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 پیش تنیدگی 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. به‌طوری‌که با انتخاب صحیح شکل آرایش کابل‌ها می‌توان صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌های ساخت پل‌های کابلی انجام داد.در این پژوهش با بررسی بر روی حدود ۴۰ 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

پل‌ها به‌مانند 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 رخ‌داده است و در بسیاری موارد، فتح این سازه استراتژیک تأثیر برجسته‌ای بر نتیجه نهایی جنگ داشته است. گاهاً پل‌ها مرکز دهکده یا شهر بوده‌اند [عبدالمتین،۱۳۹٤] . پل‌ها را از جهات مختلف ازجمله طول دهانه، مصالح مورداستفاده، روش ساخت، نوع استفاده و همچنین نوع سیستم سازه‌ای می‌توان طبقه‌بندی نمود. ازنظر 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 به‌عنوان نمونه‌ای از این سازه‌ها می‌باشد ساخت و زیبایی از سوی دیگر سبب شده تا در نیم‌قرن اخیر از پرکاربردترین سازه‌ها برای ارتباط دهانه‌های متوسط تا بزرگ (از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰میلی‌متر) مورداستفاده قرار گیرند[Gimsing NJ-1997]. مهمترین مزایای پل‌های کابلی 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 سازهای 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 نمیباشد. 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.

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 امتدادیافته‌اند 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،۱۳۹٤] . در پل‌های متکی بر کابل، کابل‌ها به برج‌ها متصل می‌شوند و این برج‌ها به‌تنهایی 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،۱۳۹٤] . در این تحقیق ضمن معرفی انواع پل‌ها، به معرفی پل‌های کابلی و ارزیابی و طبقه‌بندی انواع فرم آرایش کابل‌ها در این سیستم‌ها پرداخته‌شده است. برای معرفی انواع فرم کابل در این نوع از پل، ویژگی چیدمان مختلف کابل‌ها بررسی‌شده است.

سوالات تحقیق

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

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 به‌صورت 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 به‌وسیله‌ی انداختن سنگ یا درخت بر روی دهانه رودخانه ساخته‌شده است. در زمان‌های پیشین به‌جز انداختن چوب در آب، دستاورد دیگری برای کسب تجربه به‌منظور 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. به‌عنوان‌مثال، قوس یوتا توسط هیچ انسانی طراحی و ساخته نشده است و این قوس طبیعی که بین دو صخره عظیم واقع‌شده است، قدیمی‌ترین پل طبیعی موجود در دنیا می‌باشد. این قوس شباهت بسیار زیادی ازنظر فرم و شکل و خیز دهانه با پل‌های قوسی دارد. [گلابچی ،۱۳۸۹]

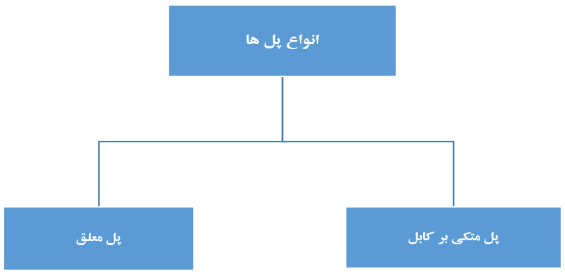
شکل ۱. پل یوتا در آمریکا [Price- 2016]

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،۱۳۸٦] .

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 درزمینه 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 نمودار۱ مشاهده می‌شود.



نمودار۱. انواع پل‌های کابلی

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 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،۱۳۸٦]. اولین پل معلق از آهن در سال ۱۷۹٦ در آمریکا با دهانه ۲۱ متر ساخته شد. امروزه پل‌های معلق با دهانه آزاد در حدود ۲۰۰۰

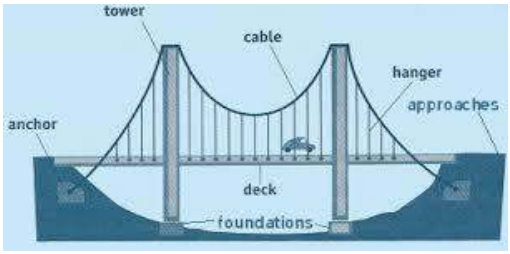
متری ساخته‌شده‌اند که پل آکاشی کایکو در ژاپن نمونه‌ای از آن است [یزدانی پرائی،۱۳۸۸] .

۳-۲-پل متکی بر کابل

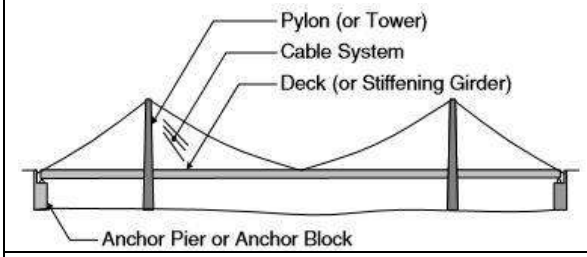
اصل اساسی در بررسی رفتار این پل‌ها این است که دهانه پل توسط کابل‌های زیادی که به یک پایه‌بلند نصب‌شده‌اند. در نقاط متعددی گرفته می‌شود. درواقع هر پل کابل ایستا از یک شاه‌تیر و یک یا چند برج که در دو انتهای دهانه یا در وسط دهانه قرار دارند تشکیل‌شده است. کابل‌هایی به‌صورت قطری از این برج‌ها به دو طرف کشیده می‌شوند و شاه‌تیرها را نگه می‌دارند. [رنجبر،۱۳۸٦] 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 متشابه خوددارند، پل‌های کابل ایستا به‌عنوان مناسب‌ترین نوع از پل‌های تقویت‌شده کابلی شناخته‌شده‌اند 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 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،1394]. پل‌های متکی بر کابل به دلیل جاذبه زیبایی‌شناسی، سهولت نصب، کاربرد پربازده مواد ساختاری و دیگر مزیت‌های قابل‌توجه، در چند دهه گذشته کاربرد گسترده‌ای در سراسر جهان داشته‌اند [مختاری،رحمت آبادی،۱۳۹۰].

٤- اجزای پل‌ها

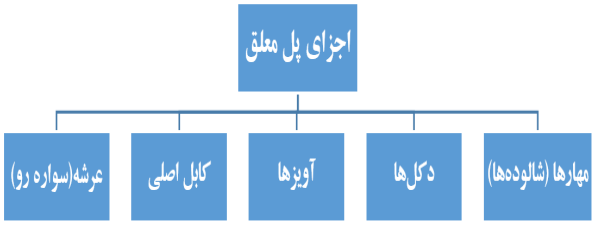
پل‌های کابلی از اجزای مختلفی مثل عرشه‌یا سواره‌رو، دکل، کابل اصلی، آویز، شالوده و.. تشکیل‌شده‌اند که در شکل ٤ و ٥ نشان داده شده است. پل های معلق از اجزایی مانند عرشه (سواره رو)، کابل اصلی، آویزها، دکل‌ها، مهارها و پل‌های کابلی از اجزایی مانند عرشه (سواره رو)، کابل، دکل‌ها تشکیل شده‌اند.



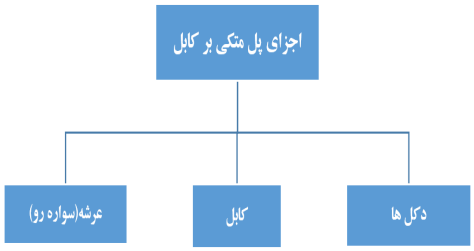
شکل٤. اجزای پل معلق[عربستانی،۱۳۹۵]



شکل٥. اجزای اصلی پل‌های متکی بر کابل[عربستانی،۱۳۹۵]



نمودار۲. اجزای پل معلق



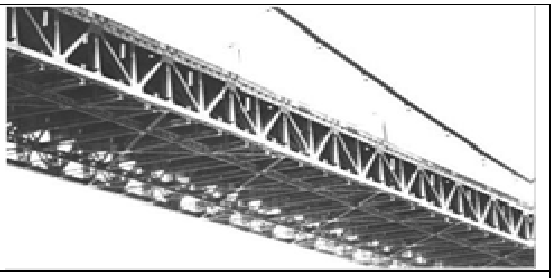
نمودار۳. اجزای پل متکی بر کابل

٤-١-عرشه

نقش عرشه‌یا سواره‌روها سطحی برای عبور است که به پایدارسازی کابل‌های پل کمک می‌کنند. نیروی خمش 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-۲۰۱۲]. تیرهای اصلی به‌وسیله کابل‌های کشیده مایل، که در پایلونها مهارشده‌اند، نگهداری می‌شوند. پایلونها 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-۲۰۱۲].



شکل ٦. عرشه‌ی خرپایی [NIELS J-۲۰۱۲]

شکل۷. عرشه‌ی آئرودینامیک [NIELS J-۲۰۱۲]

٤-٢- 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 برکابل، 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.

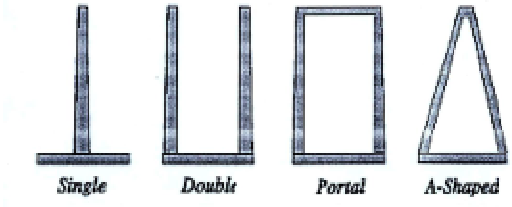
٤-٣ -آویزها

رابط بین سواره‌رو و کابل اصلی هستند که وزن سواره‌رو را به کابل اصلی انتقال می‌دهند[T.L.M. Morgado-۲۰۱۵]. آویزها در پل‌های معلق به کار می‌روند.

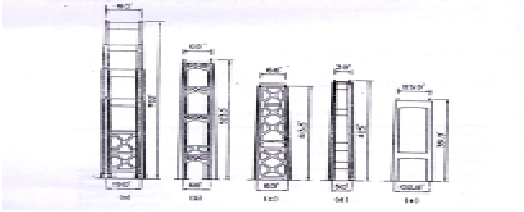
٤-٤- دکل‌ها

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 ازنظر شکل ظاهری عبارت‌اند از H شکل،A شکل،Yشکل معکوس، دکل‌های الماسی شکل [T.L.M. Morgado-۲۰۱۵]. انتقال دهنده نیرو از کابل اصلی به زمین می‌باشند در حقیقت تکیه‌گاه پل می‌باشند. [NIELS J-2012].



شکل ۸ دکل‌های به‌کاررفته



شکل ۹. دکل‌های به‌کاررفته

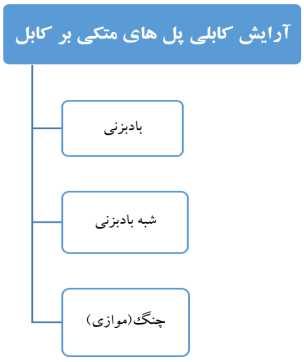
٤-٥-مهارها (شالوده‌ها)

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 کابل‌ها را به انتهای سواره‌رو وصل می‌کنیم در این‌گونه پل‌ها در سواره‌رو پیش تنیدگی رخ می‌دهد.

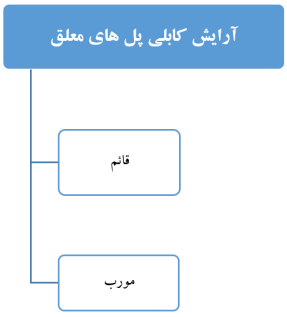
[Chong Wu, Yuan Yuan, Xu Jiang-2016].

٤-٦-انواع آرایش کابل‌ها

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



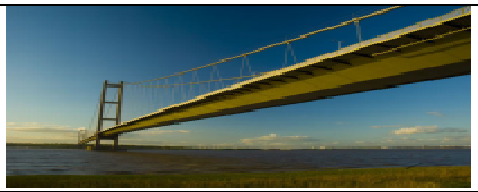
نمودار٤. آرایش کابلی پل‌های متکی بر کابل



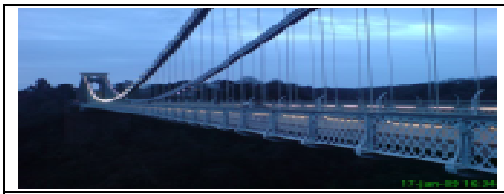
نمودار٥. آریش کابلی پل‌های معلق

٤-٦-١- آریش کابلی پل‌های معلق

پل معلق، پلی است که همراه عرشه‌اش از کابل‌هایی معلق شده است که معمولاً افراشته روی دکل‌ها هستند. یا به‌عبارت‌دیگر نوعی از پل‌های کابلی با سیستم آویزهای قائم و مایل هستند. است که به این نوع پل‌ها، پل‌های معلق گفته می‌شود که در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۲. پل معلق با آویز مایل[امینی، ۱۳۸٤]



شکل۳.پل معلق با آویز قایم[Chang F.K -1981].

٤-٦-٢-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

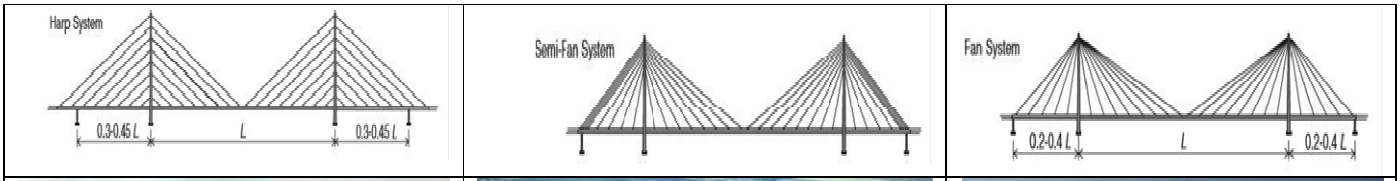
این سیستم هرچند ازلحاظ زیبایی خوشایندترین است. اما از نظر استاتیکی و اقتصادی بهترین طرح نیست[یزدانی پرائی،۱۳۸۸].

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 بادبزنی‌می‌توان 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 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 اصلاح‌شده)

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 جزییات اتصال مهارشدگی کابل‌ها را به‌خوبی طراحی کرد. سیستم کابل نیمه بادبزنی به‌عنوان یک سیستم ایدئال در تعداد زیادی پل‌های کابل – ایستای مدرن استفاده‌شده 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].



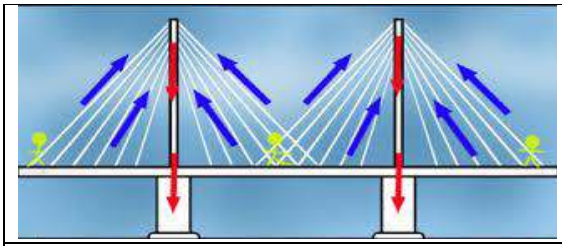
شکل ۱۰. سیستم بادبزنی	شکل ۱۱. سیستم شبه بادبزنی	شکل ۱۲. سیستم چنگ
[NIELS J-2012]	[NIELS J-2012]	[NIELS J-2012]
[https://www.outtakingpictures.com .]	[http://www.civil-learning.blogfa.com]	[http://mahstan.ir]

الگوی پروانه‌ای زیباتر و برای پایلونهای 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 کمانش به علت ارتفاع بلندتر پایه آزاد در برج می‌شود [امیری؛خالقیان؛شیخی،۱۳۹۱]

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 ۱٤ نشان داده شده است.

شکل۱۳. مسیر انتقال نیرو در پل معلق [عربستانی،۱۳۹۵]



شکل۱٤. مسیر انتقال نیرو در پل های متکی بر کابل[عربستانی،۱۳۹۵]

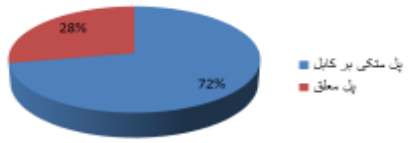
بررسی و ارزیابی پل‌ها

به بررسی حدود ۳۷ نمونه از پل‌های کابلی پرداخته شد و اطلاعات مربوط به هرکدام از پل‌ها جمع‌آوری شد و در جدول زیر دسته‌بندی شد و به تجزیه‌وتحلیل هرکدام از موارد پرداخته شد[۱۲] [مارگولیوس،۱۳۹۲] [امینی،۱۳۸٤] جعفرپوریان،۱۳۸۰] [علیزاده،۱۳۸۳] [امیری؛خالقیان؛ شیخی،۱۳۹۱] [گلابچی،۱۳۸۹] [هاشمی،۱۳۸٦].

ردیف	نام پل	سال ساخت	طول	عرض	موقعیت قرارگیری	نوع پل کابلی	نوع دکل	نوع آرایش کابلی	نوع عرشه
۱	Tatara	۱۹۹۹	۸۹۰	۳۰,٦	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۲	Pont de Normandie	۱۹۹۵	۸۵٦	۲۳,٦	فرانسه	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۳	Second Nanjing	۲۰۰۱	٦۲۸	۳۷,۲	چین	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
٤	Qingzhou Minjiang	۲۰۰۱	٦۰۵	۲۹	چین	پل متکی بر کابل	دکل Aشکل	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۵	Yangpu	۱۹۹۳	٦۰۲	۳۰,۳۵	چین	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	خرپایی
٦	Third wuhan	۲۰۰۲	٦۱۸	–	چین	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	خرپایی
۷	Xupu	۱۹۹۷	۵۹۰	۳۵	چین	پل متکی بر کابل	دکل Aشکل	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۸	Rion-Antirion	۲۰۰٤	۵٦۰	۲۷,۲	یونان	پل متکی بر کابل	آزاد	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۹	Skarnsudet	۱۹۹۱	۵۳۰	–	–	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱۰	Queshi	۱۹۹۹	۵۱۸	۳۰	چین	پل متکی بر کابل	دکل Aشکل	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱۱	Tsurumi Tsubasa	۱۹۹٤	۵۱۰	–	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱۲	Jin’an	۲۰۱٦	۵۰۰	۲۷	چین	پل کابلی معلق	دکل H شکل	قائم	خرپایی
۱۳	Ting kau	۱۹۹۸	٤۷۵	۳۸	چین	پل متکی بر کابل	فرم آزاد	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱٤	Higashi-kobe	۱۹۹۲	٤۸۵	۲۰	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	چنگ	خرپایی
۱۵	Seo-Hae	۲۰۰۰	٤۷۰	۳٤	کره	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱٦	Alex-Fraser	۱۹۸٦	٤٦۵	۳۲	کانادا	پل متکی بر کابل	دکل H شکل	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱۷	Yangpu	۱۹۸۹	٤٦۰	۳۰,۳۵	ژاپن	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۱۸	Clifton & Menai	۱۸٦٤	٤۱۲	۹,٤	انگلستان	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	آئرودینامیک
۱۹	Brooklyn	۱۸۸۳	٤۸٦	۲۵,۹	آمریکا	پل کابلی معلق	فرم آزاد	مورب	خرپایی
۲۰	Humber	۱۹۸۱	۱٤۱۰	۲۸,۵	انگلستان	پل کابلی معلق	قاب ویرند یل	مورب	آئرودینامیک
۲۱	Akashi kaikyo	۱۹۹۸	۱۹۹۱	–	ژاپن	پل کابلی معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۲۲	East Grate Belt	۱۹۹۸	۱٦۲٤	۳۱	دانمارک	پل کابلی معلق	قاب ویرند یل	قائم	آئرودینامیک
۲۳	George Washington	۱۹۳۱	۱۰٦۷	۳٦	آمریکا	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	خرپایی
۲٤	Golden Gate	۱۹۳۷	۱۲۸۰,۲	۲۷,٤	آمریکا	پل کابلی معلق	قاب ویرند یل	قائم	خرپایی
۲۵	Verrazano Narrows	۱۹٦٤	۱۲۹۸	۳۱	نیویورک	پل کابلی معلق	دکل A شکل	قائم	خرپایی
۲٦	Tejo	۱۹٦٦	۱۰۱۲,۸	-	سانفرانسیسکو	پل کابلی معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۲۷	Millennium	۲۰۰۰	۱٤٤	٤	انگلستان	پل کابلی معلق	دکل y شکل	مورب	آئرودینامیک
۲۸	Alamillo Bridge	۱۹۸۹	۲۰۰	۳۲	اسپانیا	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرودینامیک
۲۹	Oresund	۲۰۰۰	٤۹۰	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	آئرودینامیک
۳۱	Millau	۲۰۰۱	۳٤۲	۳۲,۰۵	فرانسه	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرودینامیک
۳۲	Light Rail Train					پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرودینامیک
۳۳	Samuel Beckett	۲۰۰۷	۱۲۰	۲۷	ایرلند	پل متکی بر کابل	آزاد	مورب	آئرودینامیک
۳٤	kohlbrand	۱۹۷٤	۳۲۵	۱۷,۵	آلمان	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	شبه بادبزنی	آئرودینامیک
۳۵	Ohnaruto Bridge	۱۹۸۵	۸۷٦	۲۳	ژاپن	پل معلق	قاب مهاربندی	قائم	خرپایی
۳٦	Macintosh Island	۲۰۰۷	۵۵	٤,۸	استرالیا	پل متکی بر کابل	دکل Yمعکوس	بادبزنی	خرپایی
۳۷	Pasco-Kennewick Bridge	۱۹۲۲	٤۳۲	۲٤,٤	آمریکا	پل متکی بر کابل	قاب مهاربندی	بادبزنی	آئرودینامیک

انوع پل‌های کابلی

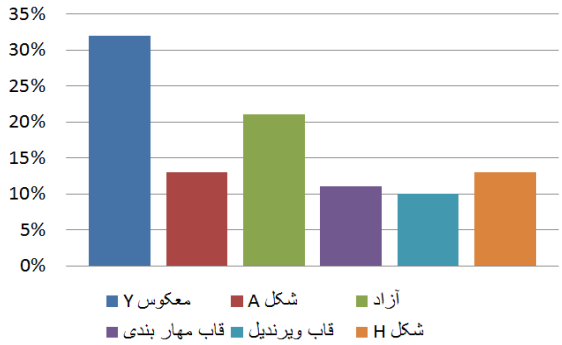
انواع پل‌های کابلی به دودسته پل‌های کابلی معلق و پل‌های متکی بر کابل تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به بررسی نمونه‌های انجام‌شده، بیشترین پل‌های کابلی ساخته‌شده حدود ۷۲ ٪ از نوع پل‌های متکی بر کابل و کمترین پل‌های ساخته‌شده حدود ۲۸٪ از نوع پل‌های کابلی از نوع معلق می‌باشد. پل‌های متکی بر کابل ازآنجاکه از کابل کمتر استفاده می‌شود بیشترین کارایی رادارند.



نمودار٦. انواع پل‌های کابلی

دکل‌های پل‌های کابلی

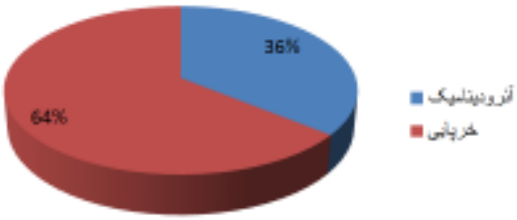
با توجه به نمونه‌های بررسی‌شده، دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی به کار می‌روند از شکل‌های مختلفی استفاده می‌شوند که عبارت‌اند از: aشکل- yمعکوس-قاب مهاربندی شده-قاب ویرند یل-فرم آزاد بیشترین دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی به کار رفتند از نوع y معکوس و کمترین دکل‌هایی که برای ساخت پل‌های کابلی به‌کاررفته‌اند از نوع قاب ویرند یل بوده‌اند.



نمودار۷. انواع دکل‌های پل‌های کابلی

عرشه پل‌های کابلی

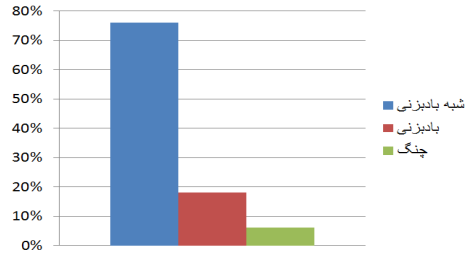
عرشه پل‌های کابلی به دودسته خرپایی و آئرودینامیک تقسیم می‌شوند. بیشترین نوع عرشه به‌کاررفته در پل‌ها چیزی حدود٦٧٪ از نوع آئرودینامیک است که بسیار رایج بوده است و حدود ۳۳٪ از عرشه‌های پل‌های کابلی به روش خرپایی احداث می‌شود.



نمودار۸ عرشه پل‌های کابلی

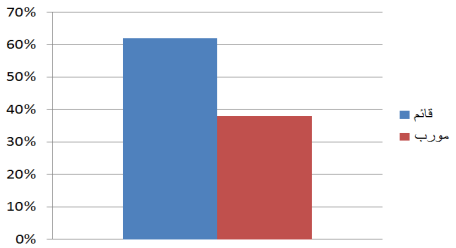
آرایش کابل‌ها

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



نمودار۹. آرایش کابل در پل‌های متکی بر کابل

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.



نمودار۱۰. آرایش کابل در پل‌های معلق

۵-نتیجه‌گیری

پل‌های کابلی به علت ظاهر خوشایند و فرم زیبا، سهولت و سرعت‌بالا در ساخت‌وساز، ظرافت ساختار سیستم سازه‌ای و هزینه اجرای مناسب، به یکی از متداول‌ترین سیستم‌های پل‌سازی در سراسر جهان تبدیل‌شده‌اند. 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.

-بیشترین نوع عرشه به‌کاررفته در پل‌ها چیزی حدود۶۷٪ از نوع آئرودینامیک است که بسیار رایج بوده است و حدود ۳۳٪ از عرشه‌های پل‌های کابلی به روش خرپایی احداث می‌شود.

-بیشترین دکل‌هایی که برای پل‌های کابلی به کار رفتند از نوع y معکوس و کمترین دکل‌هایی که برای ساخت پل‌های کابلی به‌کاررفته‌اند از نوع قاب ویرند یل بوده‌اند.

-حدود ۷۶ ٪ پل‌های ساخته‌شده از نوع شبه بادبزنی و کمترین آن‌ها به‌صورت 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.

۶-مراجع

- 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 عابرپیاده، پایان نامه کارشناسی ارشد"، دانشکده پردیس بین المللی ارس.

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

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

-امینی، ح.، (۱۳۸٤)، "بررسی اثر شل شدگی در رفتار پل معلق به‌صورت موردی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز.

-جباری، 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.، (۱۳۸٦)، "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.، (۱۳۸٦)، "بررسی آویزهای معلق عابر پیاده، پایان نامه کارشناسی ارشد"، دانشگاه آزاد اسلامی شبستر.

-نجفیان، ج.، (۱۳۹٤)، "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.، (۱۳۸٦)، "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.

-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.

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 steps 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