشیان در دسترسی به الوارهای محکم و طویل اشاره کرده و باور داشت به‌منظور جلوگیری از اتلاف هزینه‌های ساخت داربست‌های موقت با استفاده از چوب باارزشی که از سواحل مدیترانه استخراج و تا فارس حمل می‌شد، کاربرد بالابرها ضرورت داشته است. در این دیدگاه، حتی شاه‌تیرها و تیرک‌های مورد کاربرد در تیرریزی سقف کاخ‌ها نیز کاربری دوگانه پیدا کرده و در مراحل برپایی ستون‌ها و به‌منظور تولید نمونه‌های ابتدایی از

جرثقیل مورد استفاده قرار می‌گرفت. ازنظر وی، وجود الوارها با اندازه‌های مختلف برای تیرریزی سقف پاسخ‌گوی چرایی تشکیل شدن ستون‌های هخامنشی از قطعات کوچک‌تر است. دیالافوآ با ارجاع به نوشته‌های هرودوت به فرضیه‌پردازی درخصوص کاربرد نوعی خرک سه‌پایهٔ چوبی می‌پردازد. این وسیله متشکل از دو یا سه تیرک چوبی به هم اتصال‌یافته بود که در ادامهٔ فرایند ساخت، به‌عنوان شاه‌تیر و یا تیرک پوشش‌دهندهٔ سقف مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در محل تقاطع تیرک‌ها قرقره‌ای مرکب نصب شده و طنابی را به چرخ دواری[۵۷] که به‌صورت افقی بر روی زمین قرار می‌گرفت متصل می‌نمود (Dieulafoy 1890, 332-333). این ماشین با سه‌پایهٔ بالابر که پیش‌تر ذکر آن رفت، مشابهت دارد. با توجه به طول تیرک‌های مورد استفاده و نیز ارتفاع نهایی ماشین حاصله، امکان برپایی عناصر سنگی با ارتفاع متفاوت فراهم می‌گردید. پس از برپا شدن اولین ردیف از قلمه‌های سه‌گانهٔ ستون کاخ‌ها، سازندگان به ایجاد سطحی صاف در قسمت بالایی نیمه‌ستون‌های برپاشده پرداخته، و خرک چوبی سه‌پایه متشکل از تیرک‌های چوبی کوتاه‌تر را به بالای این سطح انتقال می‌دادند. برای افزایش مقاومت جانبی این مجموعه و جلوگیری از واژگونی آن، قسمت فوقانی ماشین ازطریق ریسمان به دیگر ستون‌های پیش‌تر ساخته‌شده و یا سطح زمین مهار می‌شد (تصویر ۱۲، الف). دیالافوآ بر این باور بود که بالا بردن تمامی بخش‌های ستون با استفاده از این روش انجام‌پذیر بوده است. از دیدگاه وی، به‌کارگیری این سیستم باعث کاهش چشمگیر تعداد نیروی کار انسانی می‌شده است: «برای ساخت آپادانا استفاده از صدوبیست کارگری که با چرخ دوار کار می‌کردند کفایت می‌کرد. در کنار آنان نیروی متخصص در بنایی، نجاری و سنگ‌کاری فعالیت داشتند که تعدادشان بین پنجاه تا شصت نفر بالغ می‌شد. درصورتی‌که به‌صورت هم‌زمان یک گروه در ایوان به بالا بردن قطعات سنگی مشغول می‌شدند و سه گروه نیز در بخش مرکزی تالار فعال بود، هم‌زمان بین هشتصد تا هزار نفر در ساخت آپادانا به فعالیت می‌پرداختند» (Ibid, 334-335) برای انتقال عناصر کاخ‌های هخامنشی شوش به پاریس در اواخر قرن نوزدهم میلادی، دیالافوآ و تیمش از بالابرهایی که براساس تکنیک فوق عمل می‌کردند، بهره گرفتند (تصویر ۱۲، ب). این موضوع کارآمدی این استراتژی را نمایش می‌دهد.



الف

ب

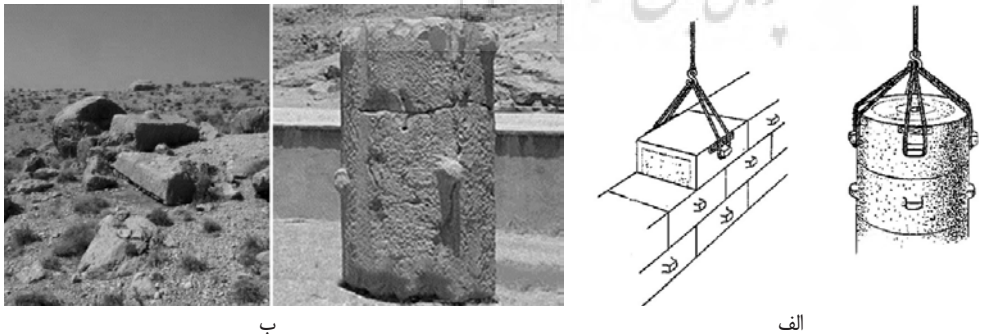
تصویر ۱۲: الف. دیدگاه دیالافوآ درخصوص چگونگی برپایی ستون‌های کاخ آپادانای شوش؛ ب. نحوهٔ انتقال عمودی قطعات کاخ شوش حین انتقال به پاریس در قرن نوزدهم میلادی (Dieulafoy 1886, fig. 319 and fig. 209)

در اواسط قرن بیستم میلادی، کرفتر دو ایراد اساسی به نظریات دیالافوآ وارد کرد: اول آنکه برپا ساختن بخش‌های فوقانی ستون‌های سنگین به‌وسیلهٔ داربست‌هایی که به ستون‌های خودایستا تکیه داشته باشند، بسیار غیر ایمن بوده، و نیز این روش چگونگی برپایی ستون اول را توضیح نمی‌دهد؛ ثانیاً طناب‌های کنفی که بتوانند قطعاتی به وزن بیش از ۱۸ تن را بالا ببرند، باید حداقل ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر ضخامت داشته باشند که در دوران باستان تولید چنین طناب‌هایی به طول زیاد ممکن نبوده و یا آنکه محصول تولیدی دارای انعطاف لازم نبوده است (کرفتر ۱۳۸۸، ۵۳). از دیدگاه

نویسندگان حاضر، این‌دست ایرادات برای خط بطلان کشیدن بر نظریهٔ استفاده از ماشین‌های بالابر کافی نیست؛ چراکه می‌توان روش‌های مطمئنی را برای برپایی و عملکرد بی‌خطر بالابرها در نظر گرفت که نمونه‌های آن پیش از هخامنشیان در یونان باستان نیز کاربرد داشت. لزوم دسترسی به طناب‌های مناسب نیز نمی‌تواند در روایی دیدگاه‌های دیالافوآ خللی وارد کند؛ چراکه تحقیقات اخیر پیراتینی درخصوص توسعهٔ جرثقیل در یونان ثابت کرده که ماشین‌های متکی به طناب به‌وفور در دوران باستان کاربرد داشتند (Pierattini 2018, 1053-1058). ازاین‌رو به نظر می‌رسد سازندگان باستان فناوری‌های متنوعی را در ساخت و توسعهٔ اجزای ساختمان‌ها و ماشین‌آلات مورد استفاده خویش به‌کار برده‌اند که ما امروزه از آن‌ها بی‌اطلاعیم.

کرفتر سطح شیب‌دار را بهترین ابزار برای بالا بردن قطعات ستون‌های تخت‌جمشید دانسته و بهره‌گیری از شیوه‌های دیگر را در دنیای باستان امکان‌پذیر نمی‌داند (کرفتر ۱۳۸۸، ۳۴). اما بسیاری از محققان با چنین دیدگاهی همسو نیستند (فرشاد ۱۳۷۶، ۸۰؛ Dieulafoy 1890, 332)، چراکه با احتساب معماری خاص کاخ‌های هخامنشی (که متکی بر انبوهی از ستون‌ها و عناصر معماری عظیم‌الجثهٔ پیرامونی هستند)، تأمین طول سطح شیب‌دار لازم برای انتقال مصالح بسیار دشوار بوده است. همچنین با جابه‌جا شدن قطعات در طول این سطوح، کوچک‌ترین اشتباه نیروی کار در زمان حمل می‌توانست موجبات آسیب به دیگر ستون‌ها شده و حتی خطر ریزش کل کاخ را به همراه داشته باشد. حتی با فرض اجرای قلمه‌های ردیف پایینی ستون‌ها با استفاده از سطوح شیب‌دار، با افزایش ارتفاع ستون‌های درحال اجرا، رمپ‌های قبلی ناکارآمد می‌شدند و افزایش طولشان الزامی می‌شد. به عبارت دیگر، با پیشرفت پروژه، ساخت سطوح شیب‌دار طویل‌تر اجتناب‌ناپذیر بود که این موضوع به‌نوبهٔ خود هدررفت زمان، انرژی و منابع مالی را به‌دنبال داشت.

با تکیه بر دستاوردهای پژوهشی صورت‌گرفته در حوزهٔ تاریخ فناوری ساختمان، امروزه می‌توان با اطمینان اذعان داشت که فناوری توسعهٔ جرثقیل پیشینه‌ای طولانی دارد و مراحل پیشرفت آن قبل از ساخت مجموعه تخت‌جمشید سپری گردیده بود. یکی از مهم‌ترین شواهد که بهره‌گیری از تکنولوژی جرثقیل در تخت‌جمشید را ثابت می‌کند، قرقره‌های یافت‌شده در این محل است. همچنین یافت شدن قرقره‌های مفرغی در لرستان مربوط به قرن هشتم پیش از میلاد، نشان‌دهندهٔ آشنا بودن ایرانیان پیش از عصر هخامنشی با این ابزار است (فرشاد ۱۳۷۶ ، ۸۰ و ۸۱). درخصوص بهره‌گیری از دیگر روش‌های انتقال عمودی بار مانند تراسه‌بندی و یا سطح شیب‌دار باید اذعان داشت که تاکنون شواهد متقنی از کاربرد آن‌ها در کاخ‌های تخت‌جمشید کشف نشده است. به‌علاوه، وجود برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های موجود بر قطعات سنگی در محل معادن و نیز در خود سایت تخت‌جمشید (تصاویر ۱۳ تا ۱۴) که نمونه‌های مشابه با آن در دیگر تمدن‌های باستان نیز دیده می‌شود، استفاده از سیستم‌های مکانیکی متکی بر قرقره و طناب را اثبات می‌کند؛ درنتیجه، «گمان نزدیک به یقین آن است که سازندگان باستان از قرقره و طناب برای بلند کردن پاره‌های بزرگ سنگ استفاده می‌کرده‌اند» (همان، ۸۵).



الف ب

تصویر ۱۳: الف. برجستگی‌های قابل مشاهده بر روی عناصر معماری درحال ساخت، یونان باستان؛ ب. برجستگی‌های قابل مشاهده روی قلمهٔ ستون دروازهٔ ناتمام تخت‌جمشید، نیز عناصر سنگی حجاری‌شده پیش از انتقال در دامنهٔ کوه حسین
(Public domain) (Wright 2009, fig. 93; Gondet 2015, fig. 14)

الف

ب

تصویر ۱۴: شباهت پایه ستون یافت‌شده در نزدیکی تخت‌جمشید (تصویر الف) با تصویری از نحوهٔ حمل سنگ؛ (تصویر ب) توسط جرثقیل در قرن هجدهم میلادی (شبیری ۱۳۹۶، ۶۹؛ Wright 2009, fig. 85)

نتیجه

مقالهٔ حاضر بر مبنای مطالعات تاریخی و شواهد متقن علمی، و در بستری از تاریخ فناوری ساختمان در داخل و خارج مرزهای فلات قارهٔ ایران، در جست‌وجوی تکمیل خلأ اطلاعاتی درخصوص روش‌های به‌کاررفته برای حمل قطعات عظیم سنگ در تمدن هخامنشی است. این نوشتار در دو بخش حمل افقی و عمودی عناصر معماری، به بررسی و تحلیل اطلاعات پرداخته است. به‌منظور شناسایی روش انتقال افقی مصالح، به حضور صنعتگران مصری در ساخت تخت‌جمشید اشاره شده، و دشواری کنترل ماشین‌های متکی بر چرخ جهت حمل بارهای چند ده‌تنی در شیب تند محل برداشت سنگ‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. این‌گونه نویسندگان اعتقاد دارند حمل بار از محل معادن در ارتفاعات دامنهٔ کوه تا دشت‌های هموار به‌وسیلهٔ ماشین‌آلاتی مانند سورتمه‌های امروزین صورت گرفته باشد. استفاده از تراس‌بندی در دامنه‌های با شیب تند استراتژی دیگری است که می‌تواند به‌صورت محدود و در راستای تسهیل کاربرد سورتمه‌ها مورد توجه بوده باشد. با در نظر گرفتن شواهد ساخت پل، سد، و بند در تمدن هخامنشی، نیز توانایی این قوم در بهره‌گیری از انواع شناورها در دریا، وجود رودخانه‌های دائمی در مسیر حمل بار مشکلی برای سازندگان ایجاد نمی‌کرده است. امکان بهره‌برداری از نیروی شناوری سیالات در حمل مصالح و یا کاربرد پل‌ها برای اتصال راه‌های خشکی به یکدیگر ازجمله روش‌های مورد کاربرد بوده است. از دیگر سو، با در نظر گرفتن فاصلهٔ قابل توجه برخی از معادن تا صفهٔ تخت‌جمشید، وجود حفره‌های حجاری‌شده در دو انتهای قلمهٔ ستون‌ها، و نیز آشنا بودن ایرانیان با ابزار چرخ، می‌توان اطمینان داشت که انتقال و هدایت برخی عناصر بزرگ معماری با استفاده از دو چرخ متصل به دو انتهای قطعهٔ سنگی صورت گرفته باشد. این‌گونه کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت اجرا با پرهیز از ساخت ماشین‌آلات مستقل چرخ‌دار امکان‌پذیر می‌شد. توانایی هخامنشیان در ایجاد راه‌های قابل اتکای زمینی، دلیل دیگری بر کاربردی بودن استراتژی‌های حمل متکی بر چرخ خواهد بود. با توجه به پیشینهٔ اختراع جرثقیل و پیشرفت آن تا قبل از ساخت مجموعه تخت‌جمشید، یافت شدن قرقره‌های فلزی در محل، برجستگی‌های موجود روی برخی از قطعات سنگی که محل اتصال طناب به قلمهٔ ستون را فراهم می‌آورد، و به‌ویژه بازدهی مکانیکی بالای جرثقیل نویسندگان حاضر باور دارند که حمل قطعات عظیم سنگی در محور عمودی به‌وسیلهٔ جرثقیل‌هایی متشکل از قرقرهٔ مرکب و طناب انجام شده باشد. هزینه‌های بالای اجرا و زمان قابل توجه برای ایجاد سطوح شیب‌دار با طول لازم برای انتقال عناصر معماری به تراز ارتفاعی مورد نظر، نیز مخاطرات ناشی از حمل مصالح عظیم‌الجثه و سنگین بر روی این سطوح در زمرهٔ دلایلی است که با تکیه بر آن‌ها نویسندگان به رد کاربرد چنین روشی در حمل عمودی مصالح می‌پردازند.

پی‌نوشت‌ها

1. Margaret Cool Root
2. Heleen Sancisi-Weerdenburg
3. Margaret Miller
4. Anathyrosis
5. DSF
6. Monumental Buildings
7. John Fitchen
8. George R. H. Wright
9. James A. Harrelland P. Storemyr
10. Dieter Arnold
11. Building in Egypt
12. John Russell
13. Bulls for the Palace and Order in the Empire
14. John Coulton
15. Alessandro Pierattini
16. Marcel Dieulafoy
17. L'Acropole de Suse
18. Friedrich Krefter
19. Ernst Herzfeld

۲۰. بازگشت هرتزفلد به آلمان تنها منتج از روابط سیاسی و اقتصادی ایران و آلمان نازی در پیش از آغاز جنگ دوم جهانی نیست. نه‌تنها یهودی بودن هرتزفلد در این میان ایفای نقش می‌کرد، بلکه گزارش‌هایی که از وی درخصوص قاچاق اشیای عتیقهٔ ایرانی منتشر می‌گردید، زمینه را برای این مهم فراهم کرد. درنهایت، اریک اشمیت دیگر هموطن هرتزفلد ازسوی مؤسسهٔ شرق‌شناسی دانشگاه شیکاگو برای ادامهٔ کاوش‌ها در ایران معرفی شد.

21. ISMEO

۲۲. با توجه به سرعت انجام عملیات توسط این گروه و به درخواست رژیم پهلوی، که خواهان برپایی جشن‌های شاهنشاهی در محل اماکن باستانی بودند، امروز اعتبار برخی از امور مرمتی انجام‌گرفته توسط آنان مورد نقد جدی قرار دارد (برای مثال نک: Motamedmanesh 2016). کتاب‌نامهٔ آثار باستانی فارس در زمرهٔ منابعی است که برای شناسایی پژوهش‌های کمتر شناخته‌شده در حیطهٔ تحقیق می‌تواند راهگشا باشد (عسکری چاوردی ۱۳۸۵).

23. Carl Nylander
24. Sebastien Gondet
25. Bioclastic Rocks
26. Sledge
27. Sleeper
28. Wood Rollers
29. Lever
30. Wheel
31. Buoyancyforce

32. Barge
33. British Museum
34. Louvre Museum
35. Ramp
36. Block and tackle= Compound pulley= Hoist
37. Rocker
38. Gear
39. Temple of Isthmia
40. Temple of Athena at Assos
41. First Temple of Hera at Paestum
42. Lewis
43. Tong
44. Boss
45. Gin
46. Crane
47. St. Peter's Square
48. Crystal Palace
49. Petrography

۵۰. درخصوص راه‌های باستانی هخامنشی و به‌ویژه نقل‌قول‌های تاریخی در این خصوص نک: Briant 2018.

۵۱. برای مثال پایه‌های باقی‌مانده از پل کردشول که در نزدیکی مجموعه پاسارگاد و در بستر رودخانهٔ پلوار ساخته شده بود، نمونه‌ای از این آثاراست.

۵۲. بزرگ‌ترین رودخانهٔ استان فارس که از شهرستان مرودشت عبور می‌کند.

۵۳. در استان فارس و در پنجاه‌کیلومتری شمال غرب مرودشت.

54. Ann Britt Tilia

۵۵. ستون‌های بلند کاخ‌های تخت‌جمشید از روی هم قرار گرفتن قلمه‌های کوچک‌تر تشکیل شده‌اند. برای مثال روی هم قرار گرفتن سه قلمهٔ ستون با طول‌های متفاوت، سازندگان هخامنشی را قادر می‌ساخت تا طول ۱۵/۶۵ متری بخش استوانه‌ای‌شکل از تنهٔ ستون‌های کاخ آپادانا را فراهم آورند(کرفتر ۱۳۸۸، ۳۴؛ Motamedmanesh 2018, Fig.3).

۵۶. دیالافوآ نیز با اشاره به متون هرودوت، به توانایی هخامنشیان در استفاده از قایق‌های متصل به یکدیگر برای عبور از تنگهٔ Hellespont اشاره دارد (Dieulafoy 1890, 330). از دیدگاه وی، چنین چیدمانی از قایق‌های مواج در دریا نیازمند به‌کارگیری دانش قرقره‌ها و استفاده از لنگر و طناب برای مهار نیروهای وارده است.

57. Capstan

منابع

ـ اصفهانیان، وحید. ۱۳۹۶. *مکانیک سیالات*. تهران: مؤسسهٔ چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.

ـ امان‌اللهی، حمید. ۱۳۸۹. بررسی‌های اخیر معادن سنگ هخامنشی حوزهٔ مرودشت. مجلهٔ *باستان‌شناسی و تاریخ*، ش. ۴۸: ۳۷ـ۴۸.

ـ شبیری، ابادر. ۱۳۹۶. درآمدی بر آبیاری و کشاورزی در پارس باستان: دشت‌های پارسه – پاسارگاد در دورهٔ هخامنشی. *پاسارگاد ۲،مجموعه مقاله‌های حفاظت و مرمت، باستان‌شناسی، معماری، زمین‌شناسی، مردم‌شناسی و گردشگری بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد*: ۵۸ـ۷۷.

ـ شاپورشهبازی، علیرضا. ۱۳۸۹. *راهنمای مستند تخت‌جمشید*. شیراز: بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد.

ـ عسکری چاوردی، علیرضا. ۱۳۸۵.*کتاب‌نامهٔ آثار باستانی فارس، هفتاد سال پژوهش باستان‌شناسی در ناحیهٔ فارس*. تهران: کازرونیه.
ـ فرشاد، مهدی. ۱۳۷۶. *تاریخ مهندسی در ایران*. تهران: گویش.
ـ کرفتر، فردریش.۱۳۸۸. *طرح‌های بازسازی تخت‌جمشید*. ترجمهٔ فرانک بحرالعلومی شاپورآبادی. ۱۳۸۸. شیراز: بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد.
ـ کرمی، حمیدرضا، و فرزانه گرامی. ۱۳۹۶. *بررسی مسیرهای هخامنشی نویافته در منطقهٔ پاسارگاد*. شیراز: بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد.
ـ محمدی خبازان، سهند، و میترا حبیبی. ۱۴۰۱. بازخوانی کالبد و کارکرد در کاخ آپادانا مبتنی بر منابع کهن هندوایرانی. *معماری اقلیم گرم و خشک*،ش. ۱۶: ۲۳ـ۳۶.
ـ معتمدمنش، مهدی. ۱۳۹۷. معماری سلطنتی هخامنشی: نمادی از فناوری و خرد انسانی در عهد باستان. *مطالعات معماری ایران*،ش. ۱۳: ۵ـ۳۲.
ـ نیکول، ماری بی. ۱۳۹۳. *بندهای باستانی دره درودزن*. ترجمهٔ محمدجعفر ملک‌زاده. شیراز: نوید شیراز.
- Abdi, Kamyar. 2001. Nationalism, Politics, and the Development of Archaeology in Iran. *American Journal of Archaeology* 1: 51-76.
- Arnold, Dieter. 1991. *Building in Egypt: Pharaonic Stone Masonry*. New York: Oxford University Press.
- Bessac, Jean C. 2010. Le mégalithisme antique au Proche-Orient: idées reçues et données nouvelles. *Syria* 87: 173-190.
- Briant, Pierre. 2018. From the Indus to the Mediterranean: The Administrative Organization and Logistics of the Great roads of the Achaemenid Empire. *Wiley*: 185-201.
- Clarke, Somers, and Reginald Engelbach. 1930. *Ancient Egyptian Masonry*: The Building Craft, London: Oxford University Press.
- Coulton, John J. 1974. Lifting in Early Greek Architecture.*The Journal of Hellenic Studies* 94: 1-19.
- Dieulafoy, Marcel. 1886. *A Suse. journal des fouilles*. Paris: Librairie Hachette.
- ----------. 1890. *L'Acropole de Suse d'après les fouilles exécutées en 1884, 1885, 1886*. Paris: Hachette.
- Drachmann, Aage G. 1963. *The Mechanical Technology of Greek and Roman Antiquity*. Copenhagen: Munksgaard.
- Fitchen, John. 1986. *Building Construction Before Mechanization*. Chapter7 &10. Boston: The MIT Press.
- Frankfort, Henry. 1970. *The Art and Architecture of the Ancient Orient.* Harmondsworth: Penguin.
- Gondet, Sebastien. 2015. Strategies for the Operation of Stone in Persepolis. Ghent: Ghent University, *Iranica Antiqua*: 279-327.
- Guidi, Giolj F, et al. 2017. *Preliminary Diagnostic Study of the Stone on the Persepolis Terrace in From Palace to Town.vol. 1.Topography, Diagnostic and Conservation,* ed. Askari Chaverdi, Alireza and Callieri. Rome: Pierfrancesco.
- Henkelman, Wouter F. M., Jones, Charles E., and Stolper, Matthew W. 2017. Persepolis Administrative Archives, in *Encyclopædia Iranica*.online edition. https://www.iranicaonline.org/articles/persepolis-admin-archive (accessed 21 Aug. 2020).

- Harrell, James A., and Per Storemyr. 2009. Ancient Egyptian quarries. *Geological Survey of Norway*. Special Publication: 6-50.
- Haubold, Johannes. 2012. The Achaemenid Empire and the Sea. *Mediterranean Historical Review* 27 (1): 5-24.
- Hobhouse, Christopher. 1937. *1851 and the Crystal Palace*. E.P. The University of Michigan: Dutton, Incorporated.
- Konstantinidis, Dimitrios, and Nicos Makris. 2005. Earthquake Analysis of Multi-drum Columns. *Earthquake Resistant Engineering Structures*: 115-125.
- Lecoq, Pierre. 1997. *Les irisai fions de la Perse achéménide*. France: Éditions Gallimard.
- Motamedmanesh, Mahdi. 2016. Authenticity and Restoration: The Benefits ofHistorical Studies on Re-examining the Implemented Restorations in Persepolis. *Arts* 5, 1 (2): 1-19
- ----------. 2018. The Secret of Zoomorphic Imposts: A New Reading of the Achaemenids'Roofing Systems, in *Building Knowledge, Constructing Histories*. vol.2, ed. Ine Wouters et al. (Brussels: CRC Press): 959–966.
- ----------. 2021. Precursors of Aseismic Design: The Case of Achaemenid Monumental Architecture. *History of Construction Cultures*. vol. 2: 9-16.
- ----------. 2022. Achaemenid Building Technology: The Key to a New Reading of Royal Achaemenid Architecture. *Journal of the Society of Architectural Historians* 81 (3): 299-319.
- Mousavi, Ali. 2002. Persepolis in Retrospect: Histories of Discovery and Archaeological Exploration at the Ruins of Ancient Parseh. *Ars Orientalis:* 209-251.
- ----------. 2005. Ernst Herzfeld, Politics, and Antiquities Legislation in Iran, in*Ernst Herzfeld and the Development of Near Eastern Studies.1900–1950*, ed. AnnC. Gunter and Stefan R. Hauser (Leiden: Brill): 445–75.
- Nylander, Carl. 1970. *Ionians in Pasargadae*. Stockholm: Uppsala.
- Partridge, Robert B. 1996. *Transport in Ancient Egypt*. Chapter 20.Canada: Rubicon.
- Pierattini, Alessandro. 2018. *Early Greek Stone Construction and the Invention of the Crane*. University of Notre Dame, Notre Dame, USA: 1053-1059.
- Root, Margaret Cool. 2015. Achaemenid Imperial Architecture: Performative Porticoes of Persepolis. in*Persian Kingship and Architecture: Strategies of Power in Iran from the Achaemenids to the Pahlavis*, ed. Sussan Babaie and Talinn Grigor, (London: London: I. B. Tauris): 1-64.
- Russell, John M. 1987. Bulls for the Palace and Order in the Empire: The Sculptural Program of Sennacherib's Court VI at Nineveh. *The Art Bulletin* 69 (4): 520-539.
- Stronach, David. 1978. *Pasargadae*. Oxford: Clarendon Press.
- Talebian, Mohammad-Hassan. 2010. A Review of Research and Restoration Activities at Parsa-Pasargadae: Analysis, Evaluation and Future Perspectives,in *World of Achaemenid Persia:History, Art and Society in Iran and the Ancient Near East*, ed. John Curtisand St John Simpson (London: I. B. Tauris): 299-307.
- Tilia, Ann B. (1968). A study on the Methods of Working and Restoring Stone and on the Parts Left

Unfinished in Achaemenian Architecture and Sculpture. *East and West* 18 (1): 67-95
- ----------. 1972. *Studies and Restorations at Persepolis and other Sites of Fars* 1. Rome: IsMEO.
- ----------. 1978. *Studies and Restorations at Persepolis and other Sites of Fars* 2. Rome: IsMEO.
- Trigger, B. 1990. Monumental Architecture: A ThermodynamicExplanation of Symbolic Behaviour. *World Archaeology 22* (2): 119-132.
- Wright, George R. 2000. *Ancient Building Technology* 1. Leiden: Brill.
- ----------. 2005. *Ancient Building Technology* 2. Leiden: Brill.
- ----------. 2009. *Ancient Building Technology* 3. Leiden: Brill.
- Zareʿ, Azam. 2004. Petrographical Studies at Persepolis. *Annual Report of Research Foundation of Parsa-Pasargade* 1/1: 97-110
- https://persepolis.info/fa/

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Unveiling Achaemenid Logisticss: Investigating Methods of Construction Materials Transport at Persepolis

Mahdi Mo'tamed-manesh
Assistant Professor, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, m.motamed@modares.ac.ir

Maryam Kooravand
M.A. student, Architecture, Tarbiat Modares University

Zahra Shirzad-nia
M.A. student, Architecture, Tarbiat Modares University

Khosro Danesh-joo
Associate Professor, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University

Vertical and horizontal transportation of building materials has always been a major challenge in historical construction. Architects and engineers of ancient civilizations developed simple yet practical solutions for these challenges. While material transport has been addressed in the field of historical building technology, no definite conclusion has been reached regarding the equipment and methods for the entire process from extraction to execution. Among ancient civilizations, the Achaemenid Empire stands out as a remarkable example, with Persepolis representing its most significant and exquisite engineering and artistic achievement. Constructing monumental buildings during that era posed unique challenges which were addressed ingeniously and effectively, particularly regarding the vertical and horizontal transportation of heavy, large blocks of stone over long distances from quarries to construction sites. This research delves into the logistics strategies employed by the Achaemenids in the construction of Persepolis. The authors first examine the methods employed by pre-Achaemenid or contemporaneous civilizations, which, based on historical evidence, influenced the formation of Achaemenid architectural culture. Based on this analysis, the authors hypothesize about the methods employed by the Achaemenids. The hypotheses are evaluated by analyzing ancient evidence, field research, and geographic data within the field of historical building technology. The research reveals that the Achaemenids employed a combination of simple machines and sledges for the ground transportation of loads. Water was not a challenging obstacle for builders, as they used rafts or temporary bridges for the transportation of loads. In steep slopes, they likely modified the natural train or employed limited terraces. For vertical transportation, they most likely used a combination of compound pulleys and ropes in the form of early cranes.

Keywords: Achaemenid building technology, logistics strategies, vertical and horizontal transportation of construction materials, crane, sledge