۱۰ /۶/ ۱۳۷۹

مرکز اطلاعات ... کن علمی ایران
تهیه مدارک

دانشگاه علوم و فنون مازندران

دانشکده مهندسی عمران

سمینار کارشناسی ارشد

موضوع: بررسی رفتار پلهای کابلی ایستا

دانشجو:
کامران وحدت

8227

استاد راهنما:
دکتر علی بیگی

تابستان ۱۳۷۷

۳۰۷۱۷

تقدیم به مادر گرامیم

۳۰۷۱۷

سپاسگذاری و قدردانی

با حمد و سپاس به درگاه ایزد منان ،برخود لازم میدارم‌از
استاد راهنمایم جناب دکترعلی‌بیگی و استاد مشاور دکترامیری
که درکلیه مراحل گردآوری این‌تحقیق‌عنایت فراوانی‌نمودندکمال
تشکر و قدردانی را داشته باشم.
همچنین از زحمات خانم میرحبیبی که زحمت تایپ و تصحیح این
مجموعه را تقبل نمودند سپاسگذاری میشود.

کامران وحدت

چکیده

پلهای کابلی ایستا یکی از سازه‌های مدرن و اقتصادی در مهندسی پل می‌باشد. که به دلیل عدم وجود تکنولوژی وساخت وشناخت کافی ازرفتارسازه سابقه کمتری نسبت به پلهای فلزی یابتن مسلح دارد. وجودکابلهای انعطاف پذیردرسازه اصلی آنهاباعث بروزرفتارمتفاوت این سازه باسایرسازه‌هامی‌باشد.

امروزه حرکات سازه‌های کابلی رامیتوان در دومقوله تغییر شکلهای‌استاتیکی ودینامیکی طبقه‌بندی نمود. حرکات استاتیکی در اثر اعمال آرام نیروهایی نظیر بار وزن یا حرارت و نیز اثر تغییرات بلند مدت نیروی باد، ایجاد میگردند. حرکات دینامیکی ،مربوط به نیروهای دینامیکی وابسته به زمان ،نظیر شتابهای لرزه ایی ،اثر تغییرات کوتاه مدت باد،انفجارها و ارتعاش ماشین آلات عبوری از پل میباشند که معمولا دو مورد اول اهمیت بیشتری دارند. بدلیل گستردگی مطلب و مهجور بودن این نوع موضوع کاربردی دراین تحقیق تنهارفتاراستاتیکی پلهای کابلی ایستاوبرخی عوامل موثربرآن موردتوجه قرارگرفته و برای رسیدن به این منظور یک سری تحلیل‌های پارامتریک روی سیستم‌های مختلف آرایش کابلی انجام گرفته شده است که نتایج آن در قالب جداول و گرافهای ضمیمه‌ارائه شده‌است. دراینجانیزتاثیرعوامل مختلف مثل کشش اولیه کابلها،اثرات غیرخطی،اثرات آرایش کابلها،اثر نوع اتصال عرشه - برج ،اثر نوع آنالیز ،اثر تحریک ناهماهنگ ،اثرات میرائی‌و... برروی رفتار سازه مطالعه شده‌است.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

(۱)- فصل اول - مقدمه ۸
- تاریخچه تحقیقات ۹
(۲)- فصل دوم - معرفی پلهای کابلی ایستا
- طبقه بندی پلها ۱۶
-پلهای نمونه ایستا تک محوری ۱۷
- اجزای سیستم پلهای کابلی ایستا ۲۲
- انواع پلهای کابلی ایستا ۳۰
- انواع الگوهای آرایش پلهای کابلی ایستا ۳۲
(۳)- فصل سوم -تحلیل استاتیکی پلهای کابلی ایستا
- مقدمه ۳۵
- بررسی فرآیند آنالیز ۳۵
- بارگذاری ۳۷
- روشهای آنالیز ۴۱
- روش المان محدود ۴۲
- مدلسازی ۴۵
(۵)- فصل چهارم - بررسی پارامتریک پلهای کابلی ایستا
- تأثیرات طولی کابل‌ها ۴۷
- خط تأثیر ممان اینرسی ۵۰
- آنالیز مرتبه اول ۵۰
- اثرات ثانویه ۵۲
- اثرات ممان اینرسی بر نیروهای اولیه ۵۵
- تأثیرات اتصالات بین عرشه و برج ۵۵

- خط تأثیر نیروها ۵۸
- مسایل مطرح در پلهای کابلی ایستا ۶۱

نتیجه گیری ۷۰
پیوست ۱ –جداول پلهای کابلی ایستا ۷۲
پیوست ۲ –آئین نامه پل ایران ۷۵
مراجع فارسی و لاتین ۸۵

فصل اول

مقدمه

تنوع در انتخاب پلهاباعث ایجاد پارامتر انتخاب بهینه میشوددر این میان پلهای کابلی همانند سایر پلها بوده و تفاوت عمده آنها در پوشش دادن دهانه‌های بزرگ میباشد. پلهای کابلی برای دهانه‌های به بزرگی ۱۵۰ تا ۱۵۰۰ متر و بیشتر مناسب میباشند.در نمودار ۱.۱ با توجه به طول دهانه میانی و نسبت طول دهانه میانی به کل دهانه،مناسبت ساخت انواع پلهانشان داده شده است.این سیستم اقتصادی و مدرن ،کاربرد وسیعی در بیشتر کشورها،بخصوص اروپای غربی داشته است.ایده استفاده ازکابلها برای تحمل دهانه‌های پل جدید نیست. تعدادی از این نوع پل مربوط به زمانهای ماقبل میباشد.متاسفانه از آنجاکه علم استاتیک به خوبی تفهیم نشده بود و از مصالح نامناسب مثل میله‌ها و زنجیرها برای مهارهای مایل استفاده میشد،سیستم مزبور موفقیت چندانی نداشت. این مهارها قبل از انکه نقش بابری خود را ایفا نمایند،عرشه پل دچار تغییر شکل زیادی شده و سازه کارایی خود را از دست میداد.بتازگی باورود فولادهای پر مقاومت، عرشه‌های ارتوتروپیک،تکنولژی جوشکاری و پیشرفت در تحلیل استفاده از این سیستم موفق افزایش یافته است.درکل عوامل ذیل در پیشرفت پلهای کابلی مؤثر بوده است:

- گسترش روشهای تحلیل سازه‌های با درجات نامعینی بالا
- توسعه عرشه‌های ارتوتروپیک
- کاربرد فولادهای پر مقاومت و روشهای جدید نصب
- تجربیات پلهای قبلی
- توانائی مدلسازی در آزمایشگاه

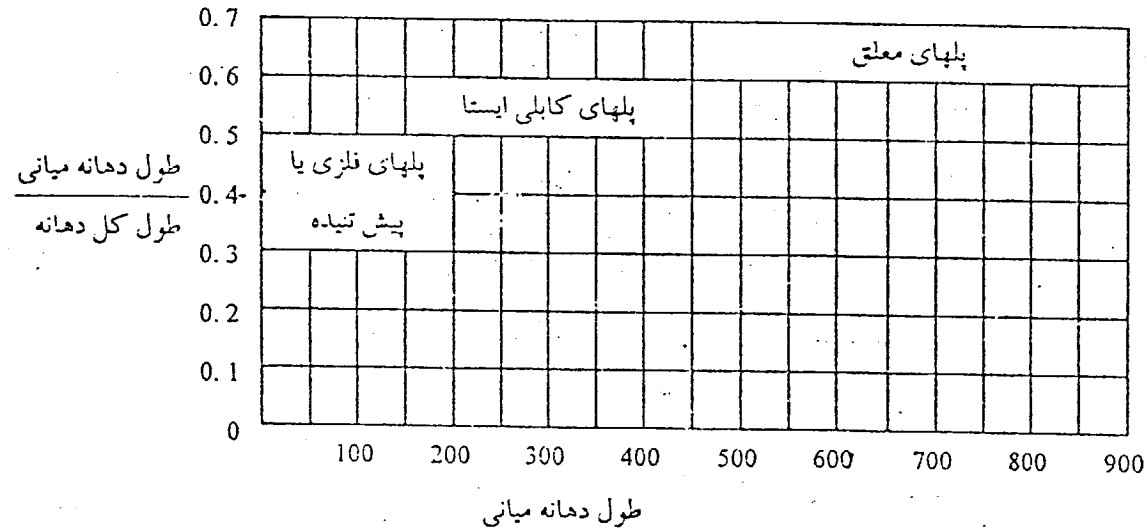
ایده تحمل یک تیر با مهارهای مایل یا زنجیر آویخته از یک برج یا دکل ،از زمانهای قبل شناخته شده بود.در مصر قدیم این ایده در ساخت کشتی‌ها استفاده میشد.در سال ۱۶۱۷آقای فاستوس یک سیستم پل با عرشه چوبی و مهارهای مایل ساخت.در سال ۱۷۸۴ یک معمار آلمانی به نام ایمانول یک پل چوبی با دهانه ۱۰۵ فوت(۳۲متر)را با مهارها و برج چوبی طراحی کرد.در سال ۱۸۱۷ دو مهندس انگلیسی یک پل عابر پیاده به دهانه تقریبی ۱۱۰ فوت (۳۳/۶متر)را بااستفاده ازکابلهای سیمی و اعضای عرشه و برج ساختند.

در سال ۱۸۱۷ سیستم زنجیرهای مایل در انگلیس مورد استفاده قرارگرفت.دهانه این پل ۲۶۰فوت (۷۳۹متر)و پهنای آن ۴فوت(۱/۲متر)بود.بعد از مدتی مشاهده شدکه پل مزبور در برخورد با نیروهای ضربه‌ای به ارتعاشات قابل ملاحظه‌ای میافتد و در سال ۱۸۱۸یعنی ۶ماه پس ۸از اتمام کار ساخت پل ،توسط یک تندباد منهدم شد. در سال ۱۸۲۱ آرشیتکت فرانسوی به نام

پویت،آویختن برج به تیرهای نسبتا سخت و بلند را پیشنهاد کرد. بعدها ایده او توسط ناویر ،مهندس مشهور فرانسوی دنبال شدکه در سال ۱۸۲۳ سیستم پلهای تقویت شده با زنجیرهای مایل را مطالعه نمود. با مقایسه وزن عرشه و زنجیرهای مایل ،ناویر دریافت که برای یک دهانه و ارتفاع برج مشخص ،هزینه هر دو سیستم موازی و شعاعی کابلها یکسان میباشد.

با بررسی تاریخچه فوق به این نتیجه میرسیم که ایده استفاده از کابلهادر پل خیلی قدیمی نیست،لیکن تا قرن بیستم به نحو صحیح مورد استفاده واقع نشد. به طوریکه چند نمونه ساخته شده ان از بین رفتند.باید توجه داشت که پلهای اولیه به دلیل نادیده گرفتن مسائل سازه ای منهدم شدند که از درک نادرست طراح نسبت به رفتار واقعی سازه چنین پلهائی ناشی میشد. به طور مثال عدم کفایت سطح مقطع کابلها یکی از عوامل اساسی ناپایداری این پلها بود که این سازه‌ها را به شدت انعطاف پذیر نموده و در اثر تغییر شکل های بزرگ،کارایی خود را از دست میدادند.

در نیمه قرن نوزدهم روبلینگ ،مهندس مشهور پل در آمریکا ،در سال ۱۸۵۵ اولین پل کابلی موفق راه‌آهن در دنیا را بر روی رودخانه نیاگارا ساخت.مهارهای قطری به صورت شعاعی از بالای برج و بدون اویزهای قائم به عرشه نصب شده‌اند .از جنگ جهانی دوم به بعد به پلهای کابلی توجه بیشتری شد .گسترش نوین این پلهاتوسط دیسچنگر صورت گرفت که نتایج مطالعاتش در سال ۱۹۴۹ منتشرشد.در سال ۱۹۵۲لئون هارت یک‌پل‌کابلی‌ایستابر روی رودخانه راین در آلمان طراحی نمودکه تاسال ۱۹۵۸ساخته شد.درهمین زمان‌یک شرکت‌آلمانی باهمکاری دیسچینگر پل استروم سوند در سوئد را طراحی کردکه در سال ۱۹۵۵تکمیل گردید.این دوپل به عنوان اولین پلهای مدرن کابلی ایستا شناخته شدند .



نمودار۱-۱ مناسبت ساخت انواع پلها باتوجه به دهانه های پل

تاریخچه تحقیقات

پلهای کابلی ایستابه واسطه عملکردخوب واقتصادی بودن دربرخی شرائط خاص محیطی واجرائی ازمدتهاپیش مورد توجه محققین ومهندسین پل قرارداشته است.تفکرساختن پلی که عملکردکششی داشته باشد (عملکردکششی این نوع پل به دلیل وجود کابلهای کششی است) همواره اذهان مهندسین پل رامشغول کرده بود.باوجوداین به دلیل عدم پیشرفت علم درزمینه ساخت پلهای فلزی ارتوتروپیک ونداشتن کابلهای فلزی بامقاومت بالا و مهم ترازهمه عدم پیشرفت علم و شناخت کافی از رفتار این نوع پلها در اثر بارگذاری استاتیکی ودینامیکی در عمل سابقه ساخت پلهای کابلی زیاد نمی‌باشد .طوریکه اولین پل کابلی درسال ۱۹۵۵درسوئد ساخته شد.در حال حاضر بیشتر ازیکصد پل کابلی در سرتاسر دنیا ساخته شده است که تقریبا یکسوم از این مقدار درکشور ژاپن متمرکز شده است. در این بخش به قسمت کوچکی از تحقیقات انجام شده بر روی پلهای کابلی میپردازیم .

در سال ۱۹۷۸فلمینگ تحقیق خود را در زمینه آنالیز استاتیکی غیر خطی پلهای کابلی ایستا ارائه کرد.ایشان در این تحقیق انالیز استاتیکی غیر خطی پلهای کابلی را مورد بحث قرار داد و با تهیه یک برنامه کامپیوتری جهت تحلیل سازه به نتایج دلخواه رسید .ایشان دراین تحقیق حالات غیر خطی اعم از خیزکابلهابه علت وزن خودشان اندرکنش بین بار محوری ولنگر خمشی در اعضای خمشی سازه وتغییر شکلهای بزرک را مورد مطالعه قرار داد .ایشان برای لحاظ نمودن اثرات غیر خطی کابلهااز مدول الاستیسیته معادل برای کابلهای استفاده نمود .درسال ۱۹۸۳ فلمینگ و همکاران در زمینه رفتار غیر خطی پلهای کابلی ایستا تحقیق خود را ارائه کردند .در این تحقیق رفتار غیر خطی پلهای کابلی مورد بحث واقع شد و اثرات آن در محاسبه سختی سازه مورد استفاده قرارگرفت .دراین تحقیق از یک روش گام به گام برای تهیه برنامه کامپیوتری درتحلیل سه بعدی غیر خطی سازه‌های کابلی تحت اثر وزن خودشان و بارزنده اعمالی بر سازه استفاده شد این تحقیق رفتار بسیار غیر خطی این سازه‌ها در مقادیر بارگذاری کم را نشان داد نتایج این تحقیق به شرح زیر میباشد :

۱ - اثرات غیر خطی ناشی از تغییر در هندسه سازه سهم کوچکی از رفتار غیر خطی سازه را به خود اختصاص میدهد و برای بارهای معمولی میتوان از آن صرفنظر کرد .

۲ - اثرات اندرکنش بین بار محوری و لنگر خمشی در اعضای خمشی سازه قابل توجه نیست وبرای سادگی در محاسبات میتوان ازان صر فنظر کرد .

۳ -در اثر بارگذاری‌های کم اثرات غیر خطی ناشی از خیز کابلهای زیاد بوده و با افزایش بار گذاری رفتار خطی پل ظاهر میشود .

در سال ۱۹۷۵ کوماتسو و همکاران در زمینه مشخصات دینامیکی پلهای کابلی ایستا تحقیقات خود را ارائه نمودند .در این تحقیق بر روی مدل پل کابلی توکوساتو نتایج ازمایشگاهی با نتایج عددی مقایسه شد .طول دهانه های این پل به ترتیب ۸۰/۵و۲۱۶ و۸۰/۵ متر میباشد .در این تحقیق تاثیر پارامتر هایی مانند سختی کابل روی مشخصات ارتعاش سازه .همچنین اثرات باردینامیکی متحرک بارسم خط تاثیر ان برای یک جابجایی در یک درجه ازادی از سازه انجام شد و با نتایج استاتیکی (بار متحرک استاتیکی) مقایسه شد .

در سال ۱۹۸۵ بتی وتستا تحقیق خود را در زمینه کنترل میرایی و ارتعاش در پلهای با دهانه های بزرگ ارائه دادند .ایشان در تحقیق مسائل مهم و موثر بر ارتعاش چنین پلهایی را بررسی کردند .ابتدا مسائل مهم در تحلیل لرزه‌ای پلهای طویل آنالیز شد نتایج آنالیز نشان داد که اختلاف فاز ارتعاش بین پایه‌های پل به طور موثر بر پاسخ سازه تاثیر می‌گذارد و باید در آنالیز چنین پلها یی در نظر گرفته شو د .در ادامه ارتعاش پلهادر مورد کنترل بعد از ارتعاش توانایی حرکات تخریبی یا تشخیص خرابیها ی مخفی که ممکن است قبلا اتفا ق افتاده باشد .برای در نظر گرفتن اثرات باد و زلزله چند مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شد و نتایج عددی وتجربی با هم مقایسه شدند .

در سال ۱۹۹۱ فنگ لانگ روش سختی مماسی برای اعضای سه بعدی را در تحلیل سازه‌هامورد بررسی قرارداد و نحوه اعمال ان در تحلیل پلهای کابلی راارائه نمود .این روش قادر به تحلیل غیر خطی مربوط به تغییر شکلهای بزرگ و کوچک و تنشهای اولیه موجود در سازه است.

در سال ۱۹۹۲ استفان در زمینه پاسخ دینامیکی سازه‌های کابل تحت کشش در اثر بارگذاری‌های باد ارائه کرد .

در این تحقیق،گام‌های لازم در تحلیل سازه‌های کابلی در اثر بارهای استاتیکی و پاسخ آنهادر برابر بارهای دینامیکی‌نا شی از باد تو ضیح داده شد .

در سال ۱۹۹۲ آقای چیو در زمینه طراحی اقتصادی وایمن پلهای کابلی ایستا تحقیقاتی را انجام دادند .ایشان در این تحقیق برای رسیدن به چنین طراحی یک روندی را در پیش گرفتند که شامل استفاده از مدل المان محدود(F.E.M)یک ارزیابی المان محدود روش سطح تاثیر و تحلیل یک صفحه الاستیک بود .نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیرمیباشد:

۱- سختی کابلها بر روی لنگر و تغییر شکل عر شه با توان دوم تاثیر میگذارد .

۲-روش المانهای محدود یک روش اقتصادی برای تحلیل پلهای کابلی میباشد .

۳- تنشها در نزدیکی محل اتصال کابلها به عرشه شدیدا به سختی کابل و عرشه بستگی دارد .

۴- تاثیر لحاظ نمودن بارگذاری روی کابلهاقابل توجه میباشد .

در سال ۱۹۹۲ آقای ونگ وهمکاران تحقیق خود را در زمینه ارتعاش پلهای کابلی در اثر ارتعاش عرشه آنها ارئه کرد. هدف از این تحقیق مطالعه برروی پاسخ پلهای کابلی در اثر عبور یک وسیله نقلیه از روی پل و عرشه آن میباشد.وسیله نقلیه فرضی، به بار یک کامیون معادل که دارای ۷ درجه آزادی میباشد، طبق کامیون HS20-44 مدل میشود.در روش تحلیل در این مطالعه ،رفتار غیر خطی هندسی کابلها ،تیر حمال تقویت شده، برجها و پایه‌های پل در اثر بارهای مرده در نظر گرفته شده است.

در سال ۱۹۹۱ دمیراندا مسائل مهم در طراحی پلهای با دهانه‌های بزرگ کابلی رامورد بررسی قرار داد.ایشان در تحقیقات خود از روشهای پیشرفته استفاده نموده و راههای افزایش سختی چنین سازههایی را بررسی کرده است.

در سال ۱۹۹۱ شیراشی اثرات نیروی باد بر روی پلهای کابلی را مورد بررسی قرار داد .در این تحقیق برخی نیروهای آئرواستاتیک و آئرودینامیک وارده بر پلهای کابلی وکابلی وپاسخ آنهادر برابراین بارهامورد توجه قرارگرفت .

در سال ۱۹۹۲ نظمی و همکاران در مورد اثرات ار تعاش ناشی از زلزله در پلهای کابلی تحقیق نمودند .ایشان به منظور شناخت دقیق ازرفتار سازه در اثر زلزله اثرات تغییر امواج زلزله درطول حرکت خود را ملحوظ نمودند .با استفاده از مدل سه بعدی که دارای خصوصیات مطلوبی که از آنهاانتظار میرود بودند استفاده شد .و با تحریکات تکیه گاهی برای مشخص شدن برخی خصوصیات برجسته پاسخ لرزه‌ای این پلهای پیشرفته مورد ارزیابی قرارگرفت .در این تحقیق تنوع جنس اعضا (فولادی و بتن مسلح)نیز در محاسبات منظور شد .برای تحلیل مسئله رکوردهای زلزله مختلف به طور همزمان یا غیر همزمان به این سازه اثر داده شد .در نهایت پاسخ سازه بازای حرکات غیر یکنواخت زمین با حرکات یکنواخت ان مقایسه شد .این مطالعه بر روی چندین پل کابلی موجود درآمریکا وکانادا انجام شد .که نتیجه این تحقیق اهمیت مسئله شتاب غیرمساوی اعمالی برپایه‌های پل مخصوصا در مورد پلهای صلب ترو برای پلهایی که دارای خصوصیات دینامیکی متفاوت با خاک پی دارند روشن شد.بنابراین مساله حرکت غیر یکنواخت زمین واثرات ان در تحلیل دینامیکی باید در طراحی‌ها مد نظر طراحان پل قرارگیرد(۱۷).

در سال ۱۹۹۱ عبدالجعفرو همکاران تحقیقات خودرا در زمینه رفتارلرزه‌ای پلهای کابلی ارائه کردند.در این تحقیق رفتارلرزه‌ای پلهای کابلی در حالت سه بعدی مورد مطالعه واقع شد و حرکات غیر یکنواخت ویکنواخت زمین ودر نتیجه نیروهای غیریکنواخت و یکنواخت اعمالی بر پایه‌های پل در نظر گرفته شد .علاوه برآن اثرات غیرپراکندگی امواج روی پاسخ سازه موردمطالعه قرارگرفت .حالات مختلف غیر خطی در پلهای کابلی نیز مورد توجه بوده است .این

حالات غیر خطی عبارت بودنداز:

۱ -تغییر در هندسه سازه در اثر تغییر فرمهای بزرگ شامل تغییر در هندسه کابلهادر اثر تغییرات کشش آنها(اثرات ناشی از کابلها) .

۲ -اندرکنش بین بار محوری و لنگرخمشی در برجهاو همچنین در تیر حمال تقویت شده

یکروش تکراری با استفاده از روش ماتریس سختی مماسی برای مطالعه پاسخ لرزه‌ای غیر خطی مورد استفاده واقع شد .مثالهای عددی نیز برای مقایسه بین آنالیز پاسخ لرزهای غیر خطی مورد استفاده واقع شد.مثالهای عددی نیزبرای مقایسه بین آنالیز پاسخ خطی در مقابل زلزله (در حالت استفاده از ماتریس سختی مماسی برای پیداکردن تغییر فرمهای ناشی از وزن سازه)وآنالیز پاسخ غیر خطی در مقابل زلزله با استفاده از روش گام به گام انجام شده است .ایشان دو مدل دارای طول دهانه موثر ۱۰۰فوت (۳۳۵/۵متر)و۲۲۰۰فوت (۶۷۱متر)راموردمطالعه قراردادند.که این ابعاد تمام پلهای زمان حال وآینده رادربرمیگیرد(۳).

در سال ۱۹۹۱موریا وهمکاران در زمینه خصوصیات دینامیکی سازه پلهای کابلی ایستاومشخصاپل کابلی تمپیک تحقیقاتی راانجام دادند.به این دلیل که پلهای کابلی در معرض بارهای زلزله باریاد وبارهای متحرک دینامیکی روی پل هستندتحقیق در زمینه پاسخ دینامیکی چنین سازههایی اهمیت پیدامیکند .بدین منظور یک برنامه کامپیوتری تهیه کردندتا بتوانند مشخصات دینامیکی (مقادیر ویژه وبردارهای ویژه)پل کابلی رامحاسبه نمایند.با توجه به نمونه مورد نظر یک رکود زلزله به سازه اعمال شده وبااستفاده ازان مقادیر ویژه وبردارهای ویژه پل محاسبه شده است .خصوصیات میرایی نیز باروشهای مختلف مربوط به محققین گذشته محاسبه شده است که ازنتایج این تحقیق میتوان در طراحی هااستفاده و نقاط ضعف سازه‌های موجودرا بدست آورد.

در سال ۱۹۹۱ ویلسون وهمکاران تحقیق خودرادرزمینه ارتعاشات پلهای کابلی ارائه کردند.در این مقاله برروی یک پل کابلی ایستاباطول دهانه میانی ۲۷۴ متر وطول کلی ۵۴۲ مترآزمایشهای عددی انجام شد.وپاسخ دینامیکی آنهابه دست آمد.دراین تحقیق تمام ۲۵ فرکانس وشکل مودهای وابسته به آنهابه دست آمدکه فرکانسهای به آمده بین صفرتادوبودند.همچنین نسبت میرایی نیزباتقریب محاسبه شد .اکثرمودهای ارتعاشی عرشه بامودهای ارتعاشی برجهابرابربودند.که این دلیل براندرکنش بین برج وعرشه درپلهای کابلی میباشد.نتایج به دست آمده ازاین تحقیق بانتایج آنالیزازطریق المانهای محدودمقایسه شدونتایج حاصله تطابق خوبی داشتند.(۴)

درسال ۱۹۹۱ویلسون وهمکاران درزمینه مدل کردن پل کابلی برای آنالیز دینامیکی تحقیقاتی

انجام دادند.دراین تحقیق جزئیات مربوط به مدل المان محدود برای آنالیزدینامیکی به طور مفصل موردبحث واقع شد.تغییرات لازم برای تغییردر مشخصات سیستم طوری که برای استفاده بعدی نیز راحت‌تر باشد .که شامل ارزیابی جرمهای انتقالی ودورانی سختی عرشه برج و کابلهای تکیه گاههاو دقت لازم در هندسه مدل مورد نظر و پل کابلی واقعی می‌باشد (۳).

در سال ۱۹۹۱ بول الا تحقیق خود را در روش انالیز جدید پلهای کابلی از طریق تکرار ارائه کرد .ایشان در این تحقیق روند تکراری برای آنالیز استاتیکی پلهای کابلی ایستا راشرح داد.این روش برای حالات مختلف ازقبیل‌برج‌های سخت ونرم توانایی همگراشدن رادارد .حالت گیرداری برجهااعم از تکیه گاه گیردار تکیه گاه مفصلی و همچنین پی‌های شمعی صندقی را می‌توان در مطالعات گنجاند .همچنین اندرکنش بین خاک و سازه بااستفاده از این روش قابل ارزیابی است .این روش بعداز چندتکرارهمگرا شده ونیازی به کامپیوترهای مدرن نمیباشد .درادامه تحقیق مطالعه پارامتریک روی پلهای کابلی انجام شده و رفتار این سازه‌های انعطاف‌پذیر مورد برسی قرارگرفته است .

درسال ۱۹۹۰تاکاشی و همکاران در زمینه پایداری دینامیکی کابلهای تحت اثر نیروی دورهای مطالعاتی راانجام دادند.پایداری دینامیکی کابلهای دارای خیز ناشی ازوزن خود سازه ودارای نیروی محوری دوره‌ای در این تحقیق مورد بحث واقع شده است .معادلات حرکت کابل از روش گالرکین حل شده است .ناپایداری این کابلها بازای نسبتهای مختلف خیز به طول دهانه کابل مورد بحث قرارگرفته است این ناپایداری از رفتارغیر خطی آن پدید میاید.

در سال ۱۹۹۱ گروشی و همکاران تحقیقاتی را در زمینه تشدید پلهای کابلی ایستا روی مدلهای با مقیاس کوچک انجام دادند .ایشان یک مدل مقیاس کوچک در ازمایشگاه ساختند وبااستفاده از اعمال امواج مختلف روی پل مشخصات دینامیکی و میرایی پل محاسبه شد .نهایتانتایج حاصل از آزمایش با نتایج عددی مقایسه شد و جوابها در حد خوبی قابل قبول بودند .

در سال ۱۹۹۱ رائو و همکاران تحقیق خودرا در زمینه پاسخ دینامیکی پلهای بادهانه‌های بزرگ ارائه کردند .در این تحقیق پاسخ دینامیکی یک کابل یک دهانه دراثر بارگذاری‌های لرزه‌ای ان مورد مطالعه قرارگرفت و زمان اتلاف شده برای رسیدن موج به پایه دیگر در این مطالعه ملحوظ شد .هر دو مطالعه حرکت قائم و افقی بطور همزمان در تحلیل گنجانده شد .نتایج بیانگر اهمیت موضوع تحریک تکیه گاه و زمان شروع ان در پایه‌ها می‌باشد .

در سال ۱۹۸۹ عبدالجعفر در زمینه طرح لرزهای پلهای کابلی تحقیقاتی راارائه کردند .در این تحقیق مشخصات پاسخ پلهای کابلی در برابر زلزله ارزیابی شد .دومدل دو بعدی وسه بعدی در نظر گرفته شد .حالات مختلف تکیه گاه‌ها و تحریکات یکنواخت تکیه گاه در نظر گرفته شد

.همچنین پارامترهایی از قبیل عملکرد غیر خطی سازه حرکات زمین اتصالات سازه وشیوه‌های جذب انرژی وتکیه گاه‌های خاص در تحقیق مورد توجه قرارگرفتند(۵).

در سال ۱۹۸۸ابول الا تحقیق خود را در زمینه آنالیزپلهای کابلی دارای برجهای انعطاف پذیرارائه کرد .یک روش تحلیل تکراری برای انالیز استاتیکی پلهای کابلی ایستا ارائه شده است .برجها می‌توانند خیلی انعطاف‌پذیر باشند و اندرکنش آن با تکیه گاه نیز مورد توجه واقع شد.(تکیه گاه شمعی یا صندوقی).سیستم به دو سیستم مجزا به نام زیر سازه ((SUBSTRUCTURE) تقسیم می‌شود .تیر حمال تقویت شده به وسیله روش سه لنگری حل شدندوتغییر مکانهای ان نیز از سر ی فوریه به دست می‌اید در این روش تعداد تکرارهای محاسبات کم میباشد (۶).

در سال ۱۹۹۰سیف وهمکاران تحقیق خود را در زمینه آنالیز غیر خطی و بار بحرانی پلهای کابلی پیش تنیده ارائه کردند.ایشان با استفاده از از یک نمونه پل کابلی ایستای پیش تنیده حالات غیر خطی هندسی و غیر خطی ماده ایی را مورد مطالعه قرار دادند.غیر خطی هندسی طبق این تعریف شامل خیزکابلها، تغییر فرمهای بزرگ سیستم و تغییر تار خنثی در مقطع تیر حمال تقویت شده بنا بر نوع مصالح یا ایجاد ترک در بتن میباشد.همچنین تاثیر نیروی محوری در این محاسبات گنجانده شده است.مطالعات پرامتریک انجام شده روی انواع مختلف آرایش کابلها اعم از بادبزنی ،ستاره‌ای،شعاعی و موازی انجام شد.برای مشخص شدن انواع حالات غیر خطی در نیروهای داخلی و عکس العملها، سه آنالیز در حالات الاستیک ،غیر خطی هندسی و غیر خطی هندسی و ماده‌ای انجام شد و نتایج با هم مقایسه شدند.

در سال ۱۹۹۰ نظمی و همکاران در زمینه آنالیز سه بعدی غیر خطی پلهای کابلی در حالات استاتیکی، تحقیقاتی را ارائه نمودند.در این تحقیق روش انالیز استاتیکی غیر خطی پلهای کابلی ایستا تحت اثر وزن خودشان و نیروی کشش اولیه لازم درکابلها، به طور مرتب بیان شد.تمام موارد غیر خطی اعم از خیزکابلها،اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی در برجها و عرشه پل و تغییر در هندسه سازه به علت تغییر مکانهای بزرگ انجام شد.با استفاده از نتایج تحلیل کامپیوتری به این واقعیت پی بردند که سازه در اثر بارهای کم، مخصوصا در دهانه‌های بزرگ به شدت رفتار غیر خطی از خود بروز میدهد.

در سال ۱۹۹۰نظمی و همکاران در زمینه انالیز پاسخ غیر خطی پلهای کابلی تحت اثر بارهای زلزله برای‌دهانه‌های طویل ارائه نودند .در این تحقیق رفتار غیر خطی دینامیکی پلهای کابلی ایستا سه بعدی در اثر بارگذاری لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت .حالات مختلف پی‌ها اعم از تحریکات لرزهای یکنواخت و سازه‌های نرم مورد توجه واقع شد .حالات مختلف غیر خطی

برای چنین پلهایی در آنالیز گنجانده شد .در این تحلیل برای فهم درست از رفتار غیر خطی دینامیکی پل از روش تکراری و ماتریس مماسی در محاسبات استفاده شده است .بااستفاده از مثالهای مختلف در این تحقیق بین پاسخ خطی در اثر زلزله و پاسخ غیر خطی مقایسه‌ای صورت گرفت .

در سال ۱۹۸۹ یوندا و همکاران راجع به روشهای عملی برای میراکردن سازه‌ها و میرایی کابلها تحقیقاتی را ارائه کردند .در این تحقیق مسائل مربوط به میراکننده‌های ارتعاش کابل برسی شد .که با این کار میرایی سازه را می‌توان بالابرد .مقادیر ویژه در این پلهابا روشهای پیچیده محاسبه می‌شود.

در سال ۱۹۸۱کیتازاوا وهمکاران تحقیق خودرا در زمینه ازمایشهای لرزه‌ای روی پل کابلی هیگاشی کوب بااستفاده از مدل ساخته شده ارائه کردند .این پل سه دهانه با دو عرشه روی هم می‌باشد طول کل آن ۸۵۵ متر وطول دهانه میانی ان ۴۸۵متر می‌باشد.اینپل نهتنها یک پل طویل می‌باشد بلکه در آن از پی‌های ایزوله برای کاهش پاسخ سازه در برابرزلزله استفاده شده است .همچنین از میراکننده‌هایی برای کنترل تغییرمکانهای پل در ناحیه بین پایه‌ها و تیرحمال استفاده شده است .به منظور مشخص کردن ایمنی این پل که خصوصیات آن در فوق گفته شد محققین آزمایشها ی لرزه‌ای را بر روی یک مدل بامقیاس ۱/۱۰۰ انجام داده‌اند.این آزمایشات تحت اثر امواج زلزله یک‌بعدی و سه بعدی انجام شده است. همانگونه که نتایج نشان دادهان در نظرگرفتن ارتعاش کابلها در پاسخ دینامیکی پلها مهم است.

در سال ۱۹۹۰ چرنگ و همکاران در زمینه نوارهای محدود (FINITE STRIP) وگسترش آن در تحلیل غیر خطی پلهای کابلی ایستا تحقیقاتی راارائه کردند .در این زمینه روش F.S. برای پلهای طویل مفید میباشد.حالات غیر خطی در اثر خیز و کج شدگی کابلهادر تحلیل لحاظ شدند.برای حل معادلات از روش زیرسازه و نیوتن - رافسون اصلاح شده استفاده شد. همچنین چند مثال نیز برای نشان دادن اهمیت و دقت روش مورد استفاده قرار گرفت.(۹)

در سال ۱۹۸۹ چرونگ در زمینه آنالیز تیر حمال تقویت شده با مقطع جعبه‌ای به روش FINITE STRIP تحقیقاتی راانجام داد. دراین تحقیق توابع مشخص یک تیر یکسره با روش عددی به دست آمد. مثالهای عددی در این تحقیق بیانگر پیشرفته بودن این روش میباشد که باعث سادگی، دقت و راحتی استفاده از آن میباشد.(۱۲)