



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage: <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



دانشگاه گرمسار

مقاله کامل پژوهشی

ارزیابی اثرات یادگیری بر فاکتورهای زمان و هزینه ساخت ساختمان با استفاده از مدل توانی (خط راست)

صابر شیرپور*، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران
بابک رنجبر، کارشناس ارشد، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی طبری
بابل، بابل، ایران

تاریخچه مقاله:	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶	در این تحقیق، به بررسی اثر تجربه و یادگیری در ساخت و سازهای عمرانی در بخش ساختمان با استفاده از مدل توانی (خط راست) پرداخته شده است. برای این منظور یک شرکت معتبر عمرانی در تهران، مورد مطالعه قرار گرفت. جزئیات ساخت و ساز پنج پروژه ساختمانی این شرکت شامل دو پروژه ساختمانی پنج طبقه، یک پروژه چهار طبقه و دو پروژه چهارده طبقه مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین، اطلاعات اجرایی پروژه‌ها از نظر زمان‌بندی و هزینه در چهار بخش شامل تجهیزکارگاه و فونداسیون، سفت کاری، نازک کاری و اتمام و کل پروژه، برای تمامی پروژه‌ها گردآوری شد. با استفاده از مدل توانی که براساس یادگیری تجمعی پروژه‌های تحقیق بوده است، مقادیر نرخ یادگیری کل پروژه‌ها در بازه ۸۲٫۷۵ تا ۹۲٫۶۹ درصد قرار داشته و برای پروژه نهایی برابر با ۸۹٫۱۰٪ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند که تجربه در روند انجام این پنج پروژه به‌طور قابل توجهی بر زمان ساخت اثرگذار بوده و موجب کاهش زمان ساخت بر هر مترمربع-طبقه ساختمان است به‌طوری‌که میانگین کاهش زمان ساخت برای چهار پروژه در حدود ۳۰٪ به‌دست آمد. هم‌چنین در ارتباط با هزینه ساخت، نرخ یادگیری بین ۹۸٫۸۰ تا ۹۹٫۵۳ درصد محاسبه شد که بیانگر آن است که تغییرات هزینه ساخت بیش از آنکه تحت تأثیر تجربه اجرایی قرار گیرد، احتمالاً متأثر از عوامل بیرونی نظیر نوسانات قیمت مصالح، دستمزد نیروی انسانی و شرایط اقتصادی بوده است.
کلیدواژه‌ها:	
منحنی یادگیری، مدل توانی (خط راست)، نرخ یادگیری، پروژه‌های ساختمانی I.	

عهده دار مکاتبات: صابر شیرپور

نشانی: ایران، سمنان، گرمسار، دانشگاه گرمسار

پیام نگار: s.shiripour@fmgarmsar.ac.ir

۱- مقدمه

تکرار و کسب تجربه از یک پروسه انجام کار موجب کسب مهارت و بهبود انجام آن پروسه خواهد شد. یادگیری و کسب مهارت و تجربه موضوعی است که در بسیاری از مشاغل و صنایع از جمله صنعت ساختمان سازی اثر قابل توجهی را داشته است. نظریه یادگیری کمک می کند تا دقت در برآورد افزایش یابد زیرا کسب تجربه در حین انجام یک فعالیت سبب می شود که زمان کوتاه تری صرف انجام آن فعالیت شود در نتیجه کاهش مدت فعالیت را می توان در برآورد هزینه منظور کرد. بسیاری از فرآیندهای ساخت و ساز به دلیل تکرار شونده بودن و اتکای زیاد به نیروی کار، رفتاری از خود نشان می دهند که به آن «اثر یادگیری» گفته می شود که به واسطه آن، زمان، هزینه و به طور کلی تلاش لازم برای انجام یک فعالیت، با افزایش تعداد تکرارها (تجربه)، کاهش می یابد. این واقعیت را می توان از طریق منحنی یادگیری نشان داد. منحنی یادگیری مدل ریاضی است که این اثر را نشان می دهد. آنچه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است ارزیابی اثر تجربه و یادگیری بر هزینه و زمان ساخت و سازهای ساختمانی و کارگاه های ساخت است. برای این منظور، تعدادی از پروژه های ساختمانی یک شرکت عمرانی معتبر در پایتخت ایران، تهران، به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که تجربه در صنعت ساختمان تا چه حد می تواند در میزان هزینه، زمان تأخیر و کیفیت ساخت اثرگذار باشد.

در ادامه به بررسی منحنی یادگیری و پیشینه تحقیق پرداخته می شود. در بخش سوم، روش تحقیق و گردآوری اطلاعات و در بخش چهارم، مدل توانی (خط راست) مورد بررسی قرار می گیرند. در بخش پنجم، به توصیف و معرفی پروژه های ساختمانی مورد مطالعه پرداخته می شود. در بخش ششم، پیاده سازی مدل پیشنهادی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش پایانی، نتیجه گیری، مقایسه نتایج تحقیق با مطالعات پیشین و ارائه پیشنهادها انجام می پذیرد.

۲- پیشینه تحقیق

براساس نظریه یادگیری، هرگاه مقدار تولید یک محصول نسبت به قبل دو برابر شود، میانگین تجمعی زمان کار مورد نیاز برای ساخت آن محصول در هر مرحله دوبرابری با درصد معینی نسبت به میانگین تجمعی پیشین کاهش پیدا می کند. این درصد کاهش را «نرخ یادگیری» می نامند [۱، ۲ و ۳]. با توجه به این تعریف، نرخ منحنی یادگیری حاصل تقسیم زمان متوسط تجمعی تکمیل واحد دو به واحد یک است. همان طور که اشاره شد، نرخ منحنی یادگیری میزان یادگیری به دست آمده را نشان می دهد. پایین بودن این نرخ به آن معنا است که با تکرار فعالیت، میزان یادگیری بیش تری حاصل شده است؛ در مقابل، هرچه مقدار نرخ بالاتر باشد، بیانگر آن است که افزایش بهره وری در طی تکرارها با سرعت کمتری انجام گرفته است [۱، ۲ و ۴].

منحنی یادگیری در واقع نموداری است که رابطه میان زمان یا هزینه انجام هر واحد فعالیت را با تعداد واحدهای تولید شده نشان می دهد [۵]. این منحنی زمانی شکل می گیرد که زمان یا هزینه مورد نیاز برای اجرای هر تکرار یک فعالیت، برحسب تعداد دفعات انجام آن ترسیم شود [۶]. با این حال، منحنی یادگیری می تواند به اشکال متفاوتی ظاهر شود؛ مادامی که نمودار، تغییرات مهارت و کارایی یا همان بهره وری را در برابر میزان تمرین و تکرار نمایش دهد، هم چنان در دسته منحنی های یادگیری قرار می گیرد [۷]. طبیعت تکراری و پیوسته بودن برخی فعالیت های ساخت و ساز اجازه می دهد تا اثر یادگیری در بسیاری از فعالیت های صنعتی مشاهده گردد [۸]. تا امروز جنبه های مختلف استفاده از منحنی یادگیری در صنعت ساخت، شناسایی و بررسی شده است. از جمله مهم ترین کاربردها می توان به بهره گیری از اثر یادگیری و تجربه در شیوه های گوناگون برنامه ریزی، به ویژه برنامه ریزی خطی و همچنین در ابزارهای کنترل پروژه مانند روش خط تعادل و روش مسیر بحرانی اشاره کرد [۹ و ۱۰]. علاوه بر این، از منحنی یادگیری در تعیین مقدار خسارات ناشی از بهره وری از دست رفته در اثرات تأخیرات پیمانکاران

استفاده می‌شود [۱۰].

توماس و همکاران (۱۹۸۶) کاربردپذیری مدل‌های مختلف منحنی یادگیری را برای فعالیتهای ساخت مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق خود توانایی برازش داده‌های واقعی یادگیری توسط پنج مدل ریاضی منحنی یادگیری ارزیابی نمودند. نتیجه نشان داد که منحنی S شکل (مدل درجه سه) بهترین مدل برای پیش‌بینی است و مدل خطی با وجود برتری به خاطر ساده بودن همیشه قابل اطمینان نیست [۳]. توران (۱۹۸۸) تلاش کرد تأثیر یادگیری را بر بهره‌وری عملیات قالب‌بندی تیرها و دیوارهای هسته آسانسور در یک پروژه چندطبقه در سیاتل به‌صورت کمی ارزیابی کند. او برای تحلیل داده‌ها از مدل خطی منحنی یادگیری بهره برد و نشان داد که تکرار فعالیت‌ها موجب افزایش چشمگیر کارایی در فرآیند قالب‌بندی می‌شود [۱۱]. در پژوهشی دیگر، اورت و فارقال (۱۹۹۴)، دو نوع مدل خطی و درجه سوم، به همراه ده مدل ریاضی مشتق شده از آن‌ها را روی ۶۰ مجموعه داده آزمودند تا مشخص کنند کدام مدل رابطه بین مدت‌زمان فعالیت‌ها و تعداد تکرار را بهتر بیان می‌کند. نتایج حاکی از آن بود که برای فعالیت‌هایی که به پایان رسیده‌اند، مدل‌های درجه سوم بهترین و قابل‌اعتمادترین برازش را نسبت به داده‌ها ارائه می‌دهند. اما بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده، مدل‌های خطی بودند و مدل‌های درجه سه ضعیف‌ترین پیش‌بینی را انجام دادند. با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثر یادگیری و امکان استفاده از نتایج برای تحلیل و پیش‌بینی عملکرد پروژه‌های آتی است، رویکرد مبتنی بر مدل توانی (خط راست در مقیاس لگاریتمی) انتخاب شد. این مدل علاوه بر سادگی و کاربرد گسترده در مطالعات منحنی یادگیری، از قابلیت مناسبی برای تحلیل روند یادگیری و پیش‌بینی عملکرد پروژه‌ها برخوردار است [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، دانگ (۱۹۹۶) عملکرد ۱۸ پروژه ساخت مسکن را بررسی کرد و دریافت که میان بهره‌وری عملیات ساختمانی و اثر یادگیری رابطه‌ای کلی و قابل‌توجه برقرار است [۱۳]. کوتو

و تیکسرا (۲۰۰۵)، به بررسی اثر منحنی یادگیری لگاریتمی بر ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته است. براساس یافته‌های این تحقیق، افزایش شناخت نیروهای کار از محیط و شرایط اجرایی پروژه، ارتقای کیفیت مدیریت و نظارت، بهبود سازمان‌دهی و هماهنگی عملیات، تثبیت روش‌های کاری، و ایجاد نظام مؤثرتر برای انبارداری و تأمین مصالح، همگی از عواملی هستند که به کاهش زمان و هزینه اجرای فعالیت‌ها در اثر تکرار کمک می‌کنند [۴]. وانگ و همکاران (۲۰۰۷) از منحنی یادگیری برای پیش‌بینی عملکرد پیمانکاران استفاده کردند. در ارزیابی انجام شده، چهار نوع مدل مختلف برای منحنی یادگیری تحلیل شد و نتایج نشان داد که مدل هیپربولیک سه پارامتری از نظر دقت در پیش‌بینی عملکرد، بر سایر مدل‌ها برتری دارد. در این تحقیق رویکرد دو مرحله‌ای اورت و فارقال (۱۹۹۴) برای استفاده از منحنی یادگیری به کار گرفته شد [۱۴]. توماس (۲۰۰۹)، به بررسی منحنی یادگیری در ساخت و ساز پرداختند. در این پژوهش بیان شد که تحقق بهبود عملکرد ناشی از تکرار، مستلزم وجود چند شرط اساسی است: (۱) فعالیت موردنظر باید دارای سطحی از پیچیدگی باشد که امکان یادگیری و بهبود مهارت در طول زمان را فراهم کند؛ (۲) اجرای کار باید ماهیتی تکرارشونده داشته باشد تا روند یادگیری قابل وقوع باشد و (۳) مدیریت پروژه نیز باید محیطی پایدار و بدون نوسان ایجاد کند تا فرآیند پیشرفت و ارتقای کارایی مختل نشود [۷]. هاینز و اولیبا (۲۰۰۹) این موضوع را بررسی کردند که آیا استفاده از منحنی یادگیری قادر است زمان موردنیاز برای ساخت و اجرای شمع‌های بتنی پیش‌تنیده را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند یا خیر. یافته‌های پژوهش نشان داد که اگرچه تیم اجرایی با تکرار کار تا حدی بهبود عملکرد داشت، اما میزان این بهبود بسیار محدود و کم‌اثر بود. در این تحقیق از مدل خطی منحنی یادگیری استفاده شد [۱۵]. سان و منگ (۲۰۰۹)، اثرات دوباره‌کاری‌ها که موجب تأخیر زمانی و افزایش هزینه و کاهش کیفیت می‌شود را در ساختمان‌های زیادی مورد بررسی قرار دادند

[۱۶]. عابدین (۲۰۱۰)، مسائل مربوط به نارضایتی از اثرات مخرب پروژه‌های ساختمانی بر محیط زیست را در کشور مالزی مورد بررسی قرار داد و نشان داد که چگونه دولت می‌تواند با استفاده از افراد با تجربه و متخصص اقدامات پیشگیرانه‌ای را برای حفاظت از محیط‌زیست و مسایل اجتماعی بکار گیرد [۱۷]. هونگ (۲۰۱۰) نرخ یادگیری ۲۰ صنعت سنگاپور را در یک دوره ۲۷ ساله مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که تأثیر یادگیری در میان این صنایع یکسان نیست [۱۸]. جارکاس (۲۰۱۰) به بررسی نقش یادگیری در فعالیت آرماتوربندی در ۲۱ پروژه بلندمرتبه با سازه بتن مسلح پرداخت. در این مطالعه، پروژه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تا حد امکان سایر عوامل تأثیرگذار بر بهره‌وری نیروی کار ثابت بمانند و تنها اثر تکرار و یادگیری ارزیابی شود. داده‌ها به‌صورت واحدی تحلیل و مدل خطی برای برازش استفاده شد که نهایتاً نشان داد تأثیر یادگیری در این فعالیت بسیار محدود است [۵]. در ادامه، جارکاس و هورنر (۲۰۱۱) نیز بررسی کردند که تکراری بودن هندسه و ویژگی‌های طبقات یک ساختمان تا چه اندازه بر بهره‌وری فعالیت قالب‌بندی اثر می‌گذارد. آن‌ها اطلاعات مربوط به ۴۵ ساختمان چندطبقه بتنی را جمع‌آوری کرده و با بهره‌گیری از مدل خطی منحنی یادگیری و داده‌های میانگین تجمعی، تحلیل انجام دادند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که شواهد قابل‌توجهی از اثر یادگیری در فعالیت قالب‌بندی مشاهده نمی‌شود [۱۹]. بروکمن و برزینسکی (۲۰۱۵) به بررسی اثرات منحنی تجربه روی چهار پل در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ در بانکوک تایلند پرداختند. در این بررسی حتی اثرات تورم نیز لحاظ گردید و در نهایت به این نتیجه رسیدند که تجربه ۲۰ درصد در کاهش هزینه مؤثر بوده است [۲۰]. گراس و همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه منحنی یادگیری موجود برای مجموعه‌ای بزرگ از داده‌های تجربی به منظور ارزیابی منحنی‌های یادگیری پرداختند. در این مطالعه با استفاده از متاتگ‌ها (Meta-tags) و براساس نیکویی برازش داده‌ها و

نتایج سازگاری منحنی‌ها، مجموعه‌ای از ویژگی‌های داده / کار برای انتخاب یک منحنی یادگیری مناسب، شناسایی شده‌اند [۲۱]. مالیوس (۲۰۱۶)، به بررسی اثر منحنی یادگیری در برنامه‌ریزی پروژه‌ها پرداخته است. او نشان داد که با توجه به اثرات منحنی یادگیری می‌توان پیش‌بینی‌های آینده را در طول مدت پروژه انجام داد و در مقدار هزینه و زمان صرفه‌جویی کرد. همچنین، اگر این اثر در محاسبات روش‌های سنتی برنامه‌ریزی پروژه اعمال گردد نتایج قابل‌توجهی را ارائه خواهد داد. این اثرات برای فاکتور «زمان» به‌صورت الگوریتم نمایی بوده است [۲۲]. پاناس و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی استفاده از منحنی یادگیری برای برآورد بهره‌وری ساخت و ساز پرداختند. برای محاسبه مهارت کارگران در ساخت و ساز، یک ضریب فزاینده به عنوان یک ضریب افزایشی برای تخمین‌های بهره‌وری در اکثر روش‌های موجود امروزی، استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب مهارت کارگران بستگی به میزان یادگیری و تعیین نقطه تولید استاندارد دارد که نشان‌دهنده پایان دادن به پدیده یادگیری است [۲۳]. پودولوسکی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی پدیده «یادگیری و فراموشی» می‌پردازند، نه فقط یادگیری کارگران در طول زمان، بلکه این که چطور تجربه قبلی با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها نشان داده‌اند که با لحاظ کردن یادگیری و فراموشی، می‌توان برآورد هزینه نهایی پروژه را بهبود داد و زمان پروژه را دقیق‌تر پیش‌بینی کرد. مطالعه موردی بر روی پروژه چندواحدی انجام شده و داده‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی کاربردی و اثرگذار است [۲۴]. وازکوئز (a-۲۰۲۴) نشان می‌دهد که توزیع مدت زمان فعالیت‌ها در پروژه‌های ساخت دارای مقیاس‌پذیری توان‌پایه است، یعنی برخی فعالیت‌ها مقیاس‌های توانی دارند. او استدلال می‌کند که این توانی بودن ریشه در «تخصصی شدن تاریخی» فعالیت‌ها دارد؛ به‌تدریج فعالیت‌های بزرگ‌تر به فعالیت‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند که باعث کاهش زمان فعالیت‌ها می‌شود [۲۵]. وازکوئز (b-۲۰۲۴) یک توضیح نظری برای

این رو تمامی پروژه‌های مورد مطالعه از نوع سازه بتن آرمه بوده است. این پروژه‌ها شامل دو پروژه ساختمانی پنج طبقه، یک پروژه چهار طبقه و دو پروژه چهارده طبقه است. عموماً روی هر یک از پروژه‌ها مراحل شش‌گانه (۱) جمع‌آوری داده‌ها، (۲) بازخورد داده‌ها، (۳) تجزیه و تحلیل داده‌ها، (۴) برنامه‌ریزی عملی، (۵) اجرای و (۶) ارزیابی، انجام شد. نرخ تورم براساس مقدار اعلام شده بانک مرکزی ایران است.

۴- مدل توانی (خط راست)

این مدل، یکی از پرکاربردترین رویکردها برای به‌کارگیری منحنی یادگیری در پروژه‌های ساخت‌وساز محسوب می‌شود [۴]. علت نام‌گذاری آن به «مدل خط راست» این است که با ترسیم داده‌ها در مقیاس لگاریتمی، یا رسم لگاریتم مقادیر در صفحه دکارتی، نمودار حاصل به‌صورت یک خط مستقیم دیده می‌شود (شکل ۱). یکی از فرض‌های بنیادی این مدل آن است که نرخ یادگیری در طول اجرای فعالیت ثابت باقی می‌ماند. نسخه اولیه و کلاسیک این مدل که نخستین بار توسط رایت (۱۹۳۶) ارائه شد، به‌صورت مدل خطی مبتنی بر میانگین تجمعی بیان می‌شود و فرمول آن در رابطه ۱ آورده شده است [۲۸]:

$$Y_{ca} = AX^{-n} \quad (1)$$

که در آن، Y_{ca} میانگین تجمعی زمان یا هزینه، ساعت کارگر یا زمان برای تعداد X واحد تولید شده، A مقدار ثابت هزینه یا زمان لازم برای تولید و ساخت اولین واحد (اولین تکرار)، X تعداد واحدهای تولید شده (تعداد تکرارها) و n شیب منحنی لگاریتمی را نشان می‌دهند. فرم لگاریتمی معادله به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$\log Y_{ca} = \log A - n \log X \quad (2)$$

در این مدل، میزان بهبود بهره‌وری ناشی از یادگیری به نرخ یادگیری S وابسته است؛ نرخ که مقدار آن براساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در برخی منابع، این نرخ با نمادهای L یا Φ نشان داده شده است:

$$S = 2^{-n} \quad (3)$$

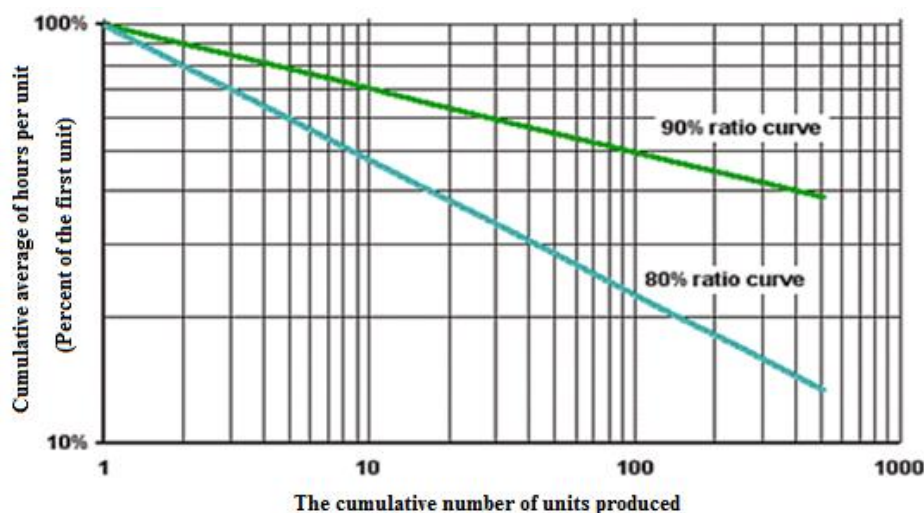
مدل زمان-هزینه کلاسیک «Bromilow» ارائه می‌دهد، که رابطه توانی بین زمان پروژه و هزینه آن دارد. او نشان می‌دهد که این رابطه توانی می‌تواند ناشی از «ماهیت فراکتالی» شبکه فعالیت‌ها در برنامه‌ریزی پروژه باشد، یعنی ساختار فعالیت‌ها یک ساختار خودتکرارشونده دارد. نتیجه مهم این است که پیش‌بینی مدت زمان پروژه براساس هزینه (یا برعکس) باید با توجه به ساختار شبکه فعالیت‌ها (Serial/Parallel) انجام شود، نه صرفاً بر پایه یک مدل تجربی ساده [۲۶]. سلمان و سودانگی (۲۰۲۵) یک مدل منحنی یادگیری را برای پروژه‌های ساخت تکرارشونده (مثل واحدهای مسکونی چندگانه) توسعه و نشان می‌دهند که اعمال اثر یادگیری می‌تواند در برآورد هزینه و زمان بسیار موثر باشد. مدل با استفاده از داده‌های تاریخی و ترکیب شبکه عصبی (ANN) و شاخص اهمیت نسبی (RII) ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با مدل یادگیری، زمان پروژه تا ۲۷٪ کاهش و هزینه نیروی کار تا ۳۶٪ صرفه‌جویی می‌شود (در مقایسه با روش‌های سنتی بدون در نظر گرفتن منحنی یادگیری) [۲۷].

۳- روش‌شناسی تحقیق

مبنا برای مطالعه پنج پروژه ساختمانی یک شرکت معتبر در تهران می‌باشند. این پروژه‌ها در یک دوره زمانی تقریباً ده‌ساله بین مارس ۲۰۰۶ و مارس ۲۰۱۷ ساخته شده‌اند. تحقیق در مورد این پنج پروژه به عنوان مطالعات موردی همراه با یک تجزیه و تحلیل بایگانی انجام شد. جمع‌آوری اطلاعات در این پنج پروژه از طریق اسناد، سوابق بایگانی، مصاحبه‌ها و مشاهده شرکت‌کنندگان بوده است. دوره اصلی جمع‌آوری داده‌ها از ماه جون تا آگوست ۲۰۲۴ به طول انجامید. در این مدت مصاحبه انجام و داده‌ها جمع‌آوری شد. اطلاعات در دسترس برای تحقیق، اطلاعات دقیق پروژه شامل داده‌های زمان و هزینه است. براساس بررسی آمار پروانه‌های ساختمانی سال‌های اخیر، درصد بالایی از ساختمان‌های ساخته شده به‌صورت ساختمان‌های بتن آرمه بوده است، از

نرخ منحنی یادگیری برابر با صد درصد باشد، به این معناست که هیچ پیشرفتی از محل یادگیری رخ نداده است.

نرخ منحنی یادگیری معمولاً به صورت درصدی گزارش می‌شود. هرچه این نرخ پایین‌تر باشد، میزان یادگیری و بهبود عملکرد در اثر تکرار بیش‌تر است. در مقابل، زمانی که



شکل ۱- منحنی یادگیری ترسیم شده در دستگاه مختصات لگاریتمی [۲۹].

$$S = \frac{\log \phi}{\log 2} \quad (5)$$

ذکر این نکته مهم است که مقدار ϕ در حالت محاسبات مربوط به میانگین تجمعی با مقدار ϕ در حالت محاسبات مربوط به داده واحد متفاوت بوده و هیچ ارتباطی با هم ندارند [۱۵].

۵- توصیف پروژه‌های ساختمانی مورد مطالعه

براساس بررسی مطالعات گذشته و روند انجام تحقیقات مختلف، ساخت یک ساختمان در این تحقیق به سه بخش کلی تفکیک شد و بنا شد برای هر بخش و نیز کل ساخت ساختمان، اثر یادگیری مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور اطلاعات مورد نیاز از پنج پروژه مختلف مربوط به یکی از شرکت‌های ساختمانی فعال در زمینه ساخت و ساز ساختمان در ایران گردآوری شده است. اطلاعات اولیه پروژه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نمایش داده شده است. به دلایل ناشناس بودن، در کل مطالعه پروژه‌ها به صورت A تا E نام‌گذاری شده‌اند. بخش‌های مورد بررسی در گردآوری اطلاعات

نظریه منحنی یادگیری در مدل خط راست هم می‌تواند برای هر واحد به صورت مستقل (روش داده واحد) و هم به شکل میانگین تجمعی زمان مورد نیاز برای تکمیل تعداد مشخصی از واحدها مورد استفاده قرار گیرد. در پروژه‌های ساخت‌وساز، معمولاً از روش میانگین تجمعی بهره گرفته می‌شود. زمان میانگین تجمعی نشان‌دهنده متوسط زمان لازم برای تکمیل تعداد مشخصی از واحدها است و با تقسیم مجموع زمان کل صرف‌شده برای تولید آن تعداد واحد بر تعداد واحدهای ساخته‌شده محاسبه می‌شود [۱۵]. در رابطه ۴ معادله زمان میانگین تجمعی آورده شده است:

$$(CAT)_N = K_c (N)^s \quad (4)$$

که در آن، $(CAT)_N$ زمان میانگین تجمعی برای تولید N واحد را نمایش می‌دهد و K_c مقدار ثابتی است که زمان نظری لازم برای ساخت اولین واحد را نشان می‌دهد. ϕ نرخ یادگیری برای تولید دو برابر را نمایش می‌دهد و شیب منحنی لگاریتمی با نماد S نشان داده می‌شود که مقدار آن از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

- ساخت، که در واقع مراحل ساخت ساختمان از نقطه نظر این تحقیق است به شرح زیر در نظر گرفته شده است:
- **بخش ۱:** تجهیز کارگاه و فونداسیون؛
 - **بخش ۲:** سفت کاری: که این بخش به طور کلی اسکلت سازه است که شامل آرماتوربندی و قالب بندی ستون ها و دیوار برشی بتن ریزی طبقات و آرماتوربندی و قالب بندی تیرها و سقف ها و بتن ریزی طبقات و تیغه چینی و ... است.
 - **بخش ۳:** نازک کاری و اتمام پروژه.
- در جدول ۲، اطلاعات استخراج شده از پنج پروژه ساختمانی که براساس گزارشات پیشرفت پروژه و نیز
- مصاحبه با مهندسین اجرا و مسئولین شرکت مهندسی سازنده پروژه ها به دست آمده اند به تفکیک بخش ها ارائه داده شده اند. در جدول ۳ نیز شمای کلی از زمان بندی ساخت پروژه ها نمایش داده است. تمامی پروژه های مورد مطالعه از نوع سازه بتن آرمه می باشند. از بین این پروژه ها، دو پروژه همان طور که در جدول زمان بندی ۳ مشاهده می شود در حدود ده ماه هم پوشانی زمانی داشته اند. تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده در این بخش به دو بخش کلی تقسیم شده است، ابتدا این تحلیل ها به منظور ارزیابی اثر تجربه و یادگیری بر زمان ساخت و در بخش دیگر بر هزینه ساخت صورت پذیرفته است.

جدول ۱- اطلاعات اولیه پروژه های مورد مطالعه

Characteristic feature	Project A	Project B	Project C	Project D	Project E
location	Tehran, Iran	Tehran, Iran	Tehran, Iran	Tehran, Iran	Tehran, Iran
Number of floors	5	5	4	14	14
Project deck area	940 m ²	1150 m ²	670 m ²	1105 m ²	1782 m ²
Construction time (week)	68.14	61.14	62.29	183.43	187.57

جدول ۲- اطلاعات پروژه های ساختمانی مورد مطالعه به تفکیک بخش ها.

Construction sections	Construction time		Project area (m ²)	Number of floors
	Day	Week		
Project A				
Section 1- Equipping workshop and foundation	41	5.86	-	-
Section 2 - Hardening	205	29.29	-	-
Section 3 - Joinery and Finishing	231	33	-	-
The entire project	477	68.14	940	5
Project B				
Section 1- Equipping workshop and foundation	36	5.14	-	-
Section 2 - Hardening	188	26.86	-	-
Section 3 - Joinery and Finishing	204	29.14	-	-
The entire project	428	61.14	1150	5
Project C				
Section 1- Equipping workshop and foundation	21	3	-	-
Section 2 - Hardening	161	23	-	-
Section 3 - Joinery and Finishing	254	36.29	-	-
The entire project	436	62.29	670	4
Project D				
Section 1- Equipping workshop and foundation	153	21.86	-	-
Section 2 - Hardening	495	70.71	-	-
Section 3 - Joinery and Finishing	636	90.86	-	-
The entire project	1284	183.43	1105	14
Project E				
Section 1- Equipping workshop and foundation	191	27.29	-	-
Section 2 - Hardening	508	72.57	-	-
Section 3 - Joinery and Finishing	614	87.71	-	-
The entire project	1313	187.57	1782	14

جدول ۳- شمای کلی زمان‌بندی ساخت پنج پروژه مورد مطالعه

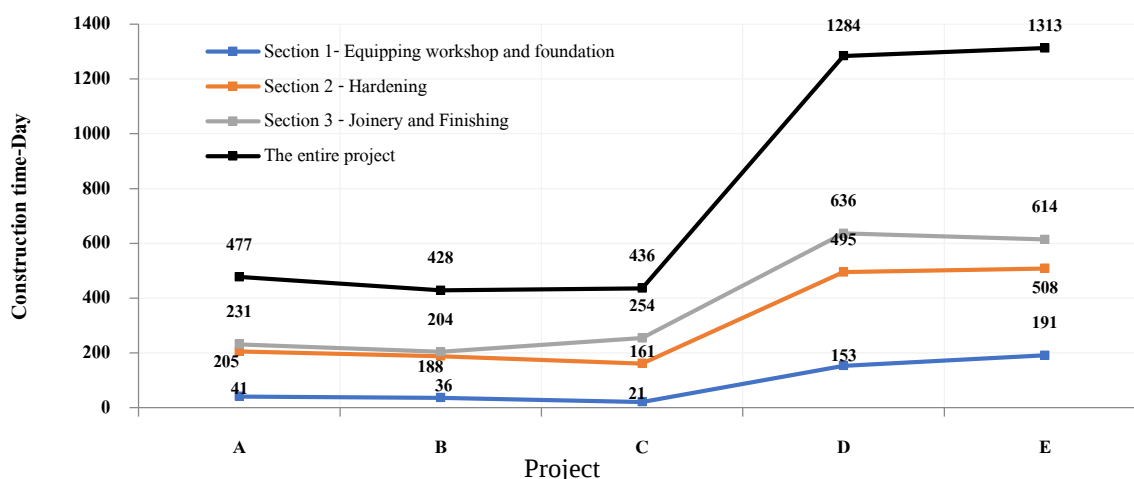
Project	Duration	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
A	68.14w												
B	61.14w												
C	62.29w												
D	183.43w												
E	187.57w												

۶- اثر تجربه بر زمان و هزینه ساخت

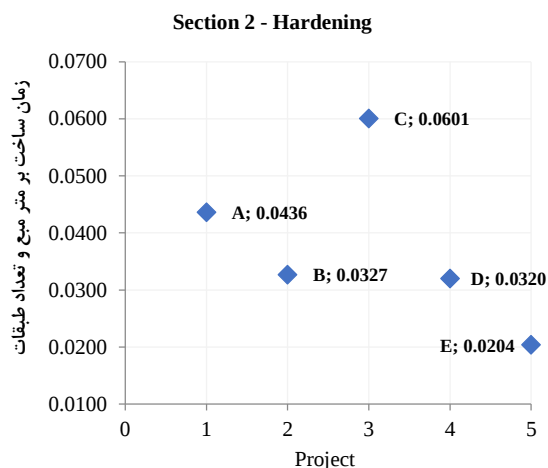
۶-۱- ارزیابی اثر تجربه بر زمان ساخت

برای ارزیابی اثر تجربه بر زمان ساخت، ابتدا در شکل ۲ تغییرات زمان ساخت پنج پروژه مورد مطالعه به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمان ساخت برای پروژه‌های مختلف از نقطه نظر مترآژ و تعداد طبقات متفاوت هستند. به منظور یکسان‌سازی و حذف تغییرات زمان ساخت در مراحل مختلف پروژه براساس تغییرات مترآژ و نیز تعداد طبقات در این مطالعه، زمان ساخت بر مترآژ و نیز تعداد طبقات تقسیم شده است. در شکل‌های ۳ الی ۷، تغییرات روند زمان ساخت برحسب روز با توجه به مترآژ و تعداد طبقات برای هر پروژه به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷، مشاهده شده است روند

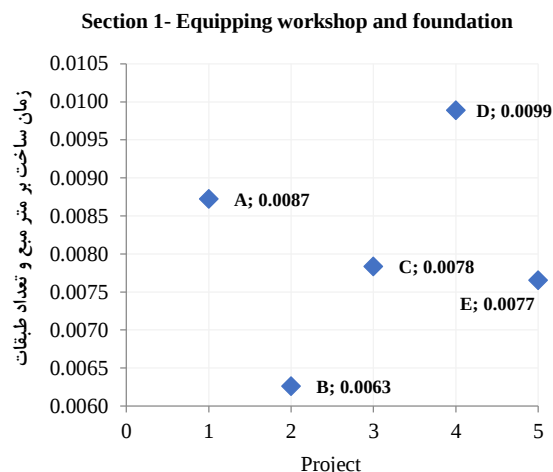
تغییرات زمانی برای پروژه‌های مختلف به صورت نزولی بوده است به جز برای پروژه C. علت افزایش قابل توجه در زمان این پروژه هم‌پوشانی آن با پروژه D بوده است. پروژه C پروژه ساختمانی چهار طبقه بوده که مطابق با جدول ۳، در حدود چهار ماه پس از شروع این پروژه، پروژه D که ساختمانی ۱۴ طبقه بوده، آغاز شده است. گروه پیمانکاری به منظور اولویت دادن به پروژه D پروژه ساختمانی چهار طبقه C را با تأخیر به پایان رساندند تا پروژه D مطابق برنامه‌ریزی کارفرما پیش رود. بنابراین، اگر پروژه C را از مجموعه ساخت و سازی حذف شود شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده روند زمانی ساخت و ساز این شرکت خواهد بود. توجه داشته باشید که این روند کاملاً دقیق نیست چراکه در زمان‌بندی پروژه D پیشرفت پروژه C نیز اثرگذار بوده و موجب کمی تأخیر در پروژه D نیز شده است.



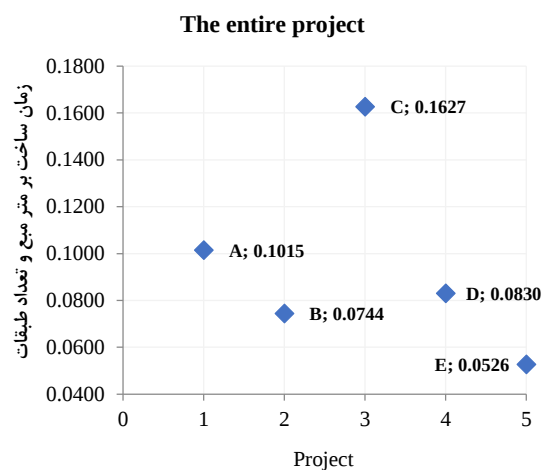
شکل ۲- تغییرات زمان ساخت پروژه‌های مختلف مورد بررسی برحسب روز.



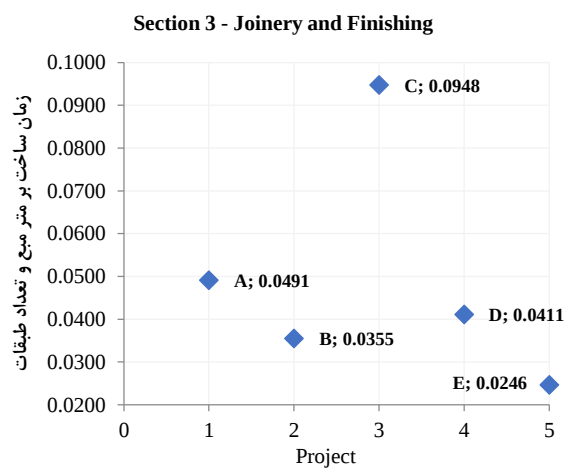
شکل ۴- زمان ساخت بر مترمربع و تعداد طبقات برای بخش دو- سفت کاری.



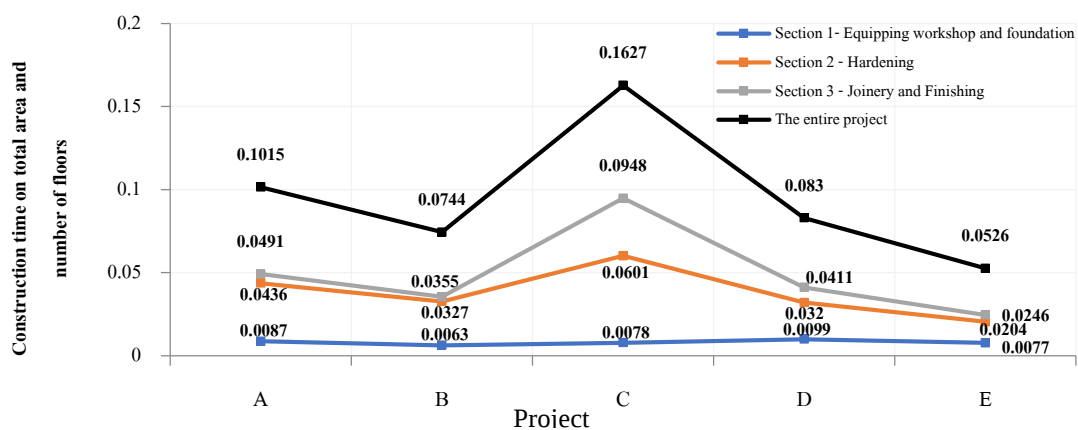
شکل ۳- زمان ساخت بر مترمربع و تعداد طبقات برای بخش یک- تجهیز کارگاه و فونداسیون.



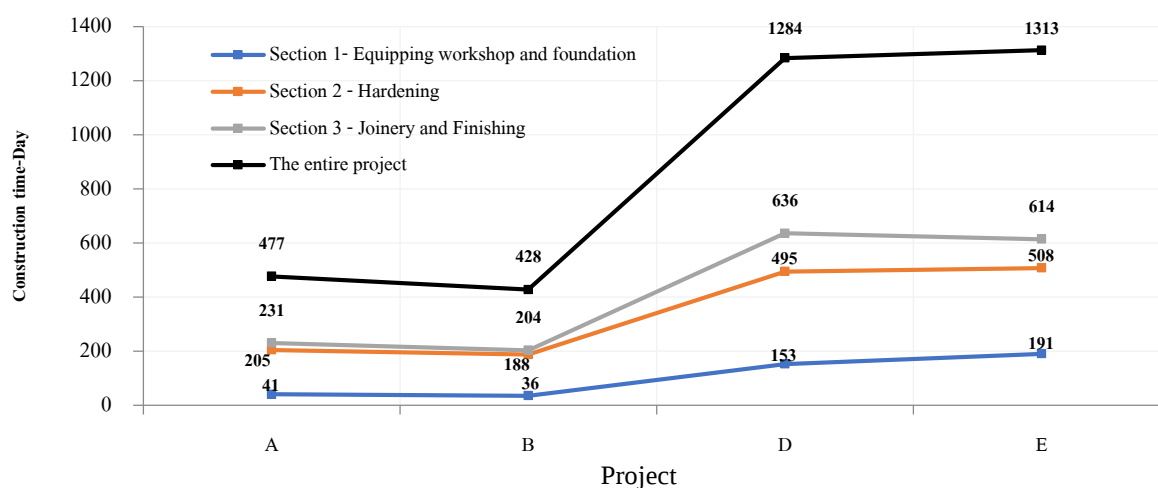
شکل ۶- زمان ساخت بر مترمربع و تعداد طبقات برای کل پروژه.



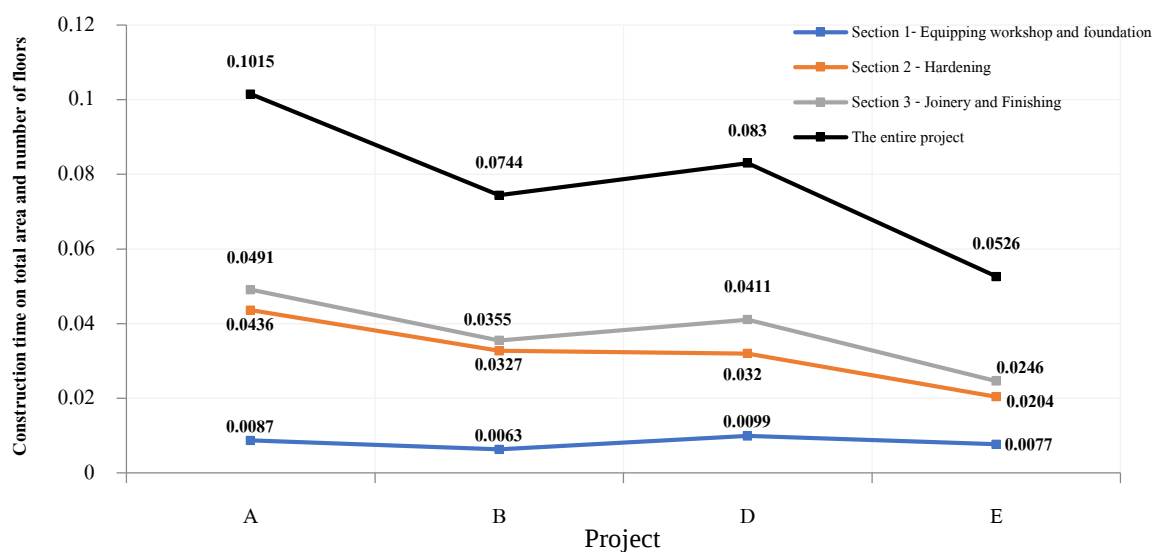
شکل ۵- زمان ساخت بر مترمربع و تعداد طبقات برای بخش سه- نازک کاری و اتمام.



شکل ۷- تغییرات زمان ساخت پروژه‌های مختلف مورد مطالعه برحسب روز بر مترمربع و تعداد طبقات.



شکل ۸- روند زمان انجام پروژه‌های A، B، D و E برحسب روز.



شکل ۹- روند زمان انجام پروژه‌های A، B، D و E برحسب متراف و طبقات

زمان ساخت پروژه‌ها و بخش‌های مختلف آن را نسبت به پروژه مرجع A نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه‌شده در ستون‌های A/B، A/C، A/D و A/E از نسبت زمان پروژه مرجع به زمان پروژه مورد مقایسه محاسبه شده‌اند. بنابراین، مقادیر بزرگ‌تر از ۱۰۰ درصد به معنای کاهش زمان اجرای پروژه‌های بعدی نسبت به پروژه مرجع بوده و بیانگر وجود اثر یادگیری هستند، نه افزایش زمان ساخت. به عنوان مثال، مقدار ۱۳۶/۳۵ درصد برای کل پروژه در مقایسه A/B نشان می‌دهد که زمان اجرای پروژه B حدود ۲۶/۷ درصد کمتر از پروژه A بوده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود بیش‌ترین کاهش زمان ساخت در پروژه‌های B و E مشاهده می‌شود. با مصاحبه از مسئولین پروژه مشخص شد که پروژه‌های B و E با فاصله زمانی اندک پس از پروژه‌های A و D آغاز شده و با همان گروه‌های سازندگان (کارگران، آرماتوربند و غیره) کار ساخت و ساز انجام گرفته است و بیش‌ترین هماهنگی‌ها در دو پروژه B و E مشاهده شده است. از طرفی نقشه‌های معماری و سازه‌ای دو پروژه مذکور نیز تقریباً با پروژه‌های A و D یکسان بوده که این خود نیز بر سرعت انجام کار افزوده است. جدول ۴ شاخص تغییرات

جدول ۴- درصد تغییرات زمان اتمام پروژه‌ها و بخش‌های مختلف آن نسبت به پروژه A.

Construction sections	A	B	C	D	E	Percentage of changes			
						A B	A C	A D	A E
Section 1- Equipping workshop and foundation	0.0087	0.0063	0.0078	0.0099	0.0077	139.33%	111.33%	88.2%	113.94%
Section 2 - Hardening	0.0436	0.0327	0.0601	0.032	0.0204	133.4%	72.6%	136.31%	214.2%
Section 3 - Joinery and Finishing	0.0491	0.0355	0.0948	0.0411	0.0246	138.53%	51.86%	119.55%	199.7%
The entire project	0.1015	0.0744	0.1627	0.083	0.0526	136.35%	62.38%	122.28%	192.84%

مسئولین پروژه‌ها مشخص شد که پروژه A اولین ساختمان پنج طبقه و پروژه D نیز اولین ساختمان ۱۴ طبقه این گروه عمرانی بوده است. بنابراین همان‌طور که در یافته‌های این مطالعه مشخص است بیش‌ترین اثر یادگیری را می‌توان در پروژه‌های مشابه B و E که تقریباً بلافاصله بعد از پروژه‌های A و D انجام گرفته مشاهده کرد. اگر اثر تجربه فقط بر پروژه‌های مشابه محاسبه شود یعنی زمان ساخت مراحل ساختمان B نسبت به A و ساختمان E نسبت به D مقایسه شود، درصد تغییرات متفاوت با قبل است که در جدول ۵ نشان داده شده است.

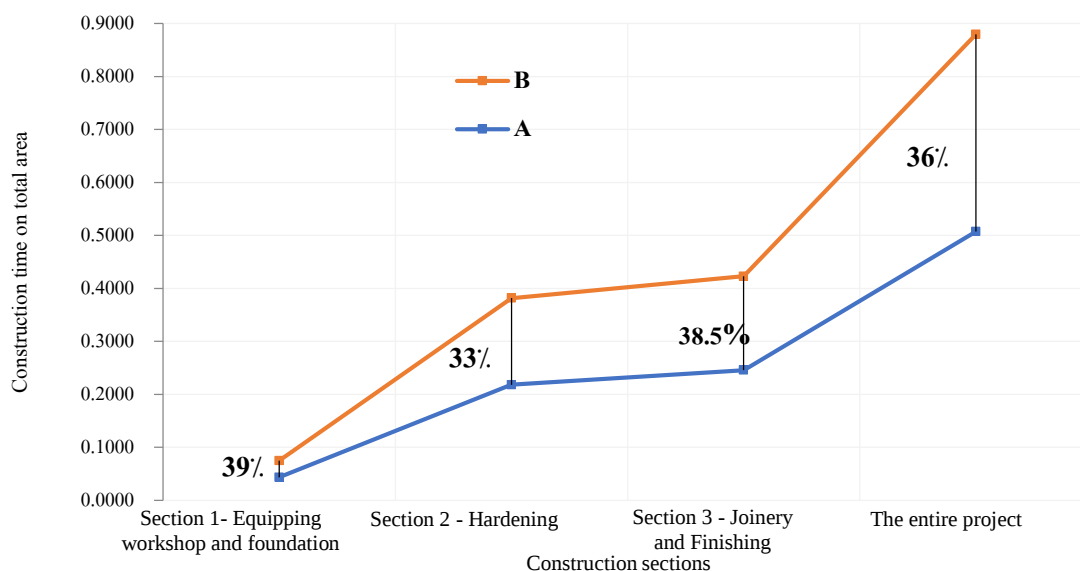
همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در مورد پروژه C، بخش اول پروژه که هنوز هم‌زمان با پروژه D آغاز نشده بود، درصد تغییر زمان اتمام براساس یادگیری برابر ۱۱٪ بوده است، اما با هم‌پوشانی بخش‌های دیگر این پروژه با پروژه D، زمان اتمام پروژه C با افت زمانی همراه بوده است. همچنین، این افت زمانی را می‌توان در بخش اول پروژه D نیز مشاهده کرد که ناشی از همان هم‌پوشانی زمانی است. در رابطه با درصد تغییرات زمان اتمام مراحل مختلف پروژه‌ها و نیز کل پروژه، لازم به ذکر است که درست است اثر تجربه از پروژه‌های پیشین برای تمام پروژه‌های A تا E وجود داشته است ولی با مصاحبه از

جدول ۵- درصد تغییرات زمان اتمام پروژه‌ها و بخش‌های مختلف مشابه نسبت به یکدیگر.

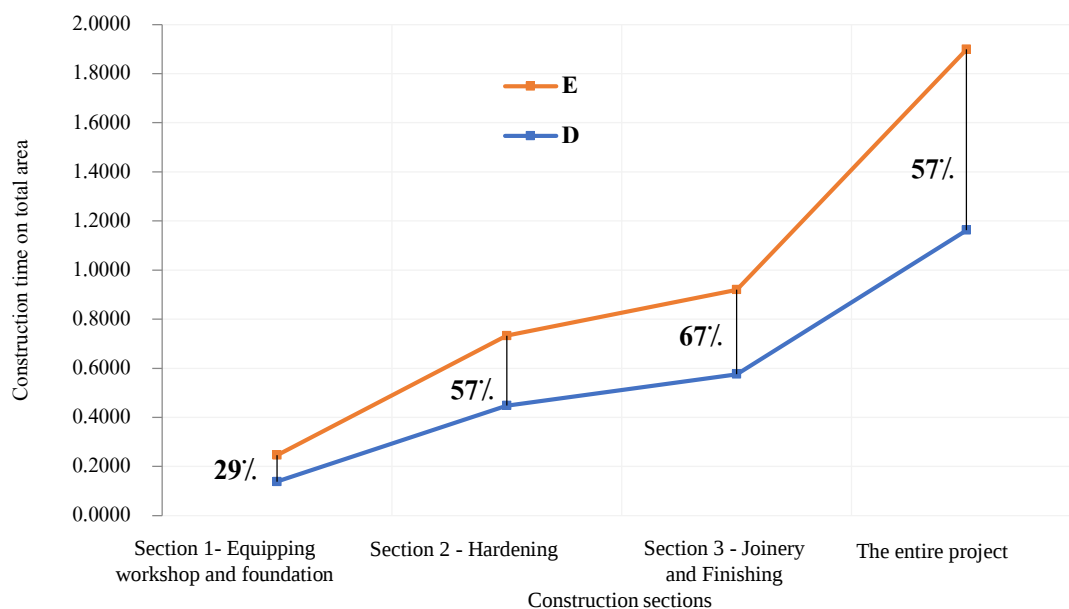
Construction sections	A	B	D	E	Percentage of changes	
					A B	D E
Section 1- Equipping workshop and foundation	0.0436	0.0313	0.1385	0.1072	139.33%	129.18%
Section 2 - Hardening	0.2181	0.1635	0.448	0.2851	133.4%	157.14%
Section 3 - Joinery and Finishing	0.2457	0.1774	0.5756	0.3446	138.53%	167.05%
The entire project	0.5074	0.3722	1.162	0.7368	136.35%	157.71%

پروژه‌های D و E نیز یکسان بوده‌اند. یعنی بدون در نظر داشتن میزان تجربه گروه سازنده از پروژه‌هایی که پیش از این کار کرده بودند، برای پروژه‌های مشابه B و E اثر یادگیری قابل توجهی به‌دست آمده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ این تغییرات را به‌صورت گرافیکی نشان داده‌اند.

با در نظر داشتن نتایج جدول ۵، می‌توان به اثر تجربه بر روند زمان ساخت پروژه‌های ساختمانی به‌طور کاملاً دقیق دست پیدا کرد. پروژه‌های A و B و نیز پروژه‌های D و E، دارای نقشه‌های معماری و سازه‌ای تقریباً مشابه بوده و گروه سازنده پروژه‌های A و B یکسان بوده و گروه سازنده



شکل ۱۰- میزان تغییرات زمان ساخت پروژه‌های مشابه پنج طبقه A و B.



شکل ۱۱- میزان تغییرات زمان ساخت پروژه‌های مشابه ۱۴ طبقه D و E.

طرف دیگر مشخص نیست که چقدر تجربه از پروژه‌های پیشین به پروژه A رسیده است. با مصاحبه از مسئولین ساخت و ساز پروژه‌های مورد بررسی مشخص شد که پروژه A اولین پروژه پنج طبقه آن‌ها بوده و پروژه‌های پیش از آن کمتر از پنج طبقه بوده است. از آنجا که اطلاعات کمی از پروژه‌های پیش از پروژه A در دسترس نبود، مقدار

در این مطالعه از مدل توانی یا مدل خط راست برای تعیین میزان نرخ یادگیری استفاده شده است. پیش از محاسبات مربوط به نرخ یادگیری باید برای هر بخش از پروژه‌های A تا E به صورت تجمعی زمان‌های اتمام پروژه‌ها را به دست آورد. برای این کار فرض می‌شود که اثرات تجربه به ۵۰٪ پروژه فعلی اضافه می‌گردد [۲۰]. از

پروژه A بوده‌اند؛ بنابراین، این مقدار به عنوان مبنا در محاسبات تجمعی در نظر گرفته شد. این موارد میزان تجمعی زمان بر مترآژ بر طبقات پروژه‌های مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۶ آورده شده است.

اولیه مورد نیاز برای شروع محاسبات منحنی یادگیری براساس نظر خبرگان و مصاحبه با مدیران اجرایی شرکت تعیین گردید. براساس برآورد ایشان، پروژه‌های پیشین که عمدتاً ساختمان‌های کم‌ارتفاع‌تر بوده‌اند، دارای زمان ساخت واحد سطح - طبقه‌ای حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از

جدول ۶- میزان تجمعی زمان بر مترآژ بر طبقات پروژه‌های مورد مطالعه.

	Section 1- Equipping workshop and foundation	Cumulative value	Section 2 - Hardening	Cumulative value	Section 3 - Joinery and Finishing	Cumulative value	The entire project	Cumulative value
Starting point	0.0105	0.0105	0.0523	0.0523	0.059	0.0649	0.1218	0.134
Project A	0.0087	0.0096	0.0436	0.048	0.0491	0.0541	0.1015	0.1116
Project B	0.0063	0.0085	0.0327	0.0429	0.0355	0.0479	0.0744	0.0992
Project C	0.0078	0.0083	0.0601	0.0472	0.0948	0.0596	0.1627	0.1151
Project D	0.0099	0.0086	0.032	0.0441	0.0411	0.0559	0.083	0.1087
Project E	0.0077	0.0085	0.0204	0.0402	0.0246	0.0507	0.0526	0.0993

حاصل از برازش مدل یادگیری بر روی داده‌ها بیانگر گرایش کلی کاهش زمان تجمعی به ازای افزایش تجربه اجرایی است. بنابراین، اگرچه پراکندگی محدودی در برخی نقاط وجود دارد، روند کلی داده‌ها هم‌چنان مؤید وجود اثر یادگیری در پروژه‌های مورد مطالعه بوده و محاسبات نرخ یادگیری بر مبنای این روند کلی انجام شده است.

پس از به‌دست آوردن مقادیر تجمعی باید براساس معادلات تابع توانی (خط راست) به محاسبه نرخ یادگیری پرداخت. در این مطالعه، در جدول‌های ۷ تا ۱۰ محاسبات مربوط به نرخ یادگیری برای هر بخش از پروژه‌های مورد مطالعه و کل پروژه‌ها ارائه شده است. در این جداول، Y مقدار تجمعی پروژه آخر یا n ام، A مقدار تجمعی پروژه اول، X تعداد پروژه‌ها، n شیب تابع در حالت نمایی یا لگاریتمی را نشان می‌دهند. هم‌چنین، مقدار نرخ یادگیری نیز از رابطه $S = 2^{-n}$ به‌دست آمده است. علاوه براین، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، منحنی‌های تجربه مرتبط با هر بخش از پروژه‌های مورد مطالعه و کل پروژه‌ها نمایش داده شده است. براساس مقادیر به‌دست آمده در تجزیه و تحلیل اطلاعات، مقادیر نرخ یادگیری کل پروژه‌ها در بازه ۸۲/۷۵

به منظور تعیین یک نقطه آغازین، فرض شده است که در حدود ۱۲٪ پروژه A در پروژه‌های پیشین به‌صورت فرضی زمان بر مترآژ بر طبقات به‌طور میانگین صرف شده باشد. بنابراین 0.007 روز بر مترآژ بر طبقات برای نقطه آغازین به‌دست آمده است (نقطه آغازین $= 0.007 \times 1.2 = 0.0084$). هم‌چنین، برای محاسبه مقادیر تجمعی باید میزان تجربه پیشین به ۵۰٪ پروژه فعلی اضافه شود. لازم به ذکر است که مقادیر تجمعی ارائه‌شده در جدول ۶ دارای روند کاملاً یکنواخت و نزولی نیستند و در برخی پروژه‌ها نوساناتی مشاهده می‌شود. این موضوع به ماهیت پروژه‌محور صنعت ساختمان باز می‌گردد؛ به‌طوری‌که پروژه‌های مورد مطالعه از نظر تعداد طبقات، مترآژ زیربنا، شرایط اجرایی، زمان‌بندی، تخصیص منابع انسانی و تجهیزاتی و هم‌چنین هم‌پوشانی زمانی اجرای پروژه‌ها یکسان نبوده‌اند. به عنوان مثال، هم‌پوشانی زمانی اجرای پروژه‌های C و D می‌تواند بخشی از نوسانات مشاهده‌شده را توجیه نماید. از این‌رو انتظار نمی‌رود داده‌های خام تجمعی همانند محیط‌های تولید انبوه دارای روند کاملاً یکنواخت باشند. با این‌حال، همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، منحنی تجربه

تا ۹۲/۶۹ درصد قرار داشته و برای پروژه نهایی برابر با ۸۹/۱۰٪ محاسبه شد. این بدان معنی است که در صورت تولید دو برابر، ۱۰٪ از زمان ساخت برحسب یک مترمربع برای هر طبقه کاسته خواهد شد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، هرچه نرخ یادگیری بیش‌تر باشد بدین معنی است که یادگیری از پروژه‌های پیشین به مقدار زیادی انتقال یافته است و کادر اجرایی گروهی مجرب و ماهر هستند. این مقوله برای گروه عمرانی مورد بررسی نیز صدق کرده است به طوری که ۹۰٪ از تجربه پروژه‌های پیشین را در پروژه‌های مورد بررسی، استفاده کرده‌اند.

جدول ۷- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به بخش اول- تجهیز کارگاه و فونداسیون.

Section 1- Equipping workshop and foundation	Cumulative value	log Y	log A	Log (X)	(n)	S	Learning-Time (%)
Starting point	0.0105	-	-1.98013	-	-0.125531	0.9167	-
Project A	0.0096	-2.01792	-2.01792	0.301	-0.191273	0.8758	91.67%
Project B	0.0085	-2.07139	-2.07139	0.4771	-0.165494	0.8916	87.58%
Project C	0.0083	-2.07977	-2.07977	0.6021	-0.119564	0.9205	89.16%
Project D	0.0086	-2.0637	-2.0637	0.699	-0.118052	0.9214	92.05%
Project E	0.0085	-2.072		0.7782			92.14%

جدول ۸- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به بخش دوم- سفت‌کاری.

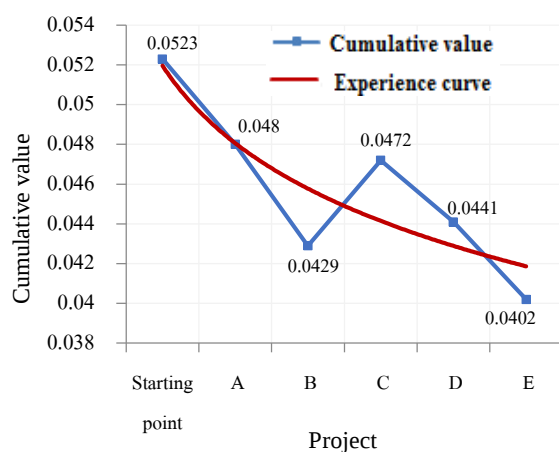
Section 2 - Hardening	Cumulative value	log Y	log A	Log (X)	(n)	S	Learning-Time (%)
Starting point	0.0523	-	-1.28116	-	-0.12553	0.9167	-
Project A	0.048	-1.31895	-1.31895	0.301	-0.18138	0.8819	91.67%
Project B	0.0429	-1.3677	-1.3677	0.4771	-0.07485	0.9494	88.19%
Project C	0.0472	-1.32622	-1.32622	0.6021	-0.10581	0.9293	94.94%
Project D	0.0441	-1.35512	-1.35512	0.699	-0.14755	0.9028	92.93%
Project E	0.0402	-1.39598		0.7782			90.28%

جدول ۹- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به بخش سوم- نازک‌کاری و اتمام.

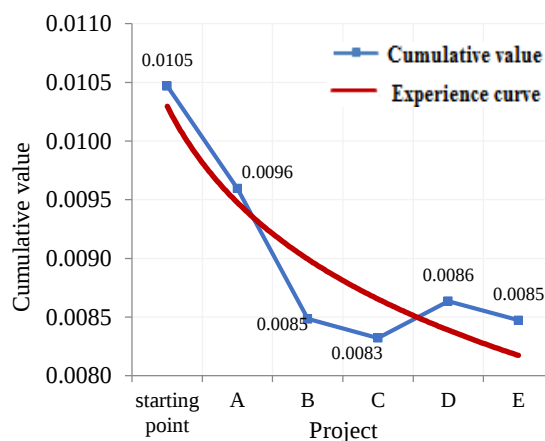
Section 3 - Joinery and Finishing	Cumulative value	log Y	log A	Log (X)	(n)	S	Learning-Time (%)
Starting point	0.0649	-	-1.18791	-	-0.26303	0.8333	-
Project A	0.0541	-1.26709	-1.26709	0.301	-0.27674	0.8255	83.33%
Project B	0.0479	-1.31995	-1.31995	0.4771	-0.06125	0.9584	82.55%
Project C	0.0596	-1.22479	-1.22479	0.6021	-0.09254	0.9379	95.84%
Project D	0.0559	-1.2526	-1.2526	0.699	-0.13778	0.9089	93.79%
Project E	0.0507	-1.29513		0.7782			90.89%

جدول ۱۰- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به کل پروژه.

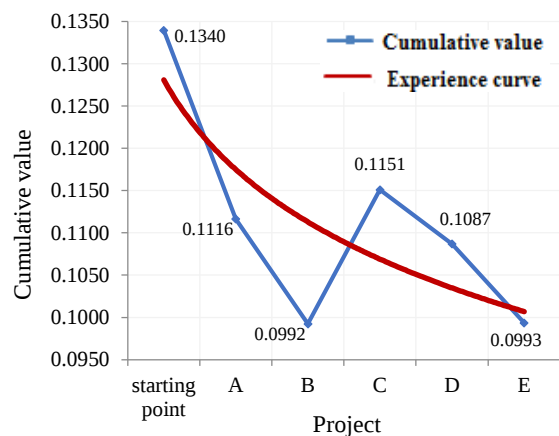
The entire project	Cumulative value	log Y	log A	Log (X)	(n)	S	Learning-Time (%)
Starting point	0.134	-	-0.873	-	-0.26303	0.8333	-
Project A	0.1116	-0.9522	-0.9522	0.301	-0.27314	0.8275	83.33%
Project B	0.0992	-1.0033	-1.0033	0.4771	-0.10949	0.9269	82.75%
Project C	0.1151	-0.9389	-0.9389	0.6021	-0.12997	0.9138	92.69%
Project D	0.1087	-0.9639	-0.9639	0.699	-0.16691	0.8907	91.38%
Project E	0.0993	-1.0029		0.7782			89.1%



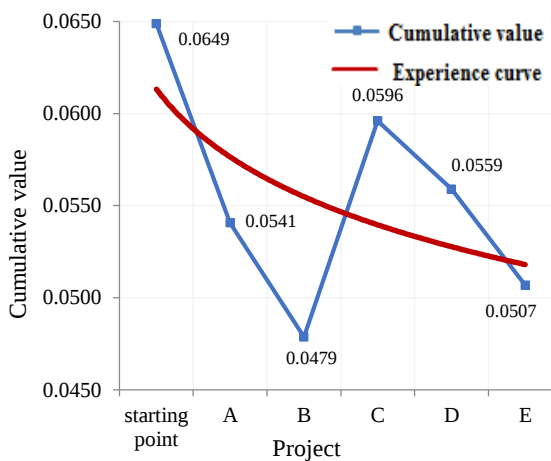
شکل ۱۳- منحنی تجربه مربوط به بخش دوم- سفت کاری.



شکل ۱۲- منحنی تجربه مربوط به بخش اول- تجهیز کارگاه و فونداسیون.



شکل ۱۵- منحنی تجربه مربوط به کل پروژه.



شکل ۱۴- منحنی تجربه مربوط به بخش سوم- نازک کاری و اتمام.

۶-۲- ارزیابی اثر تجربه بر هزینه ساخت

به منظور بررسی اثر تجربه روی هزینه‌های ساخت، باید به بررسی هزینه ساخت پروژه‌های A تا E پرداخته شود. بر اساس مستندات موجود در شرکت عمرانی مورد بررسی و نیز مصاحبه با مسئولین ساخت پروژه‌ها اطلاعات قیمت

پروژه‌ها به‌طور تقریبی به‌دست آمد ولی قیمت ساخت هر بخش از پروژه‌ها در دسترس نبود، لذا اثر تجربه بر ساخت برای هر مترمربع از پروژه محاسبه شد. برای این منظور، ابتدا مقدار تورم سال‌های مورد بررسی را تعیین گردید. در جدول ۱۱ تورم سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ که توسط بانک مرکزی کشور اعلام شده است نشان داده شده است.

جدول ۱۱- تورم سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ (بانک ملی مرکزی ایران).

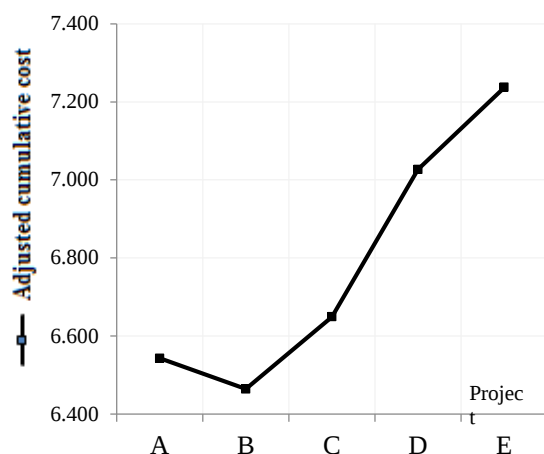
Year	Inflation rate	Year	Inflation rate
2006	11.9	2012	30.5
2007	18.4	2013	34.7
2008	25.4	2014	15.6
2009	10.8	2015	11.9
2010	12.4	2016	9
2011	21.5	2017	9.6

با توجه به جدول زمان‌بندی ۳، برای سال‌های ساخت پروژه‌های مختلف، میانگین نرخ تورم برای سال‌های ساخت در نظر گرفته شده است. پروژه A از میانگین تورم سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷، پروژه B میانگین تورم سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹، پروژه C میانگین تورم سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ و برای پروژه D میانگین تورم سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ و برای پروژه E میانگین تورم سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. جدول ۱۲ اطلاعات هزینه ساخت پروژه‌های مختلف مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر هزینه‌های اعلام شده از مصاحبه با مسئولین و برگرفته از اسناد موجود در شرکت عمرانی مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به

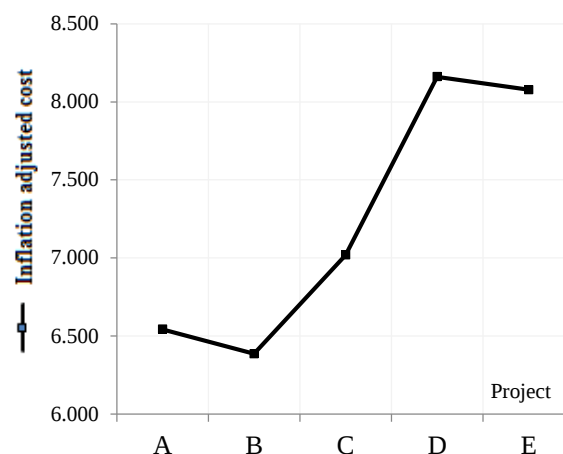
مقادیر به‌دست آمده در این جدول، مقادیر هزینه تعدیل شده و نیز میانگین تجمعی هزینه‌های تعدیل شده مربوط به پروژه‌ها در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می‌توان مشاهده کرد که هزینه‌های تعدیل شده براساس تورم و هزینه‌های تجمعی تعدیل شده پروژه‌ها سیر صعودی داشته‌اند. در توجیه این مساله باید در نظر داشت که صنعت ساختمان‌سازی دارای تنوع بسیار زیادی در کاربرد نوع مصالح به خصوص در بخش نازک‌کاری است که بخش قابل‌توجهی از ساخت هر ساختمانی را شامل می‌شود. نوع و کیفیت مصالح مورد استفاده در هر ساختمان می‌تواند کاملاً متفاوت باشد و اثر آن به‌صورت مستقیم در هزینه قابل مشاهده است.

جدول ۱۲- هزینه‌های تقریبی پروژه‌های مورد مطالعه.

Project	Construction cost (million rials)	Construction cost (million rials/m ²)	Year of construction	Average inflation rate	Inflation Adjusted Costs	Adjusted cumulative cost (million rials/m ²)
A	6150	6.543	2006-2007	0.1515	6.543	6.543
B	7560	6.574	2008-2009	0.181	6.386	6.464
C	4550	6.791	2009-2010	0.116	7.018	6.649
D	9885	8.946	2010-2013	0.2478	8.161	7.027
E	14540	8.159	2013-2017	0.1616	8.077	7.237



شکل ۱۷- نمودار هزینه‌های تجمعی تعدیل شده پروژه‌های مورد بررسی.



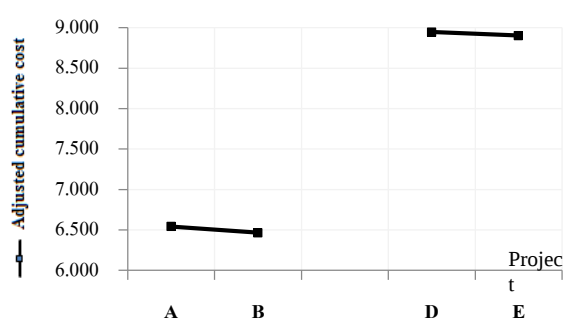
شکل ۱۶- نمودار هزینه‌های تعدیل شده تورم برای پروژه‌های مورد بررسی.

تعدیل شده و نیز هزینه‌های تجمعی تعدیل شده مربوط به این پروژه‌ها در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده‌اند. با در نظر گرفتن توضیحات ارائه شده جهت تعیین نرخ یادگیری برای زمان ساخت و با توجه به محاسبات انجام شده در بخش قبلی، در جداول ۱۴ و ۱۵، محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به هزینه پروژه‌های A و B و همچنین پروژه‌های E و D ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که مقادیر نرخ یادگیری بین ۹۸/۸۰ تا ۹۹/۵۳ درصد محاسبه شد که این بدین معنا است که اثر یادگیری بر هزینه ساخت بسیار محدود بوده و کاهش محسوسی در هزینه واحد با افزایش تجربه پروژه‌ها مشاهده نشده است. بنابراین، برخلاف متغیر زمان، شواهد کافی برای وجود اثر یادگیری قابل توجه در هزینه ساخت مشاهده نگردید. به عبارت دیگر، این نتایج بیانگر آن است که تغییرات هزینه ساخت بیش از آنکه تحت تأثیر تجربه اجرایی قرار گیرد، احتمالاً متأثر از عوامل بیرونی نظیر نوسانات قیمت مصالح، دستمزد نیروی انسانی و شرایط اقتصادی بوده است.

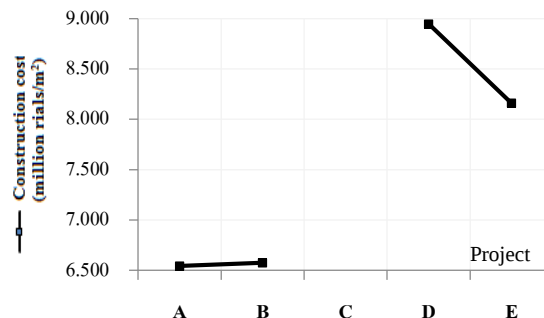
با در نظر داشتن این موضوع باید به تعریف اثر تجربه بر منحنی یادگیری نیز دقت داشت. به این معنی که منحنی یادگیری اثر یادگیری را در تکرار پروژه‌های کاملاً یکسان مورد بررسی قرار می‌دهد. بنابراین نمی‌توان برای پروژه‌های با هزینه‌های مختلف انتظار داشت تا اثر یادگیری را بررسی کرد. در نتیجه، در این مطالعه اثر یادگیری در هزینه ساخت ساختمان‌های پروژه A و B و نیز پروژه‌های D و E که تقریباً از لحاظ ساختاری یکسان هستند مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به دلیل محدود بودن تعداد پروژه‌های کاملاً مشابه در مجموعه داده‌های مورد مطالعه، تحلیل اثر یادگیری بر هزینه ساخت تنها برای دو جفت پروژه مشابه انجام شد. از این رو، نتایج این بخش بیش‌تر در قالب یک شواهد تجربی از رفتار هزینه در پروژه‌های مورد بررسی تفسیر می‌شود و تعمیم آن به سایر پروژه‌ها نیازمند بررسی تعداد بیش‌تری از پروژه‌های مشابه در مطالعات آینده است. تغییرات ناشی از یادگیری برای این پروژه‌ها در جدول ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین، با توجه به مقادیر به‌دست آمده در این جدول، مقادیر هزینه

جدول ۱۳- تغییرات ناشی از یادگیری پروژه‌های A و B و پروژه‌های D و E.

Project	Construction cost (million rials/m ²)	Inflation Adjusted Costs	Adjusted cumulative cost (million rials/m ²)	Changes resulting from learning	Percentage of learning changes
A	6.543	6.543	6.543	-	-
B	6.574	6.386	6.464	1.024645	2.46%
C			-		
D	8.946	8.946	8.946		
E	8.159	8.86	8.904	1.00949	0.95%



شکل ۱۹- نمودار هزینه‌های تجمعی تعدیل شده پروژه‌های مورد بررسی.



شکل ۱۸- نمودار هزینه‌های ساخت برای پروژه‌های مورد بررسی.

جدول ۱۴- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به هزینه پروژه‌های A و B.

Project	Adjusted cumulative cost (million rials/m ²)	Log Y	Log A	LogX	(n)	S	%-Learning-Cost
A	6.543		0.815777				
B	6.464	0.810522		0.30103	-0.01746	0.987974	98.8%

جدول ۱۵- محاسبات مربوط به نرخ یادگیری مربوط به هزینه پروژه‌های D و E.

Project	Adjusted cumulative cost (million rials/m ²)	Log Y	Log A	LogX	(n)	S	%-Learning-Cost
D	8.946		0.951629				
E	8.904	0.949583		0.30103	-0.0068	0.995299	99.53%

۷- نتیجه‌گیری

(خط راست) پرداخته شد. بدین منظور یک شرکت معتبر عمرانی در تهران، ایران، مورد مطالعه قرار گرفت. پنج پروژه ساختمانی شامل دو پروژه ساختمانی پنج طبقه، یک

در این تحقیق به بررسی اثر تجربه و یادگیری در ساخت و سازهای عمرانی در بخش ساختمان با استفاده از مدل توانی

و طبقات نیز تشابه وجود داشته است نشان داد که یادگیری برای پروژه B نسبت به پروژه‌های پیشین در حدود ۳۷٪ و برای پروژه E نسبت به پروژه D و پروژه‌های پیشین ۵۷٪ درصد بوده است. در مدل توانی (خط راست) که براساس یادگیری تجمعی پروژه‌های تحقیق بوده است، مقادیر نرخ یادگیری کل پروژه‌ها در بازه ۸۲/۷۵ تا ۹۲/۶۹ درصد قرار داشته و برای پروژه نهایی برابر با ۸۹/۱۰ درصد محاسبه شد. این بدان معنی است که در صورت تولید دو برابر، ۱۰٪ از زمان ساخت برحسب یک مترمربع برای هر طبقه کاسته خواهد شد. هرچه نرخ یادگیری بیش‌تر باشد بدین معنی است که یادگیری از پروژه‌های پیشین به مقدار زیادی انتقال یافته است و کادر اجرایی گروهی مجرب و ماهر هستند. این مقوله برای گروه عمرانی مورد بررسی نیز صدق کرده است به‌طوری‌که ۹۰٪ از تجربه پروژه‌های پیشین را در پروژه‌های مورد بررسی، استفاده کرده‌اند. در رابطه با اثر تجربه بر هزینه، نتایج نشان داد که مقادیر نرخ یادگیری بین ۹۸/۸۰ تا ۹۹/۵۳ درصد محاسبه شد که این بدین معنا است که اثر یادگیری بر هزینه ساخت بسیار محدود بوده و کاهش محسوسی در هزینه واحد با افزایش تجربه پروژه‌ها مشاهده نشده است. بنابراین، برخلاف متغیر زمان، شواهد کافی برای وجود اثر یادگیری قابل توجه در هزینه ساخت مشاهده نگردید. به عبارت دیگر، این نتایج بیانگر آن است که تغییرات هزینه ساخت بیش از آنکه تحت تأثیر تجربه اجرایی قرار گیرد، احتمالاً متأثر از عوامل بیرونی نظیر نوسانات قیمت مصالح، دستمزد نیروی انسانی و شرایط اقتصادی بوده است. نتایج این تحقیق با نتایج کلی دیگر مطالعات مطابقت دارد. برای مثال در این تحقیق اثر تجربه بر زمان کاملاً مشخص و موجب کاهش زمان ساخت بوده است. به‌طوری‌که این اثر برای میانگین پروژه‌ها در حدود ۳۰٪ و نیز برای نرخ یادگیری در حدود ۹۰٪ بوده است. کوتو و تیکسرا (۲۰۰۵)، دانگ (۱۹۹۶)، هاینز و اولیپنا (۲۰۰۹) و هونگ و همکاران (۲۰۱۰) نتایج مشابهی با تحقیق حاضر در زمینه اثرگذاری تجربه بر زمان سفر را

پروژه چهار طبقه و دو پروژه ۱۴ طبقه مورد بررسی قرار گرفت و اطلاعات اجرایی آن از نظر زمان بندی در چهار بخش شامل یک- تجهیز کارگاه و فونداسیون، دو- سفت‌کاری، سه- نازک‌کاری و اتمام و چهار- کل پروژه و نیز از نظر هزینه برای کل پروژه‌ها گردآوری شد. بین پروژه C که یک پروژه چهار طبقه و پروژه D که یک پروژه ۱۴ طبقه بودند در حدود ۱۰ ماه هم‌پوشانی زمانی وجود داشت. براساس تجزیه و تحلیل اثر تجربه بر زمان ساخت، بیش‌ترین کاهش زمان ساخت در پروژه‌های B و E مشاهده شد. با مصاحبه از مسئولین پروژه مشخص شد که پروژه‌های B و E با فاصله زمانی اندک پس از پروژه‌های A و D آغاز شده و با همان گروه‌های سازندگان (کارگران، آرماتوربند و) کار ساخت و ساز انجام گرفته است و بیش‌ترین هماهنگی‌ها در دو پروژه B و E مشاهده شده است. از طرفی نقشه‌های معماری و سازه‌ای دو پروژه مذکور نیز تقریباً با پروژه‌های A و D یکسان بوده که این خود نیز بر سرعت انجام کار افزوده است. یادگیری در روند انجام این پنج پروژه به‌طور قابل توجهی اثرگذار بود و موجب کاهش زمان ساخت بر هر مترمربع- طبقه ساختمان شده است. به‌طوری‌که میانگین کاهش زمان ساخت برای چهار پروژه بعد از پروژه A در حدود ۳۰٪ کاهش زمان ساخت نسبت به این پروژه را نشان داده است. نتایج این آنالیز برای پروژه C که با پروژه D هم‌پوشانی داشته است، متفاوت می‌باشد. بخش اول پروژه که هنوز هم‌زمان با پروژه D آغاز نشده بود، درصد تغییر زمان اتمام براساس یادگیری برابر ۱۱٪ بوده است، اما با هم‌پوشانی بخش‌های دیگر این پروژه با پروژه D، زمان اتمام پروژه C با افت زمانی همراه بوده است. هم‌چنین این افت زمانی را می‌توان در بخش اول پروژه D نیز مشاهده کرد که ناشی از همان هم‌پوشانی زمانی است. نتایج نشان داد که اثر تجربه از پروژه‌های پیشین برای تمام پروژه‌های A تا E وجود داشته است ولی با مقایسه دو پروژه B و E که تقریباً بلافاصله بعد از پروژه‌های A و D انجام گرفت و از لحاظ معماری

- [3] Thomas, H. R., Mathews, C. T., & Ward, J. G. (1986). Learning curve models of construction productivity. *Journal of construction engineering and management*, 112(2), 245-258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1986\)112:2\(245\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:2(245))
- [4] Couto, J. P., & Teixeira, J. C. (2005). Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction. *Construction Management and Economics*, 23(4), 355-364. <https://doi.org/10.1080/01446190500040505>
- [5] Jarkas, A. M. (2010). Critical investigation into the applicability of the learning curve theory to rebar fixing labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(12), 1279-1288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000236](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000236)
- [6] Farghal, S. H., & Everett, J. G. (1997). Learning curves: Accuracy in predicting future performance. *Journal of construction engineering and management*, 123(1), 41-45. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1997\)123:1\(41\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1997)123:1(41))
- [7] Thomas, H. R. (2009). Construction learning curves. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(1), 14-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2009\)14:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2009)14:1(14))
- [8] Corlett, E.N., Morcombe, V.J., (1970). "Straightening out the learning curve." *Personnel Mgmt.*, vol. 2, no. 6, pp. 14-19.
- [9] Teplitz, C. J., & Amor, J. P. (1993). Improving CPM's accuracy using learning curves. *Project Management Institute*.
- [10] Norfleet, D. A. (2005). Loss of learning in disruption claims. *Cost Engineering*, 47(11), 10.
- [11] Touran, A. (1988). "Concrete formwork: constructability and difficulties." *Civ. Engrg. Practice*, 3(2), 81-88.

ارائه نمودند [۴، ۱۳، ۱۵ و ۱۸]. توماس (۲۰۰۹) نشان داد که برای بررسی اثر تجربه بر زمان و به خصوص هزینه نیازمند یکسان بودن واحدهای تولیدی است [۷]. نتیجه این تحقیق به خصوص در رابطه با اثر تجربه بر هزینه این موضوع را تصدیق می‌کند. نتایج این مطالعه، اثر تجربه بر هزینه ساخت را با توجه به شرایط متفاوت هزینه در ساخت و ساز ساختمان نسبت به تولیدهای دیگر ناچیز به‌دست آورده است در حالی که بروکمن و برزینسکی (۲۰۱۵) اثر تجربه بر کاهش هزینه‌ها را تقریباً ۲۰٪ به‌دست آورد [۲۰] و همچنین، کوتو و تیکسرا (۲۰۰۵) نشان داد که اثر تجربه و یادگیری بر کاهش هزینه‌ها بسیار چشم‌گیر می‌باشد. بررسی اثر یادگیری روی زمان و هزینه سایر پروژه‌های عمرانی برای تحقیقات آتی می‌تواند سودمند باشد. همچنین، به‌کارگیری دیگر روش‌ها برای تعیین میزان نرخ یادگیری در پروژه‌های مطالعه شده و مقایسه نتایج به‌دست آمده، می‌تواند جالب باشد [۴].

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مراجع

- [1] Arditi, D., Tokdemir, O. B., & Suh, K. (2001). Effect of learning on line-of-balance scheduling. *International journal of project management*, 19(5), 265-277. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00079-4)
- [2] Lutz, J. D., Halpin, D. W., & Wilson, J. R. (1994). Simulation of learning development in repetitive construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 753-773. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:4\(753\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(753))

- [12] Everett, J. G., & Farghal, S. (1994). Learning curve predictors for construction field operations. *Journal of construction engineering and management*, 120(3), 603-616. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:3\(603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:3(603))
- [13] Dong, C. J. (1996). Effects of design on buildability. *M. Eng. thesis, Nanyang Technological Univ., Singapore*.
- [14] Wong, P. S., On Cheung, S., & Hardcastle, C. (2007). Embodying learning effect in performance prediction. *Journal of construction engineering and management*, 133(6), 474-482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:6\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:6(474))
- [15] Hinze, J., & Olbina, S. (2009). Empirical analysis of the learning curve principle in prestressed concrete piles. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(5), 425-431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000004](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000004)
- [16] Sun, M., & Meng, X. (2009). Taxonomy for change causes and effects in construction projects. *International Journal of Project Management*, 27(6), 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.10.005>
- [17] Abidin, N. Z. (2010). Investigating the awareness and application of sustainable construction concept by Malaysian developers. *Habitat international*, 34(4), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2009.11.011>
- [18] Hong, F., Du, C., Tee, K. P., & Ge, S. S. (2010). Adaptive disturbance rejection in the presence of uncertain resonance mode in hard disk drives. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 32(2), 99-119. <https://doi.org/10.1177/0142331209339845>
- [19] Jarkas, A., & Horner, M. (2011). Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity. *Construction Management and Economics*, 29(5), 483-493. <https://doi.org/10.1080/01446193.2011.562911>
- [20] Brockmann, C., & Brezinski, H. (2015). Experience curve effects in bridge construction. *Procedia Economics and Finance*, 21, 563-570. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00213-0](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00213-0)
- [21] Grosse, E. H., Glock, C. H., & Müller, S. (2015). Production economics and the learning curve: A meta-analysis. *International Journal of Production Economics*, 170, 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.021>
- [22] Malyusz, L. (2016). Learning Curve Effect on Project Scheduling. *Procedia Engineering*, 164, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.596>
- [23] Panas, A., & Pantouvakis, J. P. (2018). On the use of learning curves for the estimation of construction productivity. *International Journal of Construction Management*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1326302>
- [24] Podolski, M., Rosłon, J., & Sroka, B. (2022). The impact of the learning and forgetting effect on the cost of a multi-unit construction project with the use of the simulated annealing algorithm. *Applied Sciences*, 12(24), 12667. <https://doi.org/10.3390/app122412667>
- [25] Vazquez, A. (2024-a). Emergence of scaling in project schedules. *The European Physical Journal B*, 97(4), 1-9. <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-024-00676-6>
- [26] Vazquez, A. (2024-b). Deduction of the Bromilow's time-cost model from the fractal nature of activity networks. *arXiv preprint arXiv:2409.00110*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.00110>

- [27] Salman, A., & Sodangi, M. (2025). Developing the Learning Curve Model to Enhance Construction Project Scheduling and Cost Estimating. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 19(1). <http://dx.doi.org/10.2174/0118748368369918250114095300>
- [28] Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the aeronautical sciences*, 3(4), 122-128. <https://doi.org/10.2514/8.155>
- [29] Wideman, R. M. (1994). Applying resource loading, production and learning curves to construction: a pragmatic approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(6), 939-953.