ارزیابی انواع مکانیزم‌های تغییر شکل در ساختمان پل‌های متحرک

مقاله علمی – پژوهشی

امیرحسین صادقپور*، استادیار، گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

فائزه تفرشی، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sadeghpour@kashanu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴

صفحه ۳۴-۱۹

چکیده

پل‌های متحرک برای تردد عابرپیاده و یا حمل و نقل جاده‌ای یا آبی مورد استفاده قرار می گیرند و می‌توانند به صورت موقت یک نوع از عملکرد خود را متوقف کرده و از موقعیت خود خارج شوند. در این پژوهش پس از معرفی این پل‌ها، انواع مکانیزم‌های حرکتی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ ایجاد حرکت در پل‌های متحرک از طریق شش گروه مکانیزم‌های ریلی، باسکولی، عمودی، چرخشی، نوسانی و تاشونده انجام می‌شود. نتایج ارزیابی ۵۰ نمونه ساخته شده در جهان نشان می‌دهد که در بین این مکانیزم‌ها، حرکت باسکولی رایج‌ترین مکانیزم بوده و حرکت‌های ریلی به دلیل سبکی سازه، بزرگترین دهانه را پوشش می‌دهد؛ در برخی از مکانیزم‌ها مانند مکانیزم چرخشی و باسکولی به کمک طراحی به صورت دو پل مجزا با تکیه‌گاه کناری امکان پوشش دهانه‌های بزرگتر فراهم شده‌است؛ بیش از ۹۰ درصد پل‌های ساخته شده از جنس فولاد بوده و عموماً سیستم نگهدارنده‌ی عرشه‌ی آن‌ها ازخرپا و یا تیر ورق طراحی شده است؛ امروزه با پیشرفت تکنولوژی بسیاری از این پل‌ها جنبه‌ی نمایشی پیدا کرده و به نمادی برای کشورها تبدیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پل، پل‌های متحرک، سازه‌های تغییرشکل‌پذیر، مکانیزم حرکتی

۱-مقدمه

پل‌ها از دیرباز وسیله‌ای برای عبور و مرور از رودخانه‌ها و معبری برای ایجاد ارتباط بین بخش‌های مختلف زیستگاه‌های بشری بوده‌اند که نقش اصلی مراسلاتی و ارتباطی آن‌ها، مهم‌ترین بارزه و مشخصهٔ قابل عنوان آن‌ها به شمار می‌رفته‌است. در واقع باید گفت پل‌ها محورهای ارتباطی بین مکان‌های عبورناپذیر و برای تسهیل دسترسی فیزیکی بین دو مکان زیستی بوده‌است(Hashemi, 2017) عوارضی که باعث ایجاد پل‌ها می‌شوند شامل دریاها و دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، دره‌ها، کوهستان‌ها و تقاطع‌های غیرهم‌سطح است. پل‌ها علاوه بر تامین دسترسی‌ها می‌توانند یک ساختمان، یک فضا با کاربری خاص، یک دروازه، مجرایی برای انتقال آب یا فضاهای دیده‌بانی باشند (Wells, 2002). از سوی دیگر پل‌ها از ساختمان‌هایی‌اند که هم در بیرون از شهرها و هم درون شهرها ساخته می‌شدند و گاه از سدها و بندها همچون پل بهره‌گیری می‌شده‌است؛ به ویژه که در راستای گذر و رفت وآمد مردم ساخته می‌شده‌اند(Memarian & Pirnia, 2019). پیش از آن که بشر در اندیشهٔ ساختن پل برای گذشتن از آب بیافتد، عبور از نهرها و رودخانه‌ها در محل‌های کم عمق رودخانه انجام می‌گرفت و حتی آبادی‌ها نیز در این نقاط از ساحل رودخانه‌ها بنا می‌شدند. شاید بتوان گفت که نخستین گام در راه ساختن پل برای گذشتن از رودخانه قراردادن تنه‌ی درختی بر روی آب در محل تنگ رودخانه و گذشتن از روی آن بوده‌است (Farshad, 2011). هنگامی که مناطق شهری توسط رودخانه‌ها به دو بخش تفکیک می‌شدند ساخت پل برای ارتباط بین آن‌ها ضرورت پیدا می‌کرده‌است؛ بنابراین پل به عنوان بخشی از فضای شهری است که زندگی در آن جریان

دارد و تنها یک وسیلهٔ ارتباط بین دو نقطه نیست؛ بلکه انعکاسی از معیارها، اندیشه‌ها، توانایی‌ها و بالاخره ذوق و نبوغ و خلاقیت ومهارت و شجاعت انسان‌ها و جوامع است(Golabchi & Alaghemandan, 2010). به طور کلی از نظر فرم سازه‌ای پل‌های ساخته شده را می‌توان به سه دستهٔ مجزا تقسیم کرد: الف) نوع تیر یا دال که در قدیم با استفاده از تنه درخت یا تخته سنگ‌ها ساخته می‌شد؛ ب) نوع قوسی با استفاده از لاشه سنگ‌ها؛ ج) نوع معلق که با استفاده طناب‌های ساخته شده از الیاف گیاهی انجام می‌شد(Mokhlesi, 2000)؛ پل‌های مدرن امروزی در واقع از نظر سازه‌ای بطور کلی از سه فرم فوق تبعیت می‌کنند هرچند که از نظر مصالح به کار رفته پیشرفته‌تر از آن ایام می‌باشند(Farshid Nik & Afhami, 2010). پل‌های متحرک وسیله‌ای برای تردد هستند که به صورت موقت می‌توانند به نحوی عملکرد خود را متوقف کرده و از موقعیت خود خارج شوند(Denison & Stewart, 2012). پل‌های متحرک پل‌هایی هستند که برای ارتباط بین دو خشکی بر روی رودخانه‌هایی بنا می‌شوند که کانال دسترسی کشتی‌ها و قایق‌ها نیز هستند و لزوم تامین دسترسی هم‌زمان هردو لازم و ضروری است؛ بنابراین برای جلوگیری از افزایش ارتفاع پل و در مواردی کنترل هزینه‌ها، پل‌های متحرک شکل می‌گیرند. پل‌های متحرک بر اساس ابعاد و اندازه‌شان می‌توانند توسط موتورها و یا به وسیله نیروی انسانی باز و بسته شوند. بسته به موقعیت قرار گرفته، پل‌ها می‌توانند بدون برنامه و برحسب شرایط، طبق برنامه مشخص یا توسط متصدی پل بازشوند(Chen & Duan, 2003).

پل‌های متحرک از سیستم‌های پیچیده ساختاری، مکانیکی و برقی تشکیل شده‌است که تطبیق‌پذیری این پل‌ها را فراهم می‌کند و هم‌زمان چالش‌های عملیاتی و نگهداری متفاوتی را به دنبال دارد(Catbas et al., 2014).

در این تحقیق تاریخچه‌ای مختصر از پل‌های متحرک و روند پیشرفت این نوع پل‌ها ارایه می‌شود؛ سپس دلایل و انگیزه‌های ساخت، اجزا و معایب و مزایای این نوع پل‌ها بیان می‌شود؛ همچنین دسته‌بندی این نوع پل‌ها بر اساس نوع کاربر و مکانیزم‌های حرکتی پل‌ها با بررسی نمونهٔ موردی ارایه شده‌است؛ در ادامه ویژگی‌های ۵۰ نمونه از این پل‌ها که از سال ۱۸۸۵تا ۲۰۱۹ میلادی ساخته شده‌است مورد ارزیابی قرار گرفته و با بررسی آنها به تحلیل و ارزیابی هر یک از مکانیزم‌های حرکتی و مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر پرداخته شده‌است.

۲-پیشینه تحقیق

پل‌های متحرک اولین باربه عنوان نوعی وسیلهٔ دفاعی بر روی خندق‌های اطراف قصرها ساخته شدند؛ مشهورترین نمونه‌ی پل متحرک که برای اهداف نظامی و به صورت موقت ساخته شده‌است؛ پل موقت (شناور) "زرکسیس" بر روی رودخانه "هلسپونت" در حدود۲۴۰سال قبل از میلاد است(Taghizade, Golabchi, & Vojdanzade, 2018). نمونه‌های اولیه‌ی این نوع پل‌ها (draw bridge) با استفاده از طناب‌ها یا زنجیرهای فلزی قابل جمع شدن که از سمتی به انتهای پل متصل بودند انجام می‌شد که به دلیل استفاده در قلعه‌های اروپایی شهرت دارند (Chen & Duan, 2003). مکانیزم حرکتی در این پل‌ها با ایجاد کشش در کابل‌های نگهدارنده و چرخش قرقره با نیروی محرک انسانی انجام می‌شد؛ در قرون وسطی این نوع پل‌ها کم‌کم به پل‌هایی با وزنه‌های تعادلی تبدیل شدند اما همچنان کاربری آن نظامی بود و سرآغازی برای شکل‌گیری پل‌های باسکولی بودند(Brown, 1993). در اروپا این نوع از پل از زمان ظهور تا قرون وسطی فراموش نشده و گفته می‌شود که پل‌های متحرکی در قرن پانزدهم توسط لئوناردو داوینچی طراحی و ساخته شده‌است (Thrall, Adriaenssens, Paya-Zaforteza, & Zoli, 2012) . توسعه موتور بخار اشکال جدیدی از وسایل نقلیه وامکانات دریایی را ایجاد کرد که به نوبه خود باعث ایجاد انواع جدیدی از پل‌های متحرک شد؛ با اختراع موتوربخار، پل با مکانیزم چرخان مورد توجه قرار گرفت و گزینه‌ای مورد توجه برای طراحی و ساخت پل‌ها بود. تا پس از انقلاب صنعتی، به دلیل قدرت بیشتر ابزاری که در اختیار مهندسان بود، پل‌هایی با مکانیزم حرکت عمودی مطرح و مورد توجه قرار گرفتند و پس ازآن، پل‌های ریلی مورد استفاده قرار گرفت که سبکی آنها سبب شد بتوانند تقریبا هر دهانه‌ای را بپوشانند(Nash, 2016). با گذشت زمان و پیشرفت فناوری‌های ساخت وهم‌چنین اقتصادی بودن پل متحرک در شرایط خاص مثل عدم ضرورت ساخت پل‌های مرتفع، ایجاد تونل‌های آبی، پل‌های متحرک بیش از پیش مورد توجه قرارگرفتند و برای رفع ایرادات حاکم بر این نوع پل‌ها مثل حرکت آهسته و کند آن‌ها و نیاز به تجهیزات پیچیده برای

ساخت، مکانیزم‌های مختلف و فناوری‌های جدید ایجاد شدند و بعد از انقلاب صنعتی و پیدایش فناوری‌های جدید و تولید انبوه فولاد و خلق ماشین‌های متعدد برخی از پل‌ها تعمیر و یا چرخ دنده‌های آن با هیدرولیک جایگزین شده و از زمانی به بعد پل‌های متحرک به نمادی برای قدرت و فناوری ساخت کشورهای مختلف بدل شدند(Mokhlesi, 2000).

ایدهٔ اصلی ساخت پل‌های متحرک امکان عبور کشتی و خودرو از کوتاه‌ترین مسیر بدون ضرورت ساخت پل‌های مرتفع است؛ در مواردی این پل‌ها می‌توانند به پل‌های کابلی متحرک (مانند پل کترال انگلستان) تبدیل شوند؛ از مهم‌ترین مزایای پل‌های متحرک می‌توان به: عدم ضرورت ساخت پل‌های مرتفع، صرفه‌جویی در مصالح و هزینه‌ها و توقف رفت و آمد بدون نیاز به کنترل پیوسته اشاره‌کرد. در مورد مهم‌ترین معایب این پل‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: احتمال بیشتر وقوع اتفاقات ناخواسته هم‌چون به خطر افتادن جان انسان‌ها یا احتمال بیشتر تخریب خود پل نسبت به سایر پل‌ها، حرکت کند آن‌ها به دلیل سنگینی و بزرگی و ضرورت به کارگیری تجهیزات پیشرفت‌تر و پیچیده‌تر ، هزینه‌ی بالای تعمیرات و طراحی دشوارتر(Catbas, Gokce, Gul, & Frangopol, 2011). پل‌های متحرک قابل تفکیک به دو گروه پل‌های مخصوص پیاده‌روی و پل‌های جاده‌ای هستد که مشخصات و کاربرد آنها در زیر بیان شده است:

۱-پل‌های متحرک عابر پیاده: پل‌های سبک‌تر، ظریف‌تر، با امکان طراحی دهانهٔ بزرگتر که برای پیاده‌روی و دوچرخه سواری طراحی شده‌اند.

۲-پل‌های متحرک جاده‌ای: این نوع پل‌ها سنگین‌تر، المان‌های بزرگ‌تر و مکانیزم‌های پیچیده‌تر برای تردد خودروها با در نظر گرفتن مسیر دسترسی پیاده طراحی شده‌اند.

با بررسی ساختمان پل، اجزای پل‌های متحرک را می‌توان به سه بخش زیرتقسیم بندی کرد(Ostrow, 1997) :

الف)عرشه قابل حرکت : عرشه‌ها متصل کنندهٔ دو بخش و قسمت تغییر شکل‌پذیر در پل‌های متحرک هستند که بسته به دهانه، بار وارد برآن با تیر ورق، خرپا یا کابل‌ها نگه داشته می‌شوند. در پل‌های متحرک بسته به نوع مکانیزم حرکتی تعریف شده، عرشه به یک قسمتی (مثل مکانیزم‌های چرخشی، عمودی، باسکولی و...) دو قسمتی (مثل باسکولی) و چند قسمتی (مثل حرکت‌های جمع شونده) تقسیم می‌شوند(Zantvliet, 2015).

ب) تکیه‌گاه : تکیه‌گاه‌ها انتقال دهنده‌ی بار پل به فونداسیون‌ها هستند؛ موقعیت تکیه‌گاه‌ها براساس نوع مکانیزم حرکتی تعریف شده برای پل می‌تواند در دو طرف دهانه یا در میانه آن تعریف شده باشد(Wang et al., 2019).

ج)سیستم‌های ایجاد مکانیزم‌های حرکتی: در تمامی پل‌های متحرک مکانیزمی برای ایجاد حرکت در پل‌ها وجود دارد که این مکانیزم با کشش کابل، جک‌های هیدرولیک، وزنه‌های تعادلی و... ایجاد می‌شود(Zantvliet, 2015). در این تحقیق بررسی انواع مکانیزم های حرکتی در پل‌های متحرک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

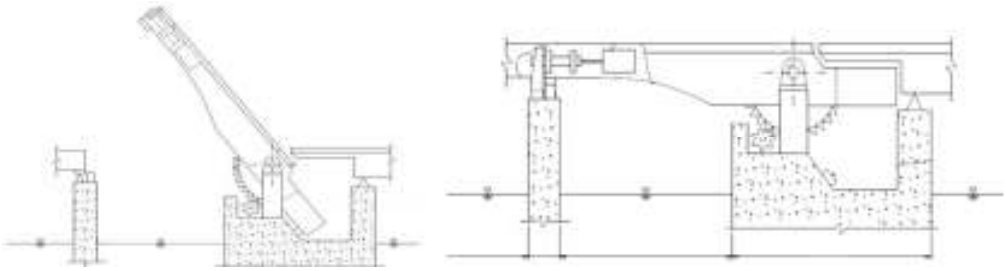
۳-ارزیابی انواع مکانیزم‌های حرکتی در پل‌ها

پل‌های متحرک بر اساس چگونگی حرکت و مکانیزم تغییر شکل به انواع مختلف تقسیم می شوند. ترال و همکاران پل‌های متحرک را بر اساس فراوانی آن‌ها در چهار دستهٔ پل‌های باسکولی، چرخان، عمودی و سایر مکانیزم‌ها دسته‌بندی می‌کند و بیان می‌کند که از مجموع پل‌های متحرکی که ساخته می‌شوند ٦٥ درصد آن‌ها پل‌هایی با مکانیزم باسکولی هستند(Thrall et al., 2012). در پژوهشی دیگر دنیسن و استوارت پل‌های متحرک را با توجه به نوع مکانیزم‌شان به صورت حرکت‌های باسکولی، حرکت‌های نوسانی، حرکت‌های بالارونده، حرکت‌های چرخان، حرکت‌های جابه‌جایی، حرکت‌های تاشونده و حرکت‌های غوطه‌ور شونده تقسیم می‌کند(Denison & Stewart, 2012). در پژوهشی دیگر وانگ و همکاران معتقدند که مکانیزم حرکتی پل‌هایی که در آمریکا برای حمل و نقل جاده‌ای اجرا شده‌اند عمدتاً در سه گروه مکانیزم‌های چرخان، باسکولی و بالارونده قرار می‌گیرند (Wang et al., 2019). بر این اساس که مکانیزم‌های غوطه‌ورشونده می‌تواند زیر مجموعه‌ای از حرکت‌های عمودی باشد؛ می‌توان در یک دسته‌بندی عمومی با توجه به نوع حرکتی که پل‌ها دارند، مکانیزم‌های حرکتی آن‌ها را به شش گروه تفکیک نمود که در ادامه ضمن معرفی، جزئیات و نحوه کار هر یک از آنها تشریح شده‌اند.

۳-۱-مکانیزم حرکت باسکولی(الاکلنگی)

این مکانیزم در صفحه قائم حرکت الاکلنگی دارد و عرشه به یک یا دو بخش تقسیم می‌شود؛ به پل باسکولی که از وسط دهانه تقسیم می‌شود، پل باسکولی دو طرفه می‌گویند. این نوع

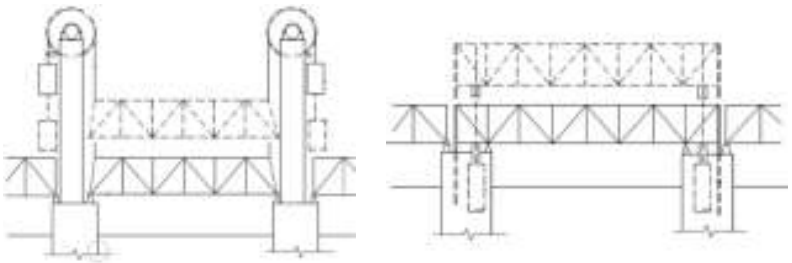
مکانیزم از قدیمی‌ترین مکانیزم‌های حرکتی در پل‌های متحرک است و در عین حال با تغییراتی که در آن ایجاد شده‌است از رایج‌ترین مکانیزم‌های حرکتی است که بر اساس یک اصل ثابت الاکلنگی کار می‌کند (Denison & Stewart, 2012). این نوع مکانیزم خود قابل تقسیم به ٤ گروه اصلی باسکولی محوری، باسکولی غلتکی، باسکولی محوری پاشنه‌دار و باسکولی بدون وزنه تعادلی تقسیم می‌شود (Golabchi & Alaghemandan, 2010). مکانیزم حرکتی باسکولی بدون وزنه تعادلی از رایج‌ترین مکانیزم در بین پل‌های متحرک اخیر است که با استفاده از جک‌های هیدرولیکی، تغییر شکل ایجاد می‌شود؛ حداکثر زاویهٔ باز شدن در این پل‌ها با توجه به نمونه‌های ساخته شده ۸۷ درجه است. در این پژوهش هنگامی که پل برای عبور و دسترسی قایق یا هر وسیله نقلیه دیگر از موقعیت خود خارج می‌شود؛ حالت باز، و هنگامی که پل در حالتی است که امکان تردد افراد و خودروها از روی عرشه آن امکان پذیر است؛ حالت بسته، تعریف می‌شود؛ در شکل ۱ مقطع شماتیک یک پل باسکولی در حالت باز و بسته نشان داده شده است.



شکل ۱. راست: مقطع پل باسکولی در حالت کاملا بسته؛ چپ: مقطع پل باسکولی در حالت کاملا باز (Beatriz, 2017)

۲-۳-مکانیزم حرکت عمودی

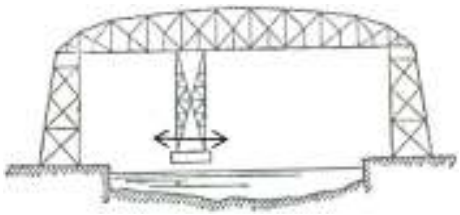
این مکانیزم شامل حرکت پل در صفحه قائم بدون هیچ گونه انحنا در راستای محور Z است؛ این مکانیزم خود قابل تقسیم شدن به دو گروه مکانیزم‌های بالارونده و مکانیزم‌های پایین رونده (غوطه‌ور شونده) است؛ از معایب این نوع مکانیزم می‌توان به محدودیت در ارتفاع کشتی‌های عبوری (در مکانیزم‌های بالارونده) و یا محدودیت در عمق فرورفتگی کشتی‌ها (در مکانیزم‌های پایین‌رونده) اشاره کرد. پل‌های بالارونده را می‌توان بر حسب سیستم حرکتی آن‌ها به مکانیزم‌های بالارونده با دهانه‌ی متحرک، مکانیزم بالارونده با تکیه‌گاه متحرک، مکانیزم بالارونده با دهانه و تکیه‌گاه متحرک تقسیم‌بندی کرد (Zhang, Kawaguchi, & Wu, 2019). در مکانیزم حرکتی با دهانه‌ی متحرک، تجهیزات حرکتی در مرکز دهانه قرار دارد تا از گسیختگی کابل‌ها در اثر کشش بیش از حد جلوگیری کند. در پل با تکیه‌گاه متحرک تجهیزات و ماشین‌آلات حرکتی در بالای تکیه‌گاه‌ها قراردارد و این مکانیزم به تجهیزات خاصی برای قرار گرفتن دو طرف دهانه در یک تراز نیاز دارد. درپل با دهانه و تکیه‌گاه متحرک در مکانیزم حرکت عمودی بالارونده، تجهیزات حرکتی در وسط دهانه و روی سکویی بالای تکیه‌گاه‌ها قرار دارد؛ ایراد این روش در هزینه‌ی بالا و محدودیت در ارتفاع پل است (Golabchi & Alaghemandan, 2010)؛ این نوع مکانیزم می‌تواند به مکانیزم بالارونده کابلی (ایجاد حرکت به وسیله کابل‌های کششی) و مکانیزم بالا رونده ستونی یا میزی (پل به وسیله‌ی ستون‌هایی که نگهدارنده عرشه هستند بالا می‌رود و نگه داشته می‌شود) که تحت عنوان پل‌های میزی نیز شناخته می‌شوند، تقسیم شود؛ پل‌های میزی دهانه و ارتفاع محدودتری داشته و عموما برای پل‌های عابر پیاده استفاده می‌شود؛ حرکت عمودی در پل‌ها می‌تواند به کمک وزنه‌های تعادل و یا جک‌های هیدرولیکی ایجاد شود (Stepanov, 1991).ساختار و نحوه حرکت پل در این گروه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. حرکت عمودی درپل‌های متحرک، راست به کمک جک‌های هیدرولیک، چپ به کمک وزنه تعادلی (Beatriz, 2017)

۳-۳-مکانیزم حرکت ریلی

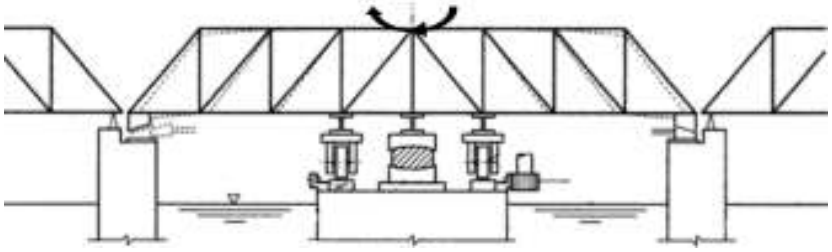
این نوع پل‌ها شامل دو ستون یا برج بلند در دو سوی کانال آب هستند که به وسیله‌ی پل تقویت شده‌ای به هم متصل شده‌اند و عرشه آویزان شده از قاب اصلی پل به وسیلهٔ جابجایی کابل‌های فولادی روی یک ریل از یک طرف آبراهه به طرف دیگر آن در حرکت است؛ این نوع مکانیزم حرکتی نسبت به سایر مکانیزم‌ها دهانهٔ بزرگتری را پوشش می‌دهد اما نسبت به سایر مکانیزم‌ها ظرفیت حمل محدودتری داشته و محدودیت ارتفاع برای عبور کشتی‌ها ایجاد می‌کند. حرکت عرشه از سمتی به سمت دیگر توسط قرقره و کابل ایجاد می‌شود. در چگونگی حرکت پل در مکانیزم حرکت ریلی در شکل ۳ نشان داده‌شده‌است (Wells, 2002).



شکل۳. مکانیزم حرکت ریلی(Denison & Stewart, 2012)

٤-۳-مکانیزم حرکت چرخان

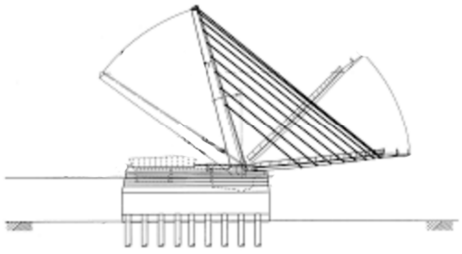
این نوع مکانیزم با چرخش ۹۰ درجه‌ی عرشه در صفحه افقی و قرار گرفتن عرشه‌ی پل به موازات مسیر حرکتی کانال اتفاق می‌افتد؛ در این نوع پل، عموما پایه‌ها دروسط پل قرار داشته تا هم دهانهء بزرگ‌تری را پوشش‌دهند و هم تعادل آن‌ها راحت‌تر برقرار شود. در این حالت به دلیل عدم نیاز به وزنهٔ تعادلی، نسبت به سایر پل‌ها سبک‌ترند، اما پایه میانی آن برای کانال‌های با عرض کم می‌تواند یک عیب بسیار بزرگ باشد(Beatriz, 2017). نمای جانبی یک پل متحرک با مکانیزم حرکتی چرخان در شکل ٤ نشان داده شده است.



شکل٤. مقطع از پلی با مکانیزم حرکت چرخشی و تکیه‌گاه میانی (Beatriz, 2017)

۵-۳-مکانیزم‌حرکت نوسانی

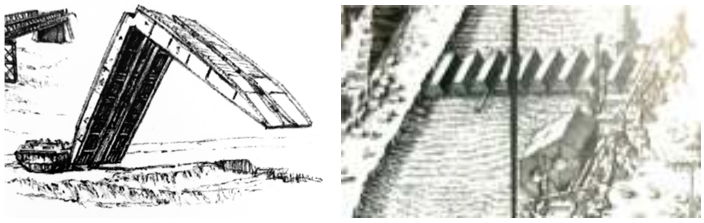
این نوع مکانیزم شامل حرکت‌های رفت و برگشتی پل بین دو حالت معین است؛ این نوع پل‌ها که نمای آن در شکل ۵ نشان داده شده است تنها جابجایی در محدوده‌ای مشخص دارند؛ می‌توانند از نظر ظاهر بسیار شبیه پل‌های باسکولی باشند اما این پل‌ها وزنه تعادلی نداشته و تعادل آن به وسیلهٔ فرم خود پل تامین می‌شود و تعداد محدودی از این پل تاکنون در جهان طراحی و اجرا شده است (Chen & Duan, 2003).



شکل۵. مکانیزم حرکت نوسانی(Chen & Duan, 2003)

٦-٣-مکانیزم‌حرکت تا شونده

در این سیستم ، پل‌ها به چند قسمت تقسیم شده و روی هم تاشده و در کنار کانال به صورت دسته شده قرار می‌گیرند؛ در حرکت‌های تاشونده پل‌ها می‌تواند به سه دسته‌ی حرکت‌های تاشونده به کمک کشش کابل، حرکت‌های هیدرولیکی و حرکت‌های تا شونده قیچی‌سان تقسیم شود؛ حرکت‌های تاشونده' کششی حرکت‌هایی هستند که کشش اعمال شده به کابل‌های عبوری از قسمت‌های مختلف عرشه باعث جمع شدن پل در سمتی از دهانه می‌شود؛ در حرکت‌های هیدرولیک، سیستم‌های هیدرولیکی باعث جمع شدن پل و قرار گرفتن آن‌ها در سمتی از دهانه می‌شود و در حرکت‌های تاشونده‌ی قیچی‌سان به کمک مفاصل آن جمع شدن پل در سمتی از دهانه اتفاق می‌افتد. این مکانیزم برای پل‌های سبک و دهانه‌های کوچک مناسب هستند و قطعات متحرک توانایی تحمل بارهای زیاد را ندارند(Denison & Stewart, 2012). نمونه‌ای از پل‌های متحرک تاشونده در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل٦. راست: پل‌های تاشونده‌ی اولیه؛ چپ: پل‌های تاشونده‌ی رزمی(Denison & Stewart, 2012).

٤- بررسی نمونه مکانیزم‌های حرکتی پل‌ها

در این بخش برای تبیین ساختار هریک از شش مکانیزم معرفی شده تعدادی از مصادیق و پل‌های ساخته شده در دنیا در طول بیش از یک قرن اخیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در قسمت اول تعداد محدودی از آنها همراه تصاویر و جزئیات بیشتر و در ادامه تعداد زیادتری از پل‌ها به اختصار مورد بررسی قرار گرفته و سپس مشخصات آنها در مکانیزم های مختلف تحلیل شده است.

١-٤-پل‌های با مکانیزم حرکت باسکولی

تاور بریج (Tower Bridge): از قدیمی‌ترین پل‌های جاده‌ای لندن در انگلستان است که در شکل ۷ نشان داده شده و در سال ١٨٩٤ افتتاح شد؛ معمار آن سرهوراس جونز است و ارتفاع پل از سطح آب۲۵ متر و دهانه‌ی متحرک آن ٦١ متر است؛ وزن هر بازو ١٠٠٠تن و سازه‌ی آن از فولاد است؛ این پل حداکثر تا زاویه‌ی ٨٦ درجه باز می‌شود. این پل در دسته‌ی مکانیزم‌های حرکت باسکولی قرار می‌گیرد (Wells, 2002).

شکل۷. راست: پل تاوربریج لندن در حالت باز، میانی: درحالت بسته؛ چپ: مقطع ونمای پل تاوربریج((Wells, 2002)

پل بادبزنی فان (Fan Bridge): این پل با الهام از بادبزن‌های دستی ژاپن مخصوص تردد عابر پیاده توسط شرکت بریتانیایی معماران (The British firm Knight Architects) طراحی شده وسال ٢٠١٤ درشهر لندن انگلستان افتتاح شده‌است؛ عرشه‌ی فولادی پل هنگام باز شدن به ۵ قسمت تقسیم‌شده و دهانه‌ی ۲۰ متری را پوشش می‌دهد؛ (Golabchi & Alaghemandan, 2010). این پل که در شکل ۸ نشان داده شده نیز در گروه مکانیزم حرکت باسکولی قرار می‌گیرد.

شکل۸. راست: پل بادبزنی انگلستان در حالت بسته، چپ: پل بادبزنی در حالت باز (Golabchi & Alaghemandan, 2010).

پل غازیان: این پل اولین پل متحرک ایران بر روی دهانه‌ی رودخانه انزلی با دهانه‌ی متحرک ۲۵ متر است که در سال ۱۳۱۸بهره‌برداری شد؛ سازه‌ی این پل که در شکل ۹ نشان داده شده است از بتن مسلح برای قسمت ثابت و دهانه‌ی فولادی متحرک برای حمل و نقل جاده‌ای احداث شده‌است و چند سالی است به‌عنوان پل ثابت از آن استفاده می‌شود (Mokhlesi, 2000)؛ این پل دارای مکانیزم حرکت باسکولی است.

شکل ۹. تصویرراست: پل غازیان در حالت باز، تصویرچپ:پل در حالت بسته (Mokhlesi, 2000)

۲-٤-پل‌های با مکانیزم حرکت عمودی

پل ژاک چبان (Jacques Chaban Bridge): در سال ۲۰۱۳ درشهر بوردوکسلی فرانسه با دهانه‌ی ٤٥ متر برای تردد خودرو طراحی و ساخته شده‌است؛ ستون‌های این پل که در شکل ۱۰ نشان داده شده است از بتن بوده و عرشه‌ی آن به وسیله‌ی تیر ورق‌های فولادی نگه داشته می‌شود (hardestyhanover.com). این پل در گروه مکانیزم‌های حرکت عمودی بالارونده قرار می‌گیرد.

شکل۱۰. تصویرراست: پل ژاک چپان درحالت باز، تصویر چپ:پل در حالت بسته (hardestyhanover.com)

پل غوطه ور شونده (Submersible Bridge)**:** این پل در سال ۱۹۸۳ با دهانه‌ی ۲۰ متر بر روی رودخانه Corinth یونان برای تردد خودرو ساخته شده‌است؛ عرشه پل تا عمق حدود ۹متر در آب فرو می‌رود و از فولاد ساخته شده است (structurae.net). این پل که در شکل ۱۱ نشان داده شده است در گروه مکانیزم‌های حرکت عمودی پایین‌رونده قرار می‌گیرد.

شکل۱۱. تصویرراست: پل یونان در حالت باز، تصویرچپ:پل یونان در حالت بسته (structurae.net)

۴-۳-پل‌های با مکانیزم حرکت ریلی

پل ریلی ویزکایا (Vizcaya Bridge): در سال ۱۸۹۳ میلادی در پرتغال با دهانه‌ی ۱۶۰ متر ساخته شد. سازه‌ی آن از فولاد است و برای حمل و جابه‌جایی خودرو و افراد از سمتی از کانال به سمتی دیگر طراحی شده‌است (Wallner & Pircher, 2007).

نمونه‌های ساخته‌شده از این نوع پل متصل‌کننده‌ی دو طرف کانال هستند وبه نظر می‌رسند برای دره‌ها و ... نیز قابل استفاده باشند؛ این پل که در شکل ۱۲ نشان داده شده است در گروه مکانیزم حرکت ریلی قرار می‌گیرد.

شکل۱۲. تصویرراست: کابین پل ریلی ویزکایا، تصویرچپ: دور نمای پل ریلی ویزکایا((Wells, 2002)

۴-۴- پل‌های با مکانیزم حرکت چرخان:

پل ریجیسویج (Rijswijk Bridge) : در سال ۲۰۱۴ برای تردد عابر پیاده و دوچرخه در هلند ساخته شد؛ این پل دهانه‌ی ۳۵ متری را پوشش داده‌است (Denison & Stewart, 2012). مکانیزم حرکتی این پل که درشکل ۱۳ نشان داده شده است، در گروه مکانیزم های حرکتی چرخان قرار می‌گیرد.

شکل۱۳. تصویرراست: پل ریجیسویج در حالت باز، تصویرچپ:پل در حالت بسته (wikipedia.com)

۴-۵-پل‌های با مکانیزم حرکت نوسانی

پل هزاره (Millennium Bridge): اولین پل نوسانی جهان است که در سال ۲۰۰۱با پوشش دهانه‌ی ۱۲۶ متری درشهر لندن انگلستان ساخته شد؛ این پل فولادی که در شکل ۱۴ نشان داده شده است برای تردد عابر پیاده و دوچرخه طراحی شده است. این سازه در واقع پل قوسی با حرکت نوسانی است که عرشه را با کابل‌های فولادی نگه داشته‌اند و این قوس در هنگام باز بودن پل تعادل وجه مقابل خود را تامین می‌کند؛ نوسان این پل گردش از وضعیت بسته به اندازه‌ی ۴۰ درجه و سپس بازگشت به وضعیت بسته است(Golabchi & Alaghemandan, 2010).

شکل۱۴. تصویرراست: پل هزاره در حالت باز، تصویرچپ:پل هزاره در حالت بسته (structurae.net)

٦-٤-پل‌های با مکانیزم حرکت تا شونده

پل غلتان (London Curling Bridge): در سال ۲۰۰٤ برای تردد عابر پیاده در شهر لندن انگلستان طراحی و اجرا شده‌است؛ این پل فولادی به ۸ قسمت تقسیم شده و در سمتی از دهانه جمع می‌شود و دهانهٔ ۱۲ متری را پوشش می‌دهد(Zhang, Kawaguchi, & Wu, 2019). این پل که در شکل ۱۵ نشان داده شده است در گروه مکانیزم حرکتی تا شونده با سیستم‌های هیدرولیکی قرار گرفته‌است.

شکل۱۵. راست: پل غلتان در حالت باز، میانی: پل در حالت نیمه باز، چپ: پل در جالت بسته (Zhang et al., 2019)

پل هورن (Horn bridge): در سال ۱۹۹۷ درشهر کیل آلمان برای حمل و نقل جاده‌ای با آهن طراحی و اجرا شد؛ جمع شدن این پل به وسیلهء نیروی کششی ایجاد شده در کابل‌های عبوری از هر یک از قطعات عرشه ایجاد می‌شود؛ این پل دهانهٔ ۲۵ متری را پوشش داده و تا زاویه ۸۷ درجه باز می‌شود (Golabchi & Alaghemandan, 2010). این پل که در شکل۱٦ نشان داده شده است؛ در گروه مکانیزم حرکتی تاشونده با کشش کابل قرارمی‌گیرد.

شکل۱٦. تصویر راست: پل هورن در حالت بسته، تصویرچپ:پل در حالت نیمه باز(Golabchi & Alaghemandan, 2010)

پل قیچی‌سان (Scissoring Bridge) : نمونه‌ای از این پل در سال ۲۰۱٤ درشهر هیروشیما ژاپن برای عبور خودرو طراحی و اجرا شده‌است؛ این پل دهانه‌ای ۲۸ متری را پوشش داده و سیستم قیچی‌سان انتقالی با سطح مقطع مربع برای سهولت تردد خودرو به عنوان سیستم تعریف شده برای آن در نظر گرفته شده‌است. این پل از جنس فولاد است و در گروه مکانیزم حرکتی تاشونده قیچی‌سان قرار می‌گیرد و در شکل۱۷نشان داده شده است (steelconstruction.info).

شکل۱۷.تصویر راست: پل قیچی سان در حالت بسته، تصویرچپ: پل در حالت باز(steelconstruction.info).

در ادامه این تحقیق به منظور ارزیابی و تحلیل مشخصات فنی سیستم پل‌های متحرک، ویژگی‌های تعدادی از نمونه‌های مشهور این پل‌ها مورد بررسی قرارگرفته‌است؛ با توجه به تنوع مکانیزم‌های حرکتی پل‌ها و برای رعایت اختصار متن، ادامهٔ نمونه‌ها در جدول یک و به اختصار معرفی شده و سپس مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

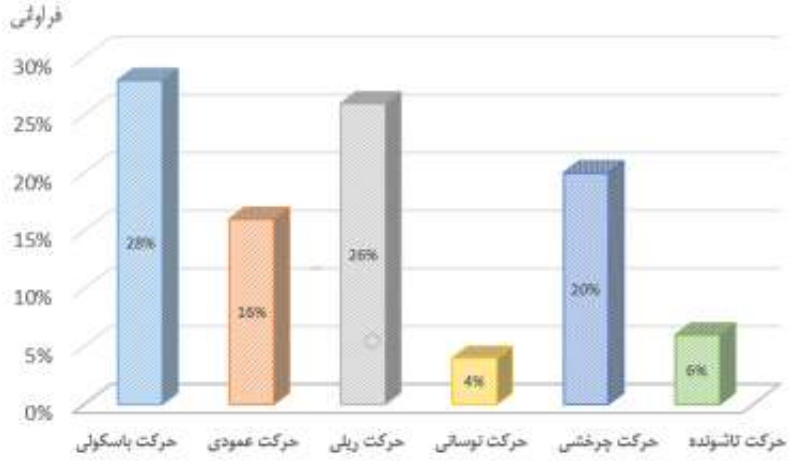
جدول ۱. معرفی مشخصات پل‌های متحرک مورد بررسی

نام پل	موقعیت	سال ساخت	کاربری پل	طول دهانه	جنس و سازه	مکانیزم حرکتی	مرجع
کریما(Crimea)	انگلستان	۱۸۸۵	جاده‌ای	۱۲	خرپای آهنی	عمودی	Denison,2012
بارتون(Barton)	بارتون، انگلستان	۱۸۹۴	جاده‌ای	۷۰	خرپای فولادی	چرخشی	Destinoinfinito.com
روشهور(Rochefort)	ماریتیم، فرانسه	۱۹۰۰	جاده‌ای	۱۴۰	خرپای فولادی	ریلی	Beatriz,2017
ارپال(Aerial)	مینه‌سوتا، آمریکا	۱۹۰۵	جاده‌ای	۱۲۰	خرپای فولادی	ریلی	structurae.net
نیوپورت(Newport)	نیوپورت،کالیفرنیا	۱۹۰۶	جاده‌ای	۱۹۷	خرپای فولادی	ریلی	Beatriz,2017
قصرویلیهم (Kaiser Wilhel)	زاکسن، آلمان	۱۹۰۷	جاده‌ای	۱۵۹	خرپای فولادی	چرخان	steelconstruction.info
اوستن(OSten)	اوستن، آلمان	۱۹۰۹	جاده‌ای	۸۰	خرپای فولادی	ریلی	Beatriz,2017
میلزبورو(Middlesbrough)	میدلزبورو،انگلستان	۱۹۱۱	جاده‌ای	۱۸۰	خرپای فولادی	ریلی	Brown,1993
رندزبرگ(Rendsburg)	رندزبرگ، آلمان	۱۹۱۳	جاده‌ای	۱۴۰	خرپای فولادی	ریلی	Beatriz,2017
پنتا(Puente)	پنتا، آرژانتین	۱۹۱۴	جاده‌ای	۱۰۳	خرپای فولادی	ریلی	Denison,2012
پامبان(Pamban)	پامبان، هندوستان	۱۹۱۵	جاده‌ای	۶۶	خرپای فولادی	باسکولی	hardestyhanover.com
قصر(Cathedral)	نوادروسیه	۱۹۱۶	جاده‌ای	۴۵	خرپای چدنی	باسکولی	hardestyhanover.com
وارینگتون(Warrington)	وارینگتون،انگلستان	۱۹۱۶	جاده‌ای	۵۷	خرپای فولادی	ریلی	Beatriz,2017
میشیگان(Dusable)	آمریکا	۱۹۲۰	جاده‌ای	۷۸	خرپای فولادی	باسکولی	Destinoinfinito.com
شماره۱۵ (Welland Canal)	اترانیوی، کانادا	۱۹۳۰	جاده‌ای	۶۳	خرپای فولادی	چرخشی	Brown,1993
سی ان آرCNR	ونکوور،کانادا	۱۹۳۱	جاده‌ای	۷۳	خرپای فولادی	چرخشی	hardestyhanover.com
پگاسوس(Pegasus)	نرماندی، فرانسه	۱۹۳۴	جاده‌ای	۴۶	تیرورق‌فولادی	باسکولی	Beatriz,2017
کیپ کد(Cape Cod Canal)	ماساچوست	۱۹۳۵	جاده‌ای	۱۶۵	خرپای فولادی	عمودی	structurae.net
امپکوا(Umpqua River))	اورگان، آمریکا	۱۹۳۶	جاده‌ای	۱۰۰	خرپای فولادی	چرخان	steelconstruction.info
ناپلسبرو(Knippelsbro)	کپنهاگ، دانماک	۱۹۳۷	جاده‌ای	۴۸	خرپای فولادی	باسکولی	Denison,2012
تاسمانی(Tasmania)	تاسمانی، استرالیا	۱۹۴۶	جاده‌ای	۱۳۱	خرپای فولادی	عمودی	Brown,1993
کانسو(Canso)	نوا اسکوشیا کانادا	۱۹۵۵	جاده‌ای	۷۴	خرپای فولادی	چرخشی	Denison,2012
اسپایت(Spit)	سیدنی، استرالیا	۱۹۵۸	جاده‌ای	۳۵	تیرورق‌فولادی	باسکولی	Beatriz,2017
رایدRyde)	سیدنی، استرالیا	۱۹۸۷	جاده‌ای	۱۰۰	تیرورق‌فولادی	عمودی	Destinoinfinito.com
تی(Tee)	انگلستان	۱۹۹۱	جاده‌ای	۲۵۹	تیرورق‌فولادی	ریلی	theconstructor.org
ایراسموس(Erasmusbrug)	روتردام	۱۹۹۲	جاده‌ای	۹۰	تیرورق‌فولادی	باسکولی	Destinoinfinito.com
آرترکیل(Arthur Kill)	نیوجرسی، آمریکا	۱۹۹۵	جاده‌ای	۱۷۰	خرپای فولادی	عمودی	structurae.net
رویال(Royal)	لندن، انگلستان	۱۹۹۸	پیاده‌روی	۲۸	تیرورق‌فولادی	ریلی	Beatriz,2017
اسلارف(Slauerhoffbrug)	Netherlands	۲۰۰۰	جاده‌ای	۱۵	تیرورق‌فولادی	باسکولی	Destinoinfinito.com
ال فردان(El Ferdan)	Ismailia مصر	۲۰۰۱	جاده‌ای	۱۷۰	خرپای فولادی	چرخان	structurae.net
مرج براگ (Magere Brug)	آمستردام، هلند	۲۰۰۳	افراد	۱۵	تیرورق‌فولادی	باسکولی	Beatriz,2017
فلابرت(Flaubert)	روان، فرانسه	۲۰۰۸	جاده‌ای	۱۱۵	تیرورق‌فولادی	عمودی	Brown,1993
ارلبنیبروک(Erlebnisbrücke)	گلادباخ، آلمان	۲۰۰۸	جاده‌ای	۱۰	تیرورق‌فولادی	ریلی	Beatriz,2017
تام(Tom)	آدلاید استرالیا	۲۰۰۸	جاده‌ای	۵۷	خرپای فولادی	باسکولی	hardestyhanover.com
هامروجین (Hamrštejn)	کراستاوا، چک	۲۰۱۰	جاده‌ای	۲۳	تیرورق‌فولادی	ریلی	Beatriz,2017
شیزیلبراگ(Scheepsdalebrg)	بروژ، بلژیک	۲۰۱۱	جاده‌ای	۴۳	تیرورق‌فولادی	نوسانی	structurae.net
اسکیل لین (Scale Lane)	هال، انگلستان	۲۰۱۳	پیاده‌روی	۵۷	تیرورق‌فولادی	چرخشی	steelconstruction.info
دایره‌ای (circle)	کپنهاگ، دانماک	۲۰۱۵	پیاده‌روی	۳۲	تیرورق‌فولادی	چرخشی	Beatriz,2017
کولاترنگانو(Kuala Terengan)	ترنگانو، مالزی	۲۰۱۹	جاده‌ای	۵۰	خرپای فولادی	باسکولی	structurae.net

۵- ارزیابی ویژگی‌های پل‌های متحرک

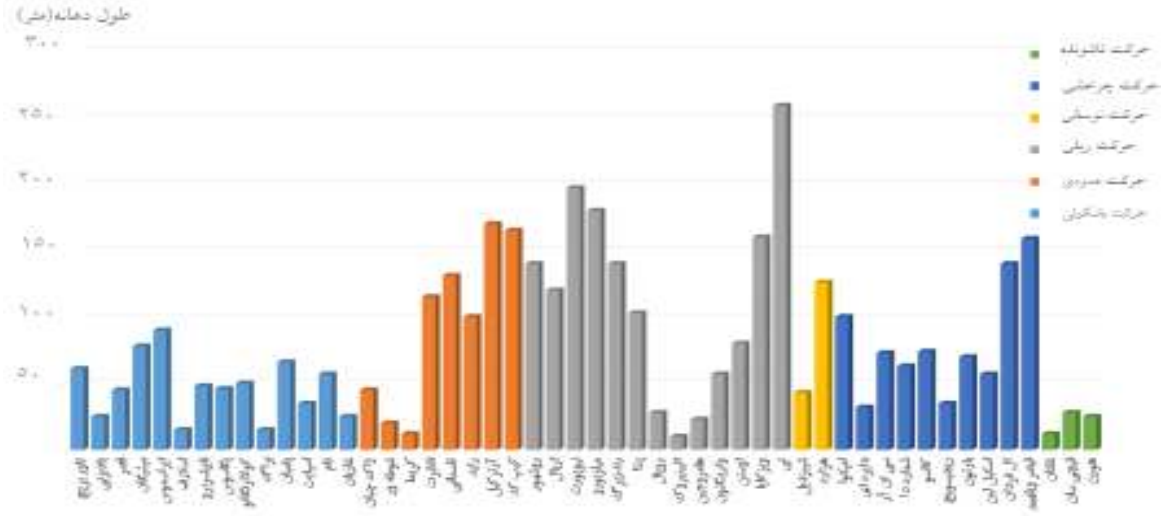
در این پژوهش به بررسی ویژگی‌های ۵۰ نمونه از پل‌های متحرک ساخته شده از سال ۱۸۸۵ تا ۲۰۱۹ میلادی پرداخته شده است. برای این منظور مشخصات مهم نمونه‌های مورد بررسی مثل دهانه پل، نوع مکانیزم حرکتی، کاربری و سیستم سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در شکل ۱۸ به بررسی فراوانی پل‌های ساخته شده بر اساس مکانیزم حرکتی آن‌ها پرداخته شد و بر اساس نمونه‌های بررسی شده، بیشترین و قدیمی‌ترین مکانیزم حرکتی در پل‌های متحرک، مکانیزم حرکت باسکولی و سپس مکانیزم حرکت ریلی و چرخشی است.



شکل۱۸. بررسی فراوانی مکانیزم حرکتی پل‌های ساخته شده

در شکل۱۹ به مقایسه دهانه‌های پل‌ها به تفکیک مکانیزم آن پرداخته شده است؛ بررسی مشخصات فنی پل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که محدوده طول دهانه در مکانیزم ریلی بسیار متنوع است و به دلیل سبکی بخش متحرک در این مکانیزم نسبت به سایر پل‌ها، مکانیزم ریلی می‌تواند دهانه‌های بزرگتری را پوشش دهد؛ همچنین مشاهده می‌شود که به طور نسبی در پل‌ها با مکانیزم حرکت باسکولی، دهانه‌ها کوتاه‌تر است که این موضوع می‌تواند به علت محدودیت ناشی از وجود وزنه‌های تعادلی در سیستم حرکتی پل باشد؛ در مواردی برای کاهش این محدودیت ایجاد شده، عرشه متحرک در دو بخش رفت و برگشت به دو قسمت مجزا تقسیم شده است.

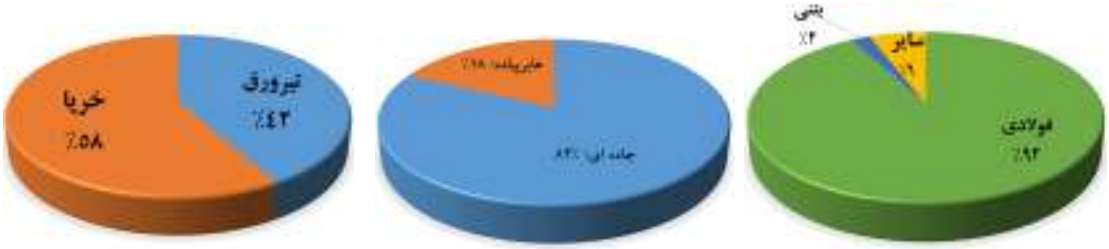


شکل ۱۹. مقایسه‌ی دهانه پل‌ها به تفکیک مکانیزم حرکتی در آن‌ها

درشکل۲۰ مقایسهٔ سیستم سازه پل‌ها نشان می‌دهد که از سال‌های ۱۸۸۵ تاکنون عموماً جنس مصالح پل‌های متحرک فلزی بوده و با گذشت زمان از چدن و آهن به سمت فولاد حرکت کرده‌است و بیشتر پل‌های متحرک به صورت خرپاها یا تیر ورق‌های فولاد طراحی و اجرا شده‌اند؛ در برخی موارد، فولاد در ترکیب با بتن مورد استفاده قرار گرفته است.

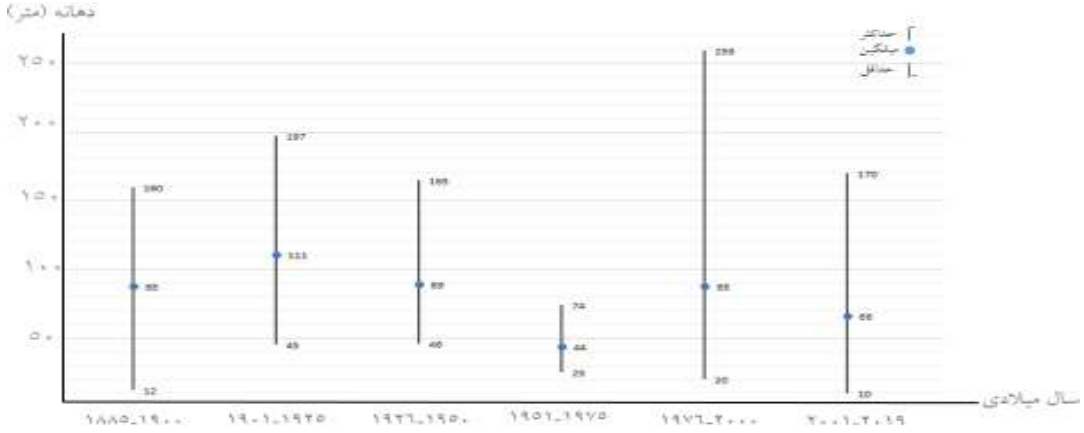
بررسی کاربری پل‌های متحرک ساخته شده در شکل۲۱ نشان می‌دهد که اصلی‌ترین کاربری برای پل‌های متحرک برای حمل و نقل جاده‌ای (عبور اتومبیل و سایر وسایل نقلیه مانند قطارها) و یا عبور و مرور عابر پیاده و یا دوچرخه است. از این نظر بیش از ۸۰ درصد پل‌های متحرک برای حمل و نقل‌های جاده‌ای ایجاد شده وکمتر از ۲۰ درصد آن‌ها برای پیاده‌روی طراحی و اجرا شده‌اند؛ در پل‌های عابر پیاده به دلیل سبکی وزن، طراحان از ایده‌های خلاقانه‌تر در طراحی و اجرای هریک از این مکانیزم‌ها استفاده کرده‌اند.

در شکل۲۲ به مقایسه‌ی سیستم‌های سازه‌ای نگهدارندهٔ عرشه پرداخته شده‌است؛ سیستم‌های نگهدارنده‌ی عرشه در ۵۸ درصد موارد خرپایی است که در مکانیزم حرکت ریلی سازه اصلی طرح، یعنی قابی که کابین در آن حرکت می‌کند در نظر گرفته شده است و در این مکانیزم، خرپاها به صورت قوسی، شبیدار و یا تخت مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل۲۰. نوع سیستم سازه در پل‌های متحرک **شکل۲۱.کاربری در پل‌های متحرک** **شکل ۲۲. سیستم‌های نگهدارنده‌ی عرشه در پل‌ها**

در شکل ۲۳ روند تغییرات دهانه پل‌های متحرک و میانگین آن‌ها در دوره‌های مختلف از سال ۱۸۸۵ تا سال ۲۰۱۹ میلادی بررسی شده است؛ در این نمودار طول دهانه حداکثر، حداقل و میانگین پل‌های متحرک ساخته شده در دوره‌های زمانی ۱۵ تا ۲۵ ساله مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی این نمودار نشان می دهد که اگرچه حداکثر طول دهانه در این پل‌ها در طی بیش از یک قرن گذشته افزایش یافته، ولی متوسط دهانه پل‌های متحرک ساخته شده تابع این روند افزایشی نیست. از این جهت مشاهده می‌شود که که در ساخت این پل‌ها، هدف پوشاندن دهانه‌ی رودخانه‌ها و مناطق صعب‌العبور بوده‌است؛ بنابراین، عرض رودخانه‌ها یا معبر تعیین‌کننده دهانه‌ی پل‌ها بوده و در ساخت آنان افزایش دهانه هدف اصلی نبوده است؛ همچنین تلاش‌ها بر ارایه خلاقیت و نمایشی شدن این نوع پل‌ها عامل مهمی برای ایجاد تنوع در طراحی بوده است.



شکل۲۳. روند تغییرات محدوده طول دهانه در پل‌های متحرک از سال ۱۸۸۵ تا ۲۰۱۹.

٦- طرح یک مدل پیشنهادی

در شکل ٢٤ ماکت یک مدل پیشنهادی برای پل‌های متحرک توسط نویسندگان ارایه شده‌است؛ در این طرح، مکانیزم حرکتی پل از ترکیب دو مکانیزم حرکت عمودی بالارونده و مکانیزم حرکت چرخشی تشکیل شده است. در صورت استفاده از این ایده در طراحی می‌توان از سرعت بیشتر در تغییر عملکرد پل استفاده کرد. همچنین در هنگام اختلال در عملکرد هرکدام از مکانیزم‌ها، مکانیزم دیگر می‌تواند جایگزین شده و از قطع ارتباط برای حرکت خودروها از روی پل یا کشتی‌ها از زیر آن در مواقع لازم جلوگیری می‌شود. در این طرح عرشه به کمک کابل‌هایی که به دکل میانی متصل می‌شوند نگه داشته می‌شود و تغییر شکل مجموعه پل می‌تواند به عنوان دو مکانیزم حرکتی مستقل و برای صرفه‌جویی در زمان در دو مرحله برنامه‌ریزی شود. ۱- برای قایق‌ها و کشتی‌های عبوری با ارتفاع متوسط، مکانیزم حرکتی عمودی فعال می‌شود؛ بنابراین، فرآیند باز و بسته شدن پل مدت زمان کمتری لازم دارد؛ ۲-هنگامی که کشتی‌های مرتفع عبور می‌کنند پل با مکانیزم چرخشی مسیر عبور کشتی را باز کند.

تصویر٢٤. راست: پل در حالت بسته؛ چپ: پل در حال باز به کمک مکانیزم حرکت عمودی؛ وسط: پل در حالت باز به کمک مکانیزم چرخشی

۷-نتیجه‌گیری

با توجه به ایجاد عملکرد چند منظوره و صرفه اقتصادی، استفاده از پل‌های متحرک از حدود یک قرن اخیر توسعه قابل توجهی پیدا کرده است؛ این پل‌ها می‌توانند برای عابر پیاده و یا حمل و نقل جاده‌ای طراحی شوند؛ در این تحقیق انواع مکانیزم‌های حرکتی مورد استفاده در ساختمان پل‌های متحرک مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی انجام شده روی ۵۰ نمونه از پل‌های متحرک ساخته شده نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد آن‌ها پل‌هایی با عملکرد جاده‌ای و بقیه پل‌های عابر پیاده هستند. با توجه به بار کمتر، پل‌های عابر پیاده دهانه‌های بزرگ‌تری را پوشش داده و مکانیزم‌های حرکتی متنوع‌تری دارند. مکانیزم حرکتی در پل‌های متحرک در شش گروه حرکت باسکولی، حرکت‌های عمودی (شامل حرکت بالارونده و غوطه‌ور شونده)، حرکت ریلی، حرکت چرخان، حرکت نوسانی و حرکت‌های تاشونده قرار می‌گیرد؛ مکانیزم حرکت باسکولی از اولین مکانیزم‌های مورد استفاده در پل‌های متحرک است و به دلیل سهولت بهره‌برداری و عدم ایجاد محدودیت در ارتفاع و عمق فرورفتگی برای عبور کشتی‌ها همچنان کاربرد بیشتری دارد. مکانیزم ریلی، نسبت به سایر مکانیزم‌ها می‌تواند دهانه‌های بزرگ‌تری را پوشش دهد، هرچند ظرفیت کم و محدودیت در ارتفاع از جمله معایب آن به شمار می‌رود. بررسی پل‌های متحرک ساخته شده در بیش از یک قرن اخیر نشان می‌دهد که استفاده از پل‌های متحرک برای دهانه‌های از ۱۰ متر تا حدود ۲۷۰ متر مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم نگهدارنده عرشه‌ی این پل‌ها خرپا یا تیرورق هستند و بیش از۹۰ درصد پل‌ها از جنس مصالح فولادی اجرا شده‌اند. همچنین بر اساس ایده ارایه شده برای ترکیب دو سیستم حرکتی در پل‌های متحرک می‌توان در طراحی شهری زمان تغییر وضعیت پل را به حداقل رسانید. به این ترتیب خلق طرح‌های خاص و بدیع با استفاده از مکانیزم‌های حرکتی و یا کنار هم قرارگیری این نوع پل‌ها با پل‌های کابلی یا قوسی می تواند باعث ایجاد نمونه‌های بدیع، زیبا و منحصر به فرد شود.

۷- مراجع

-Beatriz, A., (2017), "Conception Design And Structural Analysis Of Movable Bridges The Case Study of Great Yarmouth Third Crossing" (master of science), University Of DOPORTO.,

-Brown, D. J., (1993), "Bridges, three thousand years of Defying nature" London: Mitchell Beazley.

-Catbas, F. N., Gokce, H. B., Gul, M., & Frangopol, D. M., (2011), "Movable bridges: condition, modelling and damage simulations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Bridge Engineering, 164(3), pp.145-155. doi:10.1680/bren.2011.164.3.145.

-Catbas, F. N., Gul, M., Gokce, H. B., Zaurin, R., Frangopol, D. M., & Grimmelsman, K. A., (2014), "Critical issues, condition assessment and monitoring of heavy movable structures: emphasis on movable bridges", Structure and Infrastructure Engineering, 10(2), pp.261-276. doi:10.1080/15732479.2012.744060.

-Chen, W., & Duan, L., (2003), "Bridge Engineering, Substructure Design: Taylor and Francis Group.

-Denison, E., & Stewart, I., (2012), "how to read bridges, a crash course in engineering and architecture", NewYork: Rizzoli International Publications (Inc).

-Farshad, M., (2011), "History of Engineering in Iran", Iran: Balkh. (in Persian).

-Farshid Nik, F., & Afhami, R., (2010), "Iranian Bridge-Caravansaries Evolutionary process of unifying Caravansary buildings and Bridge structures", Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi, 2(41), pp.55-66. (in Persian).

-Golabchi, M., & Alaghemandan, M., (2010), "Iranian and world bridges, interaction of architecture, technology and beauty", Iran: University of Tehran, (in Persian).

-Hashemi, M., (2017), "Bridge from an architectural perspective", Iran: University of Tehran. (in Persian).

-Memarian, G. H., & Pirnia, M. K., (2019), "Iranian Architecture", Iran: soroush Danesh. (in Persian).

-Mokhlesi, M. A., (2000), "Old bridges of Iran", Iran: Ministry of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts, (in Persian).

-Nash, P., (2016), "An Objective Protocol for Movable Bridge Operation in High-Wind Events Based on Hybrid Analyses by European and American Design Code, (Master of Science), University of New Hampshire.

-Ostrow, S. A., (1997), "Bridges, New York: Metro books".

-Stepanov, G. M. (1991), "Design of Movable Bridges", Structural Engineering International, 1(1), 9-11. doi:10.2749/101686691780617878

-Taghizade, K., Golabchi, M., & Vojdanzade, L. (2018), Formatable Architecture. Iran: University of Tehran. (in Persian)

-Thrall, A. P., Adriaenssens, S., Paya-Zaforteza, I., & Zoli, T. P. (2012). Linkage-based movable bridges: Design methodology and three novel forms. Engineering Structures, 37, pp.214-223. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.031.

-Wallner, M., & Pircher, M., (2007), "Kinematics of Movable Bridges", Journal of Bridge Engineering, 12(2), 147-153. doi:doi:10.1061/(ASCE)10840702(2007)12:2(147).

-Wang, Y., Jablonski, M., Yavvari, C., Wang, Z., Liu, X., Holt, K., & Wijesekera, D., (2019), "Safety and Security Analysis for Movable Railroad Bridges", Paper presented at the 2019 Joint Rail Conference.

-Wells, M., (2002), "30 bridges, Singapore: Laurence King Publishing Ltd.

-Zantvliet, V., (2015), "Analysis of the force distribution on operating mechanisms in a bascule bridges", (masterof science), Delft University of Technology.,

-Zhang, T., Kawaguchi, K. i., & Wu, M., (2019), "Concept and Preliminary Analysis of Novel Movable Structural System for Cable-Stayed Footbridge", Journal of Bridge Engineering, 24(4), 04019021. doi:doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001378.

Evaluating the Types of Displacement Mechanisms in the Construction of Movable Bridges

Amir Hossein Sadeghpour, Assistant Professor, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.

Faezeh Tafreshi, M.Sc., Student, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.
E-mail: sadeghpour@kashanu.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT
Movable bridge can be used as pedestrian bridges, road or water transportation. These bridges can temporarily stop one type of their performance and get out of their position. In this study, after introducing movable bridges, the types of these mechanisms are examined. The movement of movable bridges is done through six groups of rail, bascule, vertical, swing, tilting and folding mechanisms. The results of evaluation of 50 samples made in the world show that among these mechanisms, bascule movement is the most common mechanism and rail movements cover the largest opening due to the lightness of their structure. In some mechanisms, such as swing and bascule mechanisms, it is possible to cover larger openings with the help of design in the form of two separate bridges with side supports. More than 90 Percentage of the movable bridges are made of steel and their deck support system is generally designed from trusses or plate girders. Today, with the advancement of technology, many of these bridges become a symbol for countries.

Keywords: Bridges, Movable Bridges, Deformable Structures, Movement Mechanisms