

بررسی و ارزیابی عرشه، دکل و الگوی کابلی پل‌هایی با سازه کابلی

مقاله علمی - پژوهشی

سحر اسکندری*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.eskandari.s20@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

صفحه ۱۶۶-۱۵۵

چکیده

پل‌های کابلی یکی از پیشرفته‌ترین سیستم‌های سازه‌ای پل‌هاست که با گسترش صنعت پل‌سازی در پل‌ها در سال‌های بعد از جنگ جهانی دوم، ساخت این نوع پل‌ها که دهانه‌های بلندتری را پوشش می‌داد رونق زیادی گرفت. شکل آرایش کابل‌ها در پل‌های کابلی، یکی از پارامترهای مهم در طراحی و ساخت این نوع پل‌هاست. به طوری که با انتخاب صحیح شکل آرایش کابل‌ها می‌توان صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌های ساخت پل‌های کابلی انجام داد. در این پژوهش با بررسی بر روی حدود ۲۰ نمونه از پل‌های کابلی به بررسی مواردی نظیر نوع عرشه، نوع دکل، نوع آرایش کابل‌ها، و ... پرداخته شد.

واژه‌های کلیدی: پل، سازه، پل کابلی، پل معلق، الگوی پل‌ها

۱- مقدمه

عبارتند از: استفاده بهینه از مصالح، سرعت بالای نصب و اجرا، کاهش خیز در قیاس با پل‌های معلق، روسازه سبک، ارتفاع کمتر عرشه در مقایسه با دهانه پل، کاهش هزینه‌های نگهداری، زیبایی بسیار زیاد پل، عدم پیچیدگی سازه‌های و به طبع آن سهولت نصب و اجرا، استفاده از کابل‌ها به عنوان نگهدارنده موقت و دائم هنگام اجرای طره عرشه؛ به دلیل عملکرد کابل‌ها، تیرها تحت فشار هستند و به همین دلیل مهارهای سنگین و بزرگ برای عرشه نیاز نمی‌باشند، در پل‌های متقارن نیروهای افقی در تعادل با یکدیگر قرار می‌گیرند و بنابراین مهارهای خاص و پیچیده در قسمت درز انبساط نیاز نمی‌باشند. پل کابلی با شکل تک دکل نیز قابل اجرا می‌باشد. این نوع پل در مکان‌هایی که امکان ساخت دو دکل نباشد استفاده می‌شود [امیری؛ خالقیان؛ شیخی، ۱۳۹۱]. برخی معایب پل کابلی عبارتند از: مستعد تحریک پذیری در برابر نیروی باد، خوردگی یا زنگ زدگی کابل‌ها باعث کاهش کارایی آنها می‌شود. به دلیل پایین بودن مرکز جرم در هنگام زلزله خطر نشست وجود دارد [امیری؛ خالقیان؛ شیخی، ۱۳۹۱]. با توجه به اینکه موضوع مقاله پل‌های کابلی است، در این بخش صرفاً پل‌های کابلی و معلق معرفی می‌شوند.

پل‌ها به مانند بستری از رویدادهای جامعه ما بوده‌اند. این سازه‌ها همواره موضوع و کانون توجه فرهنگی و هنری در دوران باستان و عصر کنونی بوده‌اند. در طی تاریخ، پل‌ها مرکز مناقشات بسیاری بوده و جنگ‌های فراوانی به خاطر آن‌ها رخ داده است و در بسیاری موارد، فتح این سازه استراتژیک تأثیر برجسته‌ای بر نتیجه نهایی جنگ داشته است. گاهی پل‌ها مرکز دهکده یا شهر بوده‌اند [عبدالمتین، ۱۳۹۴]. پل‌ها را از جهات مختلف از جمله طول دهانه، مصالح مورداستفاده، روش ساخت، نوع استفاده و همچنین نوع سیستم سازه‌ای می‌توان طبقه‌بندی نمود. از نظر نوع سیستم سازه‌ای پل‌ها به پل‌های صفحه‌ای، تیر و شاه‌تیری، خرپایی، قوسی، خرپایی طره‌ای، معلق (با کابل سهمی)، کابلی و قابی تقسیم می‌شود.

[Wang PH, Yang CG-1996]. یکی از معیارهای پیشرفت بشر، توانایی ساخت سازه‌هایی عظیم‌تر و بلندتر است. پل‌های کابلی به عنوان نمونه‌ای از این سازه‌ها می‌باشد ساخت و زیبایی از سوی دیگر سبب شده تا در نیم قرن اخیر از پرکاربردترین سازه‌ها برای ارتباط دهانه‌های متوسط تا بزرگ (از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متری) مورداستفاده قرار گیرند [Gimsing NJ-1997]. مهمترین مزایای پل‌های کابلی

Archive of SID

- ۲- کدام نوع دکل در پل‌های کابلی بیشتر کاربرد و کدام کمتر کاربرد دارد؟
- ۳- کدام الگوی آرایشی در میان پل‌های متکی بر کابل بیشترین استفاده را دارد؟

روش تحقیق

روش پژوهش مطالعات کتابخانه‌ای و منابع و اسناد به صورت توصیفی-تحلیلی است. به بررسی انواع پل‌های کابلی پرداخته می‌شود و به این پرداخته شد که کدام نوع پل‌ها کاربرد بیشتری دارد و به بررسی مواردی نظیر اینکه نوع عرشه، نوع دکل، نوع الگوی آرایشی که کارایی بیشتر دارد پرداخته شد.

۲-پیشینه تحقیق

پیشینه ساخت پل به دست انسان به زمان‌های قبل برمی‌گردد. اولین پل‌ها به وسیله‌ی انداختن سنگ یا درخت بر روی دهانه رودخانه ساخته شده است. در زمان‌های پیشین به جز انداختن چوب در آب، دستاورد دیگری برای کسب تجربه به منظور ساخت پل وجود نداشت. زمانی که انسان موفق به ساخت ابزار شد، با برش‌های منظم چوب و اندازه‌های مناسب توانست برای عبور از رودخانه پلی مناسب برای خود بسازد. زمانی که ابزار مناسب برای کار با سنگ اختراع شد، انسان توانست با سنگ پل‌هایی بسازد که بسیار ایمن‌تر و بادوام‌تر از پل‌های چوبی بود. به عنوان مثال، قوس یوتا توسط هیچ انسانی طراحی و ساخته نشده است و این قوس طبیعی که بین دو صخره عظیم واقع شده است، قدیمی‌ترین پل طبیعی موجود در دنیا می‌باشد. این قوس شباهت بسیار زیادی از نظر فرم و شکل و خیز دهانه با پل‌های قوسی دارد. [گلابچی، ۱۳۸۹]

پل‌های معلق می‌توانند دهانه‌های بین ۶۰۰ تا ۲۱۰۰ متر را پوشش دهند که طولانی‌ترین فاصله قابل پوشش در بین تمام پل‌ها می‌باشد. در پل معلق، بستر راه از کابل‌های اصلی که از یک سمت تا سمت دیگر پل امتداد یافته‌اند آویزان شده و معلق می‌شود. این کابل‌ها با عبور از برج‌ها به لنگرگاه‌های طرفین مهار می‌شوند. برج‌ها کابل‌های اصلی را قادر می‌سازند که فواصل طولانی‌تری را پوشش دهند. قسمت اعظم وزن پل توسط کابل‌ها تحمل و به لنگرگاه‌های طرفین منتقل می‌شود. این لنگرگاه‌ها یا همان سنگ سخت محل و یا بلوک‌های بتنی عظیم هستند. در داخل لنگرگاه‌ها، کابل‌ها در یک سطح بزرگ پراکنده می‌شوند تا بار را یکنواخت توزیع نموده و از رها شدن آن جلوگیری شود [عبدالمتین، ۱۳۹۴]. در پل‌های متکی بر کابل، کابل‌ها به برج‌ها متصل می‌شوند و این برج‌ها به تنهایی بار را تحمل می‌نمایند. کابل‌ها می‌توانند به طرق مختلف به عرشه متصل شوند. در دهانه‌های با طول متوسط (دهانه‌های بین ۱۵۰ تا ۸۵۰ متر) پل‌های متکی بر کابل گزینه اصلی انتخاب نوع پل هستند. در مقایسه با پل‌های معلق، پل‌های کابل متکی بر کابل نیاز به کابل کمتر داشته و می‌توان از مقاطع پیش‌ساخته بتنی مشابه به هم در ساخت آن‌ها بهره جست و همچنین ساخت آن‌ها سریع‌تر است [عبدالمتین، ۱۳۹۴]. در این تحقیق ضمن معرفی انواع پل‌ها، به معرفی پل‌های کابلی و ارزیابی و طبقه‌بندی انواع فرم آرایش کابل‌ها در این سیستم‌ها پرداخته شده است. برای معرفی انواع فرم کابل در این نوع از پل، ویژگی چیدمان مختلف کابل‌ها بررسی شده است.

سوالات تحقیق

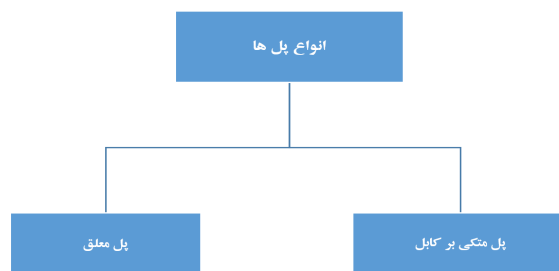
- ۱- چه نوع عرشه‌ای بیشتر در مورد ساخت پل‌های کابلی استفاده می‌شود؟



شکل ۱. پل یوتا در آمریکا [Price- 2016]

۳-انواع پل‌های کابلی

چنانچه گفته شد سازه‌های کابلی علاوه بر کاربردهای بسیاری همچون پوشش سقف، به‌عنوان پل‌های کابلی برای پوشاندن دهانه‌های بزرگ بر روی دره‌ها و رودخانه‌ها نیز استفاده می‌شوند. تفکر ساختن پل‌هایی که به‌صورت کششی کار می‌کنند سال‌های بسیار ذهن مهندسان را مشغول خودکرده بود. اما دلایلی همچون عدم پیشرفت علم در زمینه ی ساخت پل‌های پیچیده و نداشتن کابل‌های فلزی با مقاومت بالا و از همه مهم‌تر عدم شناخت کافی از رفتار این نوع پل‌ها در اثر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی باعث شده که سابقه طولانی در ساخت این پل‌ها وجود نداشته باشد [جباری، ۱۳۷۷]. گسترش روش‌های تحلیل سازه‌های با درجات نامعینی بالا و کاربرد کامپیوترهای مدرن، توسعه عرشه‌های ارتوتروپیک، کاربرد فولادهای پر مقاومت و روش‌های جدید نصب، استفاده از تجربیات پل‌های قبلی، توانایی مدل‌سازی در آزمایشگاه‌ها در توسعه طراحی و ساخت پل‌های کابلی مؤثر بوده‌اند. امروزه بیش از یک‌صد پل کابلی در دنیا وجود دارد که تقریباً یک‌سوم از آن‌ها در کشور ژاپن قرار دارد. [وحدت، ۱۳۷۷]. پل‌های تقویت‌شده با کابل را می‌توان به دو گروه پل‌های معلق و پل‌های متکی بر کابل تقسیم‌بندی نمود که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود.



نمودار ۱. انواع پل‌های کابلی

بالای پایه‌ها عبور می‌کنند در دهانه‌ها آویزان هستند. دو انتهای کابل‌ها در تکیه‌گاه‌های ثابتی مهار می‌شوند که معمولاً از بلوک‌های بتنی حجیمی ساخته می‌شوند عرشه پل به‌وسیله تعدادی آویز قائم از کابل‌های اصلی آویزان می‌شود یا ممکن است کابل‌ها بار وارده را مستقیماً تحمل نمایند [رنجبر، ۱۳۸۶]. اولین پل معلق از آهن در سال ۱۷۹۶ در آمریکا با دهانه ۲۱ متر ساخته شد. امروزه پل‌های معلق با دهانه آزاد در حدود ۲۰۰۰

ساخت پل‌های سنگی به دوران قبل از رومی‌ها برمی‌گردد. در اروپا اولین پل‌های طاقی ۸۰۰ سال قبل از میلاد مسیح، برای عبور از رودخانه‌ها از جنس مصالح سنگی ساخته شدند. از قرن یازدهم به بعد روش‌های ساختن پل‌ها پیشرفت چشمگیری کرده و استفاده از دستگاه‌های فشاری از مصالح سنگی و آجر با ملاتهای مختلف و دستگاه‌های خمشی از چوب متداول گردید. قرن بیستم شروع استفاده از پل‌های فلزی و سپس پل‌های بتن مسلح بود.

پیدایش مصالح جدید و به کار گرفتن روش‌های نوین در ساخت‌وساز بناها و پیشرفت علم و تکنولوژی همراه با رشد صنعتی جوامع موجبات تحولات عظیمی را در عرصه پل‌سازی سبب شد و این نتیجه را در پل‌های ساخته‌شده در یک سده‌ی اخیر در کشورمان نیز می‌بینیم با پیدایش این تحولات روش‌های سنتی جای خود را به جدیدترین تکنولوژی‌های صنعتی دادند. این پیشرفت‌ها انواع مختلفی از پل‌ها را به لحاظ ساختار ایستایی و همچنین به لحاظ گوناگونی مصالح به‌کاررفته و ابعاد و اندازه به وجود آوردند [هاشمی، ۱۳۸۶].

۳-۱-پل‌های معلق

این پل‌ها عموماً در دهانه‌های خیلی بزرگ و بر روی رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. پل‌های معلق برای عبور از دره‌های عمیق یا رودخانه‌هایی که جریان آب آن‌ها تند است و وجود پایه‌های میانی امکان‌پذیر نیست، راه‌حل خوبی به شمار می‌روند [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸]. در این‌گونه پل‌ها دو عدد پایه‌بلند در دو طرف دهانه قرار دارند و دودسته کابل که از

Archive of SID

کابل‌ها به برج می‌باشد. در پل معلق کابل‌ها آزادانه از این سر تا آن سر دو برج کشیده شده‌اند و انتقال بار به تکیه‌گاه‌های واقع در هر انتها صورت می‌گیرد. در پل کابلی، کابل‌ها درحالی‌که به برج‌ها متصل‌اند به‌تنهایی بار را تحمل می‌کنند. در مقایسه با پل‌های معلق، پل کابلی به کابل کمتری نیاز دارد، می‌توان آن را از قطعات بتن پیش‌ساخته مشابه ساخت و همچنین احداث آن سریع‌تر است [نجفیان، ۱۳۹۴]. پل‌های متکی بر کابل به دلیل جاذبه زیبایی‌شناسی، سهولت نصب، کاربرد پربازده مواد ساختاری و دیگر مزیت‌های قابل توجه، در چند دهه گذشته کاربرد گسترده‌ای در سراسر جهان داشته‌اند [مختاری، رحمت آبادی، ۱۳۹۰].

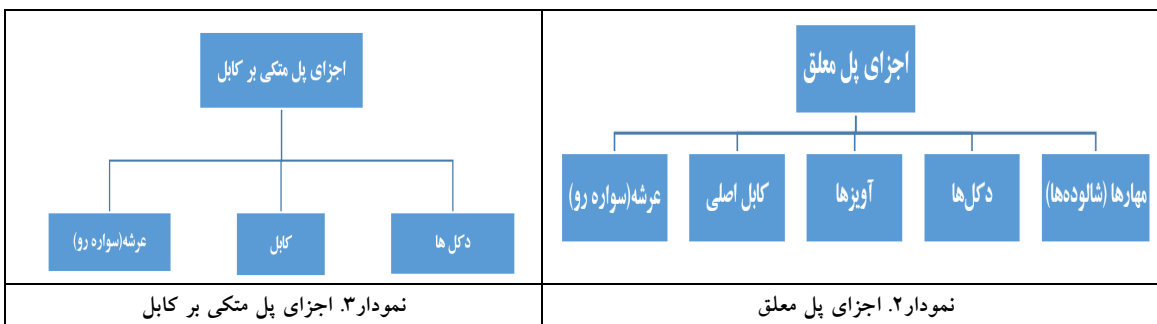
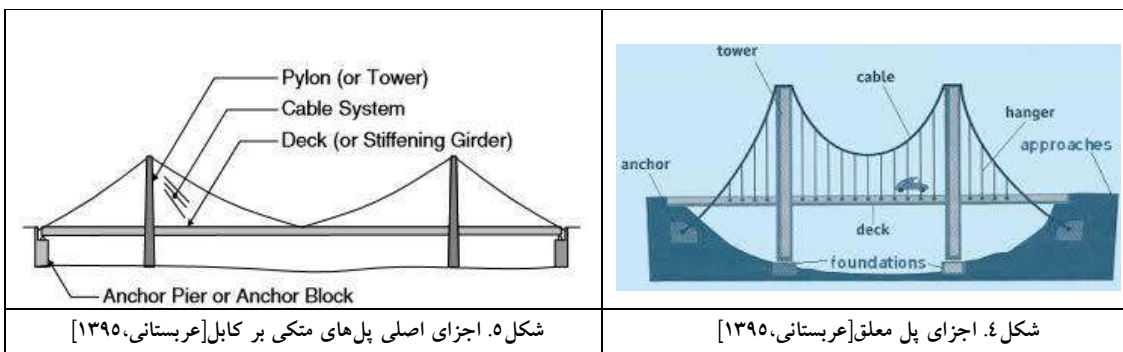
۴- اجزای پل‌ها

پل‌های کابلی از اجزای مختلفی مثل عرشه یا سواره‌رو، دکل، کابل اصلی، آویز، شالوده و... تشکیل شده‌اند که در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. پل‌های معلق از اجزایی مانند عرشه (سواره رو)، کابل اصلی، آویزها، دکل‌ها، مهارها و پل‌های کابلی از اجزایی مانند عرشه (سواره رو)، کابل، دکل‌ها تشکیل شده‌اند.

متری ساخته شده‌اند که پل آکاشی کایکو در ژاپن نمونه‌ای از آن است [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸].

۳-۲- پل متکی بر کابل

اصل اساسی در بررسی رفتار این پل‌ها این است که دهانه پل توسط کابل‌های زیادی که به یک پایه بلند نصب شده‌اند. در نقاط متعددی گرفته می‌شود. در واقع هر پل کابل ایستا از یک شاه‌تیر و یک یا چند برج که در دو انتهای دهانه یا در وسط دهانه قرار دارند تشکیل شده است. کابل‌هایی به‌صورت قطری از این برج‌ها به دو طرف کشیده می‌شوند و شاه‌تیرها را نگه می‌دارند. [رنجبر، ۱۳۸۶] اولین پل کابل ایستا پل استروم سند است که در سال ۱۹۵۵ در سوئد ساخته شد. به دلایل مختلفی چون زیبایی، اقتصادی بودن، سهولت در اجرا و سختی بالا که این پل‌ها نسبت به پل‌های معلق مشابه خود دارند، پل‌های کابل ایستا به‌عنوان مناسب‌ترین نوع از پل‌های تقویت شده کابلی شناخته شده‌اند که برای دهانه‌های ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر استفاده می‌شوند. [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸]. ممکن است به نظر برسد پل کابلی شبیه پل معلق است. بااینکه هر دو دارای عرشه هستند که از کابل‌ها آویزان‌اند و هر دو دارای برج هستند، ولی این دو پل بار عرشه را به طرق بسیار متفاوتی نگه می‌دارند. این اختلافات در چگونگی اتصال



۴-۱-عرشه

نقش عرشه یا سواره‌روها سطحی برای عبور است که به پایدارسازی کابل‌های پل کمک می‌کنند. نیروی خمشی در عرشه‌ها نیروی غالب می‌باشد. سواره‌روها را به دو صورت می‌سازند.

خرپایی

با مقطع آئرودینامیک، که علت آن عملکرد مناسب‌تر پل در برابر باد می‌باشد. [NIELS J-2012] عرشه‌ها نیز در پل‌های متکی بر کابل همانند پل‌های معلق به دودسته‌ی خرپایی و آئرودینامیک تقسیم می‌شوند [NIELS J-2012]. تیرهای اصلی به وسیله کابل‌های کشیده مایل، که در پیلون‌ها مهارشده‌اند، نگهداری می‌شوند. پیلون‌ها در محل پایه‌های اصلی قرار دارند و به همین دلیل نیروی کابل‌ها می‌تواند به سیستم تکیه‌گاهی منتقل شود دشوار می‌سازد. همچنین سیستم پروانه‌ای

موجب افزایش مشکلات کمانش به علت ارتفاع بلندتر پایه آزاد در برج می‌شود [امیری؛ خالقیان؛ شیخی، ۱۳۹۱]. عرشه عنصر سازه‌ای است که قسمت عمده‌ای از بار خارجی بر روی یک پل کابلی را تحت پوشش قرار می‌دهد. زیرا کل بار ترافیکی به‌طور مستقیم به عرشه اعمال می‌شود و در اغلب موارد هر دو بار مرده و بار باد برای عرشه بزرگ‌تر از سیستم کابل است. بلافاصله عرشه باید بتواند بار را در محل انتقال دهد درحالی‌که از سیستم کابلی در انتقال عمودی بار تا نقاط پشتیبانی در پایه‌های اصلی کمک‌های قاطعی دریافت می‌کند دشوار می‌سازد. همچنین سیستم پروانه‌ای موجب افزایش مشکلات کمانش به علت ارتفاع بلندتر پایه آزاد در برج می‌شود [NIELS J-2012].



شکل ۷. عرشه‌ی آئرودینامیک [NIELS J-2012]



شکل ۶. عرشه‌ی خرپایی [NIELS J-2012]

۴-۴- دکل‌ها

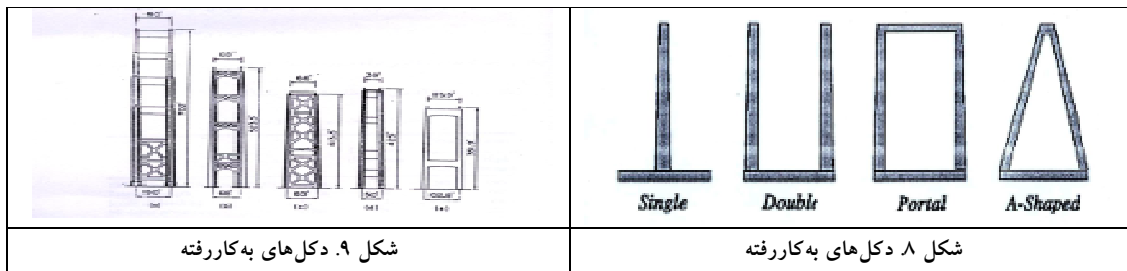
انتقال‌دهنده‌ی نیرو از کابل اصلی به زمین هستند در حقیقت تکیه‌گاه پل هستند. [D.M. Siringoringo, Y. Fujino-2011]. وظیفه اصلی دکل‌ها نگهداری مستقیم کابل‌ها و انتقال بارهای وارده از آنها به فونداسیون می‌باشد [طاحونی، شاپور، ۱۳۸۵]. دکل‌ها دارای اشکال متفاوتی هستند. آنها را می‌توان به‌عنوان یک ستون تک‌محور از طریق مرکز عرشه طراحی کرد، اما گاهی اوقات نیز در یک‌طرف قرار دارد پرکاربردترین انواع دکل‌ها از نظر شکل ظاهری عبارت‌اند از H شکل، A شکل، Y شکل معکوس، دکل‌های الماسی شکل [T.L.M. Morgado-2015]. انتقال دهنده نیرو از کابل اصلی به زمین می‌باشند در حقیقت تکیه‌گاه پل می‌باشند. [NIELS J-2012].

۴-۲- کابل اصلی

نقش کابل اصلی در پل‌های معلق تحمل وزن سواره‌رو می‌باشد. نسبت افت به دهانه را در کابل پل معلق لحاظ می‌کنند. در پل‌های متکی بر کابل، کابل‌ها باعث شده که دکل را به عرشه متصل می‌کنند. نحوه چیدمان و آرایش کابل در این سیستم‌ها بسیار متنوع است و در ادامه این مقاله مورد بحث واقع شده است.

۴-۳- آویزها

رابط بین سواره‌رو و کابل اصلی هستند که وزن سواره‌رو را به کابل اصلی انتقال می‌دهند [T.L.M. Morgado-2015]. آویزها در پل‌های معلق به کار می‌روند.



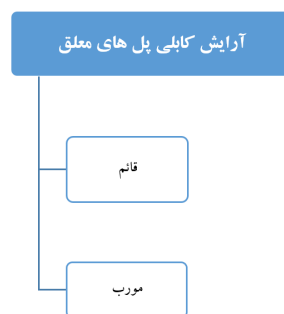
۴-۵- مهارها (شالوده‌ها)

کابل‌ها را به انتهای سواره‌رو وصل می‌کنیم در این‌گونه پل‌ها در سواره‌رو پیش تنیدگی رخ می‌دهد.
[Chong Wu, Yuan Yuan, Xu Jiang-2016]

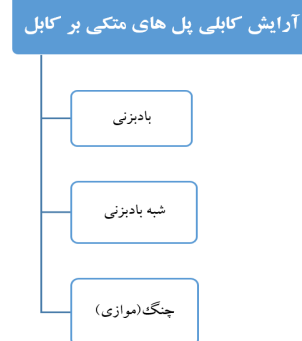
این اجزاء رانش‌های کابل را مهار می‌کنند و نیروی رانشی کابل‌ها را به زمین منتقل می‌کنند. وزن بلوک‌ها و واکنش آن‌ها با زمین کابل را مهار می‌کند. در پل‌های خود مهار انتهای

۴-۶- انواع آرایش کابل‌ها

آرایش کابل‌ها در پل‌های معلق به ۲ دسته مورب و قائم و در پل‌های متکی بر کابل به ۳ دسته بادبزی، شبه بادبزی، چنگ (موازی) تقسیم بندی می‌شوند.



نمودار ۵. آرایش کابلی پل‌های معلق



نمودار ۴. آرایش کابلی پل‌های متکی بر کابل

۴-۶-۱- آرایش کابلی پل‌های معلق

نوع پل‌ها، پل‌های معلق گفته می‌شود که در شکل زیر مشاهده می‌شود.

پل معلق، پلی است که همراه عرشه‌اش از کابل‌هایی معلق شده است که معمولاً افراشته روی دکل‌ها هستند. یا به عبارت دیگر نوعی از پل‌های کابلی با سیستم آویزهای قائم و مایل هستند. است که به این



مقابل حرکات افقی که باعث افزایش پایداری در مقابل فعالیت‌های لرزه‌ای می‌شود، آزاد گذاشتن اتصال افقی عرشه به پایلون و توان تحمل حرکت‌های ناشی از تغییرات حرارتی را با استفاده از درزهای انبساط اشاره کرد [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸].

سیستم کابلی نیمه بادبزنی (بادبزنی اصلاح شده)

با ترکیب دو سیستم قبلی می‌توان سیستم کابلی جدیدی را ساخت که مزایای دو سیستم قبلی را در برداشته باشد. در این سیستم می‌توان با توزیع کابل‌ها در قسمت بالایی پایلون جزئیات اتصال مهارشدگی کابل‌ها را به‌خوبی طراحی کرد. سیستم کابل نیمه بادبزنی به‌عنوان یک سیستم ایدئال در تعداد زیادی پل‌های کابل - ایستای مدرن استفاده شده است [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸]. الگویی که معمار به لحاظ زیبایی‌شناسی مدنظرش است در انتخاب نوع آرایش کابلی مهم است زیرا کابل‌های نورپردازی شده در شب جلوه‌ی زیبایی به شهر می‌دهند. در شکل‌های زیر انواع آرایش کابلی در پل‌های متکی بر کابل را می‌بینید [NIELS J-2012].

۴-۶-۲- انواع آرایش کابلی در پل‌های متکی بر کابل

نوع سیستم کابلی بر عواملی چون عملکرد سازه‌ای پل، روش‌های اجرا و نصب و هزینه‌های اقتصادی تأثیر می‌گذارد. سیستم کابلی موازی، بادبزنی (شعاعی) و نیمه بادبزنی از سیستم‌های رایج در این خصوص هستند.

سیستم کابلی موازی

این سیستم هرچند از لحاظ زیبایی خوشایندترین است. اما از نظر استاتیکی و اقتصادی بهترین طرح نیست [یزدانی پرائی، ۱۳۸۸].

سیستم کابلی بادبزنی (شعاعی)

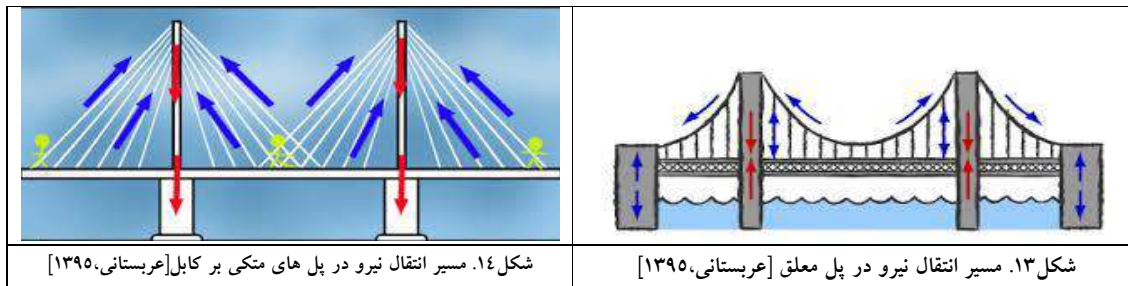
در این سیستم تمامی کابل‌های آویز در نوک پایلون مهار می‌شوند و باعث پیچیدگی سازه‌ای در نوک پایلون می‌شوند و همین کار را دشوار می‌کند. از مزایای سیستم کابلی بادبزنی می‌توان کمتر بودن میزان وزن کابل‌ها نسبت به سیستم کابلی موازی، کاهش نیروی محوری افقی در عرشه به دلیل افزایش زاویه قائم کابل‌ها و انعطاف‌پذیری خوب سازه در

<p>شکل ۱۲. سیستم چنگ [NIELS J-2012] [http://mahstan.ir]</p>	<p>شکل ۱۱. سیستم شبه بادبزنی [NIELS J-2012] [http://www.civil-learning.blogfa.com]</p>	<p>شکل ۱۰. سیستم بادبزنی [NIELS J-2012] [https://www.outtakingpictures.com .]</p>

مسیر انتقال نیرو در پل‌های کابلی

مسیر انتقال نیروها در پل‌های معلق به این صورت است که وزن سواره‌روها به آویزها و از آویزها به کابل اصلی و از کابل اصلی به کل‌ها و شالوده‌های انتهایی منتقل می‌شود [عربستانی، ۱۳۹۵]. نحوه‌ی انتقال نیرو در پل‌های متکی بر کابل از عرشه به کابل‌ها و از کابل‌ها به دکل می‌باشد و دکل نیز نیرو را به زمین انتقال می‌دهد که در شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

الگوی پروانه‌ای زیباتر و برای پیلونهای باریک اقتصادی‌تر می‌باشد. در این آرایش طول کابل‌ها بیشتر شده و کابل‌ها در یک نقطه همگرا و به هم بسیار نزدیک می‌شوند. این حالت موجب ایجاد مشکلاتی در آرایش مهارها شده و عملیات تعویض را دشوار می‌سازد. همچنین سیستم پروانه‌ای موجب افزایش مشکلات کماتش به علت ارتفاع بلندتر پایه آزاد در برج می‌شود [امیری؛ خالقیان؛ شیخی، ۱۳۹۱].



شکل ۱۴. مسیر انتقال نیرو در پل های متکی بر کابل [عربستانی، ۱۳۹۵]

شکل ۱۳. مسیر انتقال نیرو در پل معلق [عربستانی، ۱۳۹۵]

بررسی و ارزیابی پل ها

شد [۱۲] [مارگولیوس، ۱۳۹۲] [امینی، ۱۳۸۴] [جعفرپوریان، ۱۳۸۰] [علیزاده، ۱۳۸۳] [امیری؛ خالقیان؛ شیخی، ۱۳۹۱] [گلابچی، ۱۳۸۹] [هاشمی، ۱۳۸۶].

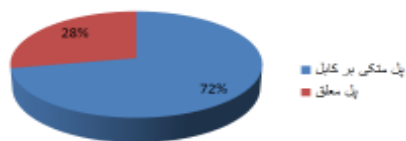
به بررسی حدود ۳۷ نمونه از پل های کابلی پرداخته شد و اطلاعات مربوط به هر کدام از پل ها جمع آوری شد و در جدول زیر دسته بندی شد و به تجزیه و تحلیل هر کدام از موارد پرداخته

ردیف	نام پل	سال ساخت	طول	عرض	موقعیت قرارگیری	نوع پل کابلی	نوع دکل	نوع آرایش کابلی	نوع عرشه
۱	Tatara	۱۹۹۹	۸۹۰	۳۰٫۶	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۲	Pont de Normandie	۱۹۹۵	۸۵۶	۲۳٫۶	فرانسه	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۳	Second Nanjing	۲۰۰۱	۶۲۸	۳۷٫۲	چین	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۴	Qingzhou Minjiang	۲۰۰۱	۶۰۵	۲۹	چین	پل متکی بر کابل	دکل A شکل	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۵	Yangpu	۱۹۹۳	۶۰۲	۳۰٫۳۵	چین	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	خرپایی
۶	Third wuhan	۲۰۰۲	۶۱۸	-	چین	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	خرپایی
۷	Xupu	۱۹۹۷	۵۹۰	۳۵	چین	پل متکی بر کابل	دکل A شکل	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۸	Rion-Antirion	۲۰۰۴	۵۶۰	۲۷٫۲	یونان	پل متکی بر کابل	آزاد	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۹	Skarnsudet	۱۹۹۱	۵۳۰	-	-	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۰	Queshi	۱۹۹۹	۵۱۸	۳۰	چین	پل متکی بر کابل	دکل A شکل	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۱	Tsurumi Tsubasa	۱۹۹۴	۵۱۰	-	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۲	Jin'an	۲۰۱۶	۵۰۰	۲۷	چین	پل کابلی معلق	دکل H شکل	قائم	خرپایی
۱۳	Ting kau	۱۹۹۸	۴۷۵	۳۸	چین	پل متکی بر کابل	فرم آزاد	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۴	Higashi-kobe	۱۹۹۲	۴۸۵	۲۰	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	چنگ	خرپایی
۱۵	Seo-Hae	۲۰۰۰	۴۷۰	۳۴	کره	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۶	Alex-Fraser	۱۹۸۶	۴۶۵	۳۲	کانادا	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۷	Yangpu	۱۹۸۹	۴۶۰	۳۰٫۳۵	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۱۸	Clifton & Menai	۱۸۶۴	۴۱۲	۹٫۴	انگلستان	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	آئرو دینامیک
۱۹	Brooklyn	۱۸۸۳	۴۸۶	۲۵٫۹	آمریکا	پل کابلی معلق	فرم آزاد	مورب	خرپایی
۲۰	Humber	۱۹۸۱	۴۱۰	۲۸٫۵	انگلستان	پل کابلی معلق	قاب ویرند بل	مورب	آئرو دینامیک
۲۱	Akashi kaikyo	۱۹۹۸	۱۹۹۱	-	ژاپن	پل کابلی معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۲۲	East Grate Belt	۱۹۹۸	۱۶۲۴	۳۱	دانمارک	پل کابلی معلق	قاب ویرند بل	قائم	آئرو دینامیک
۲۳	George Washington	۱۹۳۱	۱۰۶۷	۳۶	آمریکا	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	خرپایی
۲۴	Golden Gate	۱۹۳۷	۱۲۸۰٫۲	۲۷٫۴	آمریکا	پل کابلی معلق	قاب ویرند بل	قائم	خرپایی
۲۵	Verrazano Narrows	۱۹۶۴	۱۲۹۸	۳۱	نیویورک	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	خرپایی
۲۶	Tejo	۱۹۶۶	۱۰۱۲٫۸	-	سانفرانسیسکو	پل کابلی معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۲۷	Millennium	۲۰۰۰	۱۴۴	۴	انگلستان	پل کابلی معلق	دکل Y شکل	مورب	آئرو دینامیک
۲۸	Alamillo Bridge	۱۹۸۹	۲۰۰	۳۲	اسپانیا	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرو دینامیک
۲۹	Oresund	۲۰۰۰	۴۹۰	۲۳٫۵	دانمارک	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	چنگ	خرپایی
۳۰	Royal Victoria	۱۹۹۸	۱۲۷٫۵	-	انگلستان	پل متکی بر کابل	آزاد	بادبزنی	آئرو دینامیک
۳۱	Millau	۲۰۰۱	۳۴۲	۳۲۰٫۵	فرانسه	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرو دینامیک
۳۲	Light Rail Train					پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرو دینامیک
۳۳	Samuel Beckett	۲۰۰۷	۱۲۰	۲۷	ایرلند	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرو دینامیک
۳۴	kohlbrand	۱۹۷۴	۳۲۵	۱۷٫۵	آلمان	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	شبه بادبزنی	آئرو دینامیک
۳۵	Ohnaruto Bridge	۱۹۸۵	۸۷۶	۲۳	ژاپن	پل معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۳۶	Macintosh Island	۲۰۰۷	۵۵	۴٫۸	استرالیا	پل متکی بر کابل	دکل Y معکوس	بادبزنی	خرپایی
۳۷	Pasco-Kennewick Bridge	۱۹۲۲	۴۳۲	۲۴٫۴	آمریکا	پل متکی بر کابل	قاب مهاربندی	بادبزنی	آئرو دینامیک

انواع پل‌های کابلی

ساخته شده حدود ۲۸٪ از نوع پل‌های کابلی از نوع معلق می‌باشد. پل‌های متکی بر کابل از آنجاکه از کابل کمتر استفاده می‌شود بیشترین کارایی را دارند.

انواع پل‌های کابلی به دودسته پل‌های کابلی معلق و پل‌های متکی بر کابل تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به بررسی نمونه‌های انجام شده، بیشترین پل‌های کابلی ساخته شده حدود ۷۲٪ از نوع پل‌های متکی بر کابل و کمترین پل‌های

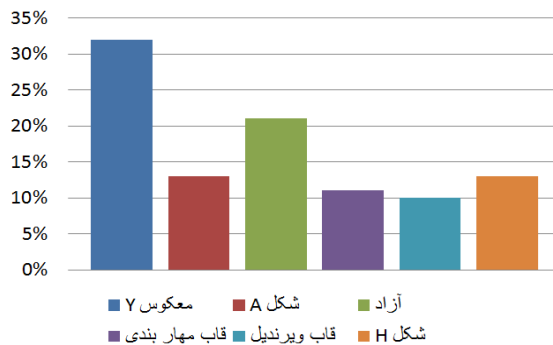


نمودار ۶. انواع پل‌های کابلی

دکل‌های پل‌های کابلی

به کار رفتند از نوع Y معکوس و کمترین دکل‌هایی که برای ساخت پل‌های کابلی به کاررفته‌اند از نوع قاب ویرندیل بوده‌اند.

با توجه به نمونه‌های بررسی شده، دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی به کار می‌روند از شکل‌های مختلفی استفاده می‌شوند که عبارت‌اند از: شکل a - Y معکوس- قاب مهاربندی شده- قاب ویرندیل- فرم آزاد. بیشترین دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی



نمودار ۷. انواع دکل‌های پل‌های کابلی

عرشه پل‌های کابلی

و حدود ۳۳٪ از عرشه‌های پل‌های کابلی به روش خرپایی احداث می‌شود.

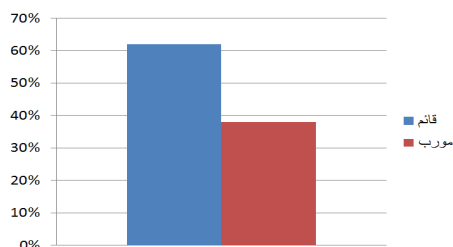
عرشه پل‌های کابلی به دودسته خرپایی و آنرودینامیک تقسیم می‌شوند. بیشترین نوع عرشه به کاررفته در پل‌ها چیزی حدود ۶۷٪ از نوع آنرودینامیک است که بسیار رایج بوده است



نمودار ۸. عرشه پل‌های کابلی

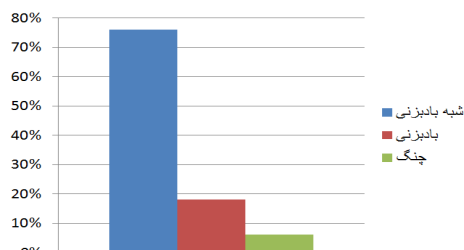
آرایش کابل‌ها

است. همچنین الگوی آرایشی کابل‌ها در پل‌های معلق به دو صورت قائم و مورب می‌باشد که بیشترین پل‌های معلق ساخته‌شده به روش کابل‌های قائم بوده‌اند و کمترین آن‌ها به روش کابل‌های مورب بوده‌اند.



نمودار ۱۰. آرایش کابل در پل‌های معلق

الگوی آرایشی کابل‌ها در پل‌های متکی بر کابل بر ۳ دسته‌ی چنگ، بادبزی و شبه بادبزی تقسیم می‌شود که با بررسی نمونه‌های انجام‌شده متوجه گردید که حدود ۷۶٪ پل‌های ساخته‌شده از نوع شبه بادبزی و کمترین آن‌ها به صورت الگوی چنگ یا موازی با حدود ۶٪ را به خود اختصاص داده



نمودار ۹. آرایش کابل در پل‌های متکی بر کابل

۵- نتیجه‌گیری

بیشترین نوع عرشه به‌کاررفته در پل‌ها چیزی حدود ۶۷٪ از نوع آنرویدنامیک است که بسیار رایج بوده است و حدود ۳۳٪ از عرشه‌های پل‌های کابلی به روش خرابایی احداث می‌شود. بیشترین دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی به کار رفتند از نوع لا معکوس و کمترین دکل‌هایی که برای ساخت پل‌های کابلی به‌کاررفته‌اند از نوع قاب ویرند یل بوده‌اند. حدود ۷۶٪ پل‌های ساخته‌شده از نوع شبه بادبزی و کمترین آن‌ها به صورت الگوی چنگ یا موازی با حدود ۶٪ را به خود اختصاص داده است. بیشترین پل‌های معلق ساخته‌شده به روش کابل‌های قائم بوده‌اند و کمترین آن‌ها به روش کابل‌های مورب بوده‌اند.

پل‌های کابلی به علت ظاهر خوشایند و فرم زیبا، سهولت و سرعت‌بالا در ساخت و ساز، ظرافت ساختار سیستم سازه‌ای و هزینه اجرای مناسب، به یکی از متداول‌ترین سیستم‌های پل‌سازی در سراسر جهان تبدیل شده‌اند. هدف از انجام این پژوهش، تحلیل و ارزیابی انواع فرم و الگوهای مختلف در آرایش کابل‌ها و انواع عرشه‌ها در سیستم پل‌های کابلی بود که با بررسی حدود ۴۰ نمونه پل‌های کابلی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد: بیشترین پل‌های کابلی ساخته‌شده حدود ۷۲٪ از نوع پل‌های متکی بر کابل و کمترین پل‌های ساخته‌شده حدود ۲۸٪ از نوع پل‌های کابلی از نوع معلق می‌باشد.

۶- مراجع

- عربستانی، ن.، (۱۳۹۵)، "طراحی مرکز اقامتی درمانی طب سنتی ایران و پل کابلی متصل به آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد. ارشد.

- علیزاده، ر.، (۱۳۸۳)، "معیار تعیین حالت‌های کابل در پل‌های کابلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد.

- امیری، س.، خالقیان، م.، شیخی، م.، (۱۳۹۱)، "تحلیل و طراحی پلهای کابلی"، ویراستار غلامرضا مقیمی، چاپ اول، انتشارات فرهنگ روز، تهران.

- امیری، س.، خالقیان، م.، شیخی، م.، "تحلیل و طراحی پل‌های کابلی"، (۱۳۹۱)، ویراستار غلامرضا مقیمی، چاپ اول، انتشارات فرهنگ روز، تهران.

- جعفرپوریان، م.، (۱۳۸۳)، "بررسی نحوه اتصال آویز به کابل در پل معلق عابریپاده، پایان نامه کارشناسی ارشد"، دانشکده پردیس بین‌المللی ارس.

- ستایش، ع.م.، (۱۳۹۴)، "فرهنگ اصطلاحات مهندسی پل، نسخه دیجیتال"، انتشارات نروزی، ویرایش اول.

- Chang F.K., Cohen E., (1981), "Long-span bridges: state-of-the-art", Journal of Structural Division, ASCE.
- Chong Wu, Yuan Yuan, Xu Jiang, (2016), "Fatigue Behavior Assessment Method of the Orthotropic Steel Deck for a Self-anchored Suspension Railway Bridge", Procedia Engineering, Vol. 161, pp. 91-96.
- D.M. Siringoringo, Y. Fujino, (2011), "Observed Along wind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder, Procedia Engineering", Vol. 14, pp.2358-2365.
- Dictionary of construction, (2016), "Electronic reference formats recommended by the APA", Retrieved December 9, from <http://www.dictionaryofconstruction.com/definition/suspension-bridge.html>.
- Gimsing NJ., (1997), "Cable Supported Bridges, Concept and Design", 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
-<http://mahstan.ir/1394/06/20/tunnel-bridge-oresund/>. (accessed May 2,2018)
- <http://www.civil-learning.blogfa.com/post/37>. (accessed May 2,2018)
- <https://www.outtakingpictures.com/Travel/USA-Tricities-WA/i-Zqn6XGQ>. (accessed Dec 19,2018)
- Kevin Guest, James, (2001), "A Critique of Calatrava's Alamillo Bridge", Princeton University, pp.2001 – 2200.
- Niels J. Gimsing Christos T. Georgakis, (2012), "Cable Supported Bridges Concept and Design", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex.
- Price, P., (2016), "Scenic USA – Utah [online]. Available from: <http://www.scenicusa.net/041412.html>". [Accessed on 12 may 2017].
- T.L.M. Morgado, A. Sousa e Brito, (2015), "A failure analysis study of a pre stressed steel cable of suspension bridge, Case Studies in Construction Materials", Vol.3, December.
- Wang PH, Yang CG., (1996), "Parametric Studies on Cable-Stayed Bridges, Computers & Structures, 60 (2)", pp.243-260.
- امینی، ح، (۱۳۸۴)، "بررسی اثر شل شدگی در رفتار پل معلق به صورت موردی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز.
- جبجاری، م، (۱۳۷۷)، "بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی پل‌های کابلی ایستا تک محوری"، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه تربیت مدرس.
- رنجبر، م، صادقی، م، (۱۳۸۶)، "بررسی سیستم‌های سازه‌ای پل‌های کابلی و ارایه الگوی طراحی شده".
- طاحونی، ش، "طراحی پل (پل‌های بتن مسلح، فولادی و پیش‌تنیده)"، چاپ هفتم، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- گلابچی، م. علاقه‌مندان، م، (۱۳۸۹)، "پل‌های ایران و جهان تعامل معماری، تکنولوژی و زیبایی"، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- مارگولیوس، ا، (۱۳۹۲)، "معمار + مهندس = ساختار"، ترجمه محمود گلابچی، دانشگاه تهران.
- مقدسی، ه، (۱۳۸۶)، "بررسی آویزهای معلق عابر پیاده، پایان نامه کارشناسی ارشد"، دانشگاه آزاد اسلامی شبستر.
- نجفیان، ج، (۱۳۹۴)، "پل‌های معلق یا کابلی".
- نجمه مختاری، م. و دشتی رحمت آبادی، ع، (۱۳۹۵)، "سازه‌های کابلی از فرم تا سازه"، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری.
- وحدت، ک، (۱۳۷۷)، "بررسی رفتار پل‌های کابلی ایستا، سمینار کارشناسی ارشد.
- هاشمی، سی، م، (۱۳۸۶)، "پل از منظر معماری"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- یزدانی پرائی، ه، (۱۳۸۸)، "بهینه‌سازی سامانه نگهدارنده پل در پل‌های کابل ایستای ترک‌های"، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه تربیت مدرس.

Investigation and Evaluation of Deck, Mast and Cable Pattern of Cable Bridges

*Sahar Eskandari, M.A., Student, Department of Architecture Technology, Kashan University,
Kashan, Iran.*

E-mail: s.eskandari.s20@gmail.com

Received: October 2021- Accepted: June 2022

ABSTRACT

Cable bridges are one of the most advanced bridge construction systems. With the expansion of the pre-tensioning industry in bridges in the years after World War II, the construction of this type of bridge, which covered longer spans, flourished. So that by choosing the correct shape of the cables, you can save a lot of costs in the construction of cable stairs. The arrangement of the cables, etc. was discussed. Examination of about 40 samples of cable stays and the following results were obtained: Most cable-stayed bridges are cable-stayed bridges and the fewest cable-stayed bridges are suspended. The most common type of deck used in bridges is about 67% aerodynamic and about 33% is built by trusses. The cables used were inverted y-type and the fewest masts used to build cable-stayed bridges were of the Viand Yel frame type. Were vertical and the least of them were diagonal cables.

Keywords: Bridge, Structure, Cable Bridge, Suspension Bridge, Pattern of Bridges