بسم الله الرحمن الرحیم

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات و راهنمایی های اساتید ارجمند جناب آقای دکتر هوشیار ایمانی و جناب آقای دکتر علیرضا میرزا گل تبار که در تمام مراحل هدایت و تدوین این پایان نامه با شکیبایی یاری رسان اینجانب بوده اند، سپاسگزاری می کنم.

همچنین از جناب آقای دکتر عیسی شوش پاشا که زحمت مشاور بنده را در این پایان نامه بر عهده داشته اند نیز کمال تشکر را دارم.

بر خود لازم می دانم تا از دوست گرامی خود آقای مهندس مسعود حیدری بخاطر راهنمایی‌های ایشان مراتب تشکر و قدردانی را داشته باشم.

در پایان مرهون محبت های بی دریغ پدر و مادر مهربانم، خواهر و برادران عزیزم، همسرم و خانواده محترم ایشان هستم و از تمامی اساتید بزرگوار و همکلاسی ها و هم خوابگاهی های خوبم که در مدت تحصیل یاری رسان اینجانب بوده‌اند، تشکر می کنم.

نام خانوادگی: قاسم نژاد بائی **نام:** سعید

عنوان: تحلیل استاتیکی غیر خطی سه بعدی پل های کابلی با روش پاره سازی

اساتید راهنما: دکترهوشیارایمانی کله سر، دکترعلیرضا میرزا گل تبار روشن

مشاور: دکتر عیسی شوش پاشا

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** عمران **گرایش:** سازه

دانشگاه: محقق اردبیلی **دانشکده:** فنی- مهندسی **تاریخ دفاع:** ۸۹/۹/۳

کلید واژه‌ها:

پل‌های کابلی، نیروی پیش تنیدگی، تحلیل استاتیکی غیرخطی سه بعدی، سازگاری تغییر مکان‌ها، بخش خطی و غیرخطی سازه، روش پاره سازی

چکیده:

پل‌های کابلی سازه‌های عظیم و پیچیده‌ای هستند که امروزه کاربرد زیادی در دنیا پیدا کرده اند. این سازه ها بطور کلی از نظر ایستایی دارای درجات نامعینی زیادی هستند. عملکرد سازه ای این قبیل سازه ها منوط به نحوه توزیع نیرو بین قسمت های خطی سازه (برج، پایه، عرشه) و قسمت غیر خطی آن (کابل ها) می باشد. عاملی که این سازه را از سازه های دیگر متمایز می سازد وجود کابل های با مقاومت کششی بالا می باشد و همین امر خود عاملی می شود تا بتوان کابل ها را تحت نیروهای پیش کشیدگی زیاد قرار داد و به این طریق عملکرد سازه ای پل را بهبود بخشید. تعیین نیروهای پیش کشیدگی کابل بدلیل نامعینی زیاد این گونه سازه ها پیچیده می باشد. تعیین نیروهای بهینه پیش تنیدگی کابل ها برای عملکرد سازه ای بهینه پل یکی از موضوعات اساسی در طراحی پل های کابلی است. در این پایان نامه ابتدا به تحقیقات انجام شده توسط محققان دیگر اشاره شده و در ادامه ویژگی های اجزای سازه ای پل های کابلی ذکر گردیده است. سپس برنامه ای جهت تحلیل استاتیکی غیر خطی سه بعدی پل‌های کابلی با استفاده از نرم افزار *MATLAB* نوشته شده است و با مساوی قرار دادن تغییر مکان نقاط فصل مشترک قسمت خطی و غیر خطی سازه و اعمال شرایط سازگاری تغییر مکان ها در این نقاط، نیروهای کششی مجهول کابل محاسبه می شود. به این ترتیب علاوه بر اینکه حجم محاسبات کاهش می یابد، می توان سازه را برای نیروهای ثابت پیش کشیدگی تحلیل نمود. در بررسی بارهای وارد بر سازه پل نیز بارهای مرده و زنده کامیون استاندارد ایران و بار باد مطابق نشریه ۱۳۹ وزارت راه و ترابری ایران در نظر گرفته شده است. همچنین در انتها، با ارائه سه مورد کاربردی کارآیی روش مورد استفاده بررسی شده و نتایج حاصل از کاربرد روش ارائه شده در مورد روابط بین شکم دادگی کابل و کشش ماکزیمم در کابل در محل برج و تغییرات طول آن با تغییر قطر کابل برای نسبت های متفاوتی از ارتفاع برج به طول عرشه به همراه پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده است.

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات

۱- ۱ مقدمه ۲
۱- ۲ ضرورت تحقیق ۲
۱- ۳ هدف تحقیق ۳
۱- ۴ فرضیات تحقیق ۴
۱- ۵ خلاصه فصول پایان نامه ۴

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته و تئوری کابل ها

۲- ۱ بخش اول؛ مروری بر تحقیقات انجام گرفته ۷
۲- ۱- ۱ مدلسازی کابل ها ۷
۲- ۱- ۲ تحقیقات و بررسی های انجام گرفته ۷
۲- ۱- ۳ روش مورد استفاده در این پایان نامه ۱۱
۲- ۲ بخش دوم؛ تئوری کابل‌ها ۱۲
۲ - ۲- ۱ مقدمه ۱۲
۲- ۲- ۲ کابل ها ۱۵
۲- ۲- ۳ کابل های سبک وزن حامل بارهای متمرکز ۱۸
۲- ۲- ۴ کابل های سنگین ۱۹
۲- ۲- ۴- ۱ تعیین معادلات تغییر شکل ۱۹
۲- ۲- ۴- ۲ کابل تحت وزن واحد طول واقعی خود ۲۱
۲- ۲- ۴- ۳ مطالعه موردی ۲۳
۲- ۲- ۴- ۴ کابل تحت یک بار گسترده بر راستای افق ۲۵
۲- ۲- ۵ مشخصات سازه ای کابل ها ۲۹
۲- ۲- ۶ برپایی کابل ها ۳۴
۲- ۲- ۷ انواع کابل ۳۸
۲- ۲- ۷- ۱ رشته های مارپیچ ۳۸
۲- ۲- ۷- ۲ طناب ها ۳۹
۲- ۲- ۷- ۳ رشته های مارپیچی بسته شده ۴۰
۲- ۲- ۷- ۴ رشته مفتول های موازی ۴۱
۲- ۲- ۷- ۵ کابل های خوابانده طویل ۴۳
۲- ۲- ۷- ۶ کابل های با مفتول های موازی ۴۳

۲- ۲- ۸ محافظت در برابر خوردگی ۴۴
۲- ۲- ۹ ویژگی های کابل ۴۹
۲- ۲- ۱۰ عرشه ۵۵
۲- ۲- ۱۱ برج ۵۶
۲- ۲- ۱۲ نسبت های بهینه در طراحی پل های کابلی ۵۸
۲- ۲- ۱۳ محدودیت تغییر مکان در عرشه ۶۰
۲- ۲- ۱۴ محدودیت پیش کشیدگی در کابل ها ۶۰
۲- ۲- ۱۵ محدودیت میزان لاغری المان های پایه و برج ۶۰
۲- ۲- ۱۶ ساخت یک پل کابلی ۶۰
۲ - ۲- ۱۷ رفتار غیر خطی در پل های کابلی ۶۱

فصل سوم: مدلسازی و روش تحلیل

۳- ۱ فرمولاسیون کابل ۶۴
۳- ۲ تحلیل استاتیکی سه بعدی غیر خطی پل های کابلی ۷۰
۳- ۲- ۱ تحلیل پل تحت بار مرده و نیروهای پیش کشیدگی ۷۰
۳- ۲- ۱- ۱ تحلیل الاستیک خطی سازه عرشه و برج تحت بارهای مرده ۷۱
۳- ۲- ۱- ۲ ماتریس نرمی گره های فصل مشترک بین کابل با سازه عرشه و برج ۷۲
۳- ۲- ۱- ۳ رابطه بین نیرو و جابجایی برای کابل ها (بخش غیر خطی سازه) ۸۰
۳- ۲- ۱- ۴ ارضای شرایط همسازی ۸۳
۳- ۲- ۲ تحلیل پل تحت بار مرده و زنده و نیروهای پیش کشیدگی ۸۴
۳- ۲- ۲- ۱ تحلیل الاستیک خطی سازه عرشه و برج تحت بارهای زنده خارجی و مرده ۸۴
۳- ۲- ۲- ۲ ماتریس نرمی گره های فصل مشترک بین کابل با سازه عرشه و برج ۸۵
۳- ۲- ۲- ۳ رابطه بین نیرو و جابجایی برای کابل ها (بخش غیر خطی سازه) ۸۵
۳- ۳- ۲- ۴ ارضای شرایط همسازی ۸۷
۳- ۳ فلوچارت برنامه نوشته شده با نرم افزار *MATLAB* ۸۷

فصل چهارم: مطالعات موردی

۴- ۱ مطالعات موردی ۹۰
۴- ۱- ۱ مورد اول ۹۰
۴- ۱- ۱- ۱ مرحله اول: تحلیل سازه تحت بار مرده و نیروی پیش تنیدگی ۹۲
۴- ۱- ۱- ۲ مرحله دوم: تحلیل سازه تحت بار مرده و زنده و ترافیک و نیروی پیش تنیدگی ۹۴
۴- ۱- ۲ مورد دوم ۱۰۱
۴- ۱- ۲- ۱ مرحله اول: تحلیل سازه تحت بار مرده و نیروی پیش تنیدگی ۱۰۳
۴- ۱- ۲- ۲ مرحله دوم: تحلیل سازه تحت بار مرده و زنده و ترافیک و نیروی پیش تنیدگی ۱۰۵

۴- ۱- ۳ مورد سوم..... ۱۱۲
۴- ۱- ۳- ۱ مرحله اول: تحلیل سازه تحت بار مرده و نیروی پیش تنیدگی..... ۱۱۴
۴-۱-۳-۲ مرحله دوم: تحلیل سازه تحت بار مرده و زنده و ترافیک و نیروی پیش تنیدگی..... ۱۱۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج..... ۱۱۳
پیشنهادات..... ۱۱۴
مراجع و منابع..... ۱۱۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل(۲- ۱). پل استروم سوند در سوئد، نخستین پل کابلی مدرن ۱۳
شکل(۲- ۲). انواع چیدمان صفحه ای کابل ۱۶
شکل(۲- ۳). اثر تغییر بارگذاری روی هندسه کابل ۱۸
شکل(۲- ۴). کابل در معرض یک بار گسترده ۱۹
شکل(۲- ۵). المانی از طول کابل در معرض بار وزن خود ۲۱
شکل (۲- ۶). تغییر شکل یک کابل با تکیه گاه های متقارن ۲۳
شکل (۲- ۷). کابل در معرض یک بار گسترده بر راستای افق ۲۵
شکل (۲- ۸). انتقال مفتول ها از چرخ قرقره ای به خار مخزنی و الگوی نعلی در لنگرگاه ۳۵
شکل (۲- ۹). رشته مفتول های موازی ۳۵
شکل (۲- ۱۰). مفتول پیچ های هفت مفتولی ۳۸
شکل (۲- ۱۱). مفتول پیچ های بزرگ ۳۸
شکل (۲- ۱۲). طناب های چند رشته ای ۳۹
شکل (۲- ۱۳). مفتول پیچ های مارپیچی بسته شده ۴۱
شکل (۲- ۱۴). انواع مختلف چیدمان مفتول ها در مقطع کابل ۴۴
شکل (۲-۱۵). کرنش معادل برای کابل خورده شده (زنگ زده) ۴۸
شکل (۲- ۱۶). تنش ها و شکم دادگی در کابل مورب ۵۱
شکل (۲- ۱۷). تغییرات شکم دادگی و طول در اثر تغییر تنش ۵۲
شکل (۲- ۱۸). اشکل مختلف برجهای مورد استفاده در پل های کابلی ۵۷
شکل (۳- ۱). تعادل نیروها در کابل ۶۴
شکل (۳- ۲). درجات آزادی نقاط فصل مشترک کابل با عرشه و برج ۷۲
شکل (۳- ۳). درجات آزادی نقاط فصل مشترک کابل با عرشه و برج ۷۳
شکل (۳- ۴). روش بدست آوردن ماتریس نرمی گره های فصل مشترک ۷۶
شکل (۳- ۲)(تکراری). درجات آزادی نقاط فصل مشترک کابل با عرشه و برج ۸۴
شکل (۳- ۵). فلوچارت برنامه نوشته شده با *MATLAB* ۸۸
شکل(۴- ۱). شکل پل کابلی مورد اول ۹۰
شکل(۴- ۲). مشخصات مقاطع اجزای پل ۹۰
شکل (۴- ۳). کامیون استاندارد ایران ۹۶
شکل (۴- ۴). جزئیات مورد نیاز برای محاسبات بار باد ۹۶
شکل (۴- ۵). شکل پل کابلی مورد دوم ۱۰۱
شکل (۴- ۶). مشخصات مقاطع اجزای پل ۱۰۲
شکل (۴- ۷). جزئیات مورد نیاز برای محاسبات بار باد ۱۰۷
شکل(۴- ۸). شکل پل کابلی مورد سوم ۱۱۲

شکل (۴- ۹). مشخصات مقاطع اجزای پل ۱۱۳
شکل (۴- ۱۰). جزئیات مورد نیاز برای محاسبات بار باد ۱۱۹
شکل (۴- ۱۱). مدل سه بعدی پل کابلی مورد سوم ۱۲۴
شکل (۴- ۱۲). دیاگرام نیروی محوری و دیاگرام لنگر پیچشی ۱۲۴
شکل (۴- ۱۳). دیاگرام لنگر خمشی حول محور محلی ۲ و ۳ ..... ۱۲۵
شکل (۴- ۱۴). دیاگرام نیروی برشی در راستای محور محلی ۲ و ۳ ..... ۱۲۵
شکل (۴- ۱۵). معرفی پارامترهای به کار رفته در نمودارها ۱۲۶
شکل (۴- ۱۶). نمودار شکم دادگی کابل بر حسب قطر آن ۱۲۷
شکل (۴- ۱۷). نمودار کش ماکزیمم در کابل بر حسب قطر آن ۱۲۸
شکل (۴- ۱۸). نمودار تغییر طول کابل بر حسب قطر آن ۱۲۸

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲- ۱). روش های مدلسازی کابل ۷
جدول (۲- ۲). انواع چیدمان ظاهری کابل به همراه مشخصات آن ۱۴
جدول (۲- ۳). مقایسه بین تنش کششی نهایی و مجاز انواع مختلف چیدمان مقطعی کابل ها ۳۰
جدول (۲- ۴). مدول الاستیسیته مینیمم طناب ها و رشته های سازه ای پیش کشیده ۳۳
جدول (۲- ۵). انواع مختلف عرشه ۵۶
جدول (۲- ۶). انواع مختلف برج های مورد استفاده در پل های کابلی ۵۶
جدول (۲- ۷). انواع تکیه گاه های برج ۵۸
جدول (۴- ۱). نتایج مقایسه ای برای نسبت $h/b=1.3$ (واحد ها m و kg) ۱۲۶
جدول (۴- ۲). نتایج مقایسه ای برای نسبت $h/b=1$ (واحد ها m و kg) ۱۲۷
جدول (۴- ۳). نتایج مقایسه ای برای نسبت $h/b=0.3$ (واحد ها m و kg) ۱۲۷
جدول (۴- ۴). مقایسه نتایج حاصل از روش ارائه شده در این پایان نامه با نرم افزار $Sap2000$ ۱۲۹

فهرست علائم اختصاری:

T: کشش در کابل

H: مولفه افقی نیروی کشش کابل در راستای محور x

V: مولفه قائم نیروی کشش کابل در راستای y

U: مولفه افقی نیروی کشش کابل در راستای z

ω: وزن واحد طول افقی کابل

L_0: طول کابل پس از کشیده شدن در مرحله اول

b: فاصله افقی بین لنگرگاههای کابل در عرشه و برج یا طول افقی کابل

h: فاصله قائم بین لنگرگاههای کابل در عرشه و برج یا طول قائم کابل

c: طول مورب کابل

f : شکم دادگی قائم کابل در وسط طول آن

F_u: مقاومت کششی مجاز کابل

F_{pu}: مقاومت کششی اسمی کابل

E: مدول الاستیسیته کابل

E_{eq}: مدول الاستیسیته معادل کاهش یافته کابل یا مدول ارنست

σ_u: تنش حد بالای کابل

σ_0: تنش حد پایین کابل

μ: نسبت تنش حد بالا به تنش حد پایین کابل

σ_m: میانگین تنش حد بالا و حد پایین کابل

E_s: مدول سکانتی یا مدول متقاطع

E_t: مدول تانژانتی یا مدول مماسی

$\hat{\Delta}$: بردار جابجایی گره های فصل مشترک کابل و سازه

$\tilde{\Delta}$: بردار جابجایی گره های فصل مشترک کابل و سازه فقط تحت اثر بار مرده

D: ماتریس نرمی سازه

δ_{ij}: درایه های ماتریس نرمی سازه

D': ماتریس نرمی اصلاحی با درایه های کاهش یافته

F: ماتریس بار

G_s: مدول برشی فولاد

δ: ضریب ضربه یا ضریب دینامیکی بار کامیون استاندارد ایران

فصل اول

کلیات

۱- ۱ مقدمه

پل های کابلی امروزه سازه های مدرنی هستند که ساخت آنها در دنیا گسترش زیادی پیدا کرده است. از شرق گرفته تا غرب کشورهای زیادی همچون ژاپن، آمریکا، فرانسه، سوئد، چین، نیوزلند به ساخت و استفاده از اینگونه سازه های پیشرفته مبادرت ورزیده اند. اجرای دهانه های بلندی از اینگونه پل ها به همراه طول عمر بیشتر و صرفه اقتصادی آنها و نیز پیشرفت روزافزون برنامه های کامپیوتری جهت تحلیل و طراحی این قبیل سازه ها، مهم ترین عامل مقبولیت این سازه ها در بین مهندسان پل می باشد. بطور کلی عوامل توسعه پل های کابلی را می توان مربوط به موارد زیر دانست:

۱- گسترش روش های تحلیل سازه های با درجات نامعینی زیاد و کاربرد کامپیوترهای مدرن

۲- توسعه و پیشرفت عرشه های ارتوتروپیک

۳- کاربرد فولاد با مقاومت بالا و روش های جدید نصب

۴- تجربیات پل های ساخته شده قبلی

۵- توانایی آنالیز با مطالعه بر روی مدل های آزمایشگاهی

۱- ۲ ضرورت تحقیق

پل های کابلی از جمله سازه‌های پیشرفته و با تکنولوژی طرح و ساخت بالا می باشند. زیبایی منحصربفرد این سازه ها به همراه عرشه نازکتر آن در مقایسه با سازه‌های مشابه آنرا از سایر سازه‌ها متمایز کرده است. این سازه‌ها بر خلاف انواع دیگر پل ها می توانند با دهانه های بسیار بلندی تا ۱۰۰۰ متر و بلندتر هم طراحی و اجرا شوند. به همین سبب با ساخت این سازه‌ها تخریب کمتری روی طبیعت و اکوسیستم صورت می گیرد. با توجه به پیشرفت سریع و روز افزون ابرسازه ها و ایجاد روش های نوین هم در طراحی و هم در ساخت و نیز پیشرفت برنامه های کامپیوتری در زمینه طراحی و محاسبات ابر سازه-

ها، لازم است در این زمینه مطالعه و بررسی بیشتری صورت گیرد. هرچند مطالعه و بررسی دقیق و کامل این نوع از سازه ها نیاز به هزینه و زمان و نیز آزمایشگاه های مجهز دارد. با این وجود، در این رساله مطالعات تحلیلی با استفاده از نرم افزار مناسب انجام می گیرد.

از جمله عواملی که منجر به توسعه ساخت این گونه سازه ها در کشورهای متعددی از جمله آمریکا، ژاپن، چین، نیوزلند و فرانسه شده است، قابل بازیافت بودن فولادهای مصرفی در این سازه ها پس از پایان عمر بهره برداری آنها می باشد. این نوع از پل ها به دلیل سبکی نسبی خود، در برابر زلزله مناسب بوده اما در برابر باد شدید ضعیف هستند.

از دیگر عواملی که ضرورت تحقیق روی این گونه از سازه ها را ایجاب می کند، وجود مناطق کوهستانی و صعب العبور و وجود رودهای بیشمار با دهانه عریض و نیز دریاچه های مرزی و داخلی در هر کشور می باشد که می تواند هم در تسریع دسترسی ها و هم در زیبایی معماری شهری، به لحاظ ویژگی خاص خود که همان دهانه بلند این سازه ها است، طرحی بسیار سودمند و اقتصادی باشد. طول عمر بالای این سازه ها بعلت فولادهای مصرفی با مقاومت بسیار بالا، علت دیگر تمایل به این نوع پل ها بوده است. همچنین این نوع پل ها در مقایسه با پل های معلق به کابل کمتری نیاز دارند و احداث آنها نیز سریعتر انجام می- شود.

با توجه به پیشرفت روز افزون برنامه های کامپیوتری و اهمیت زمان در مرحله مدلسازی و نیز اجرای برنامه ها، همچنین با پیدایش و ظهور ابرسازه ها که دارای درجه نامعینی بالایی هستند، نیاز به ارائه روش هایی است که زمان کمتری را برای مدلسازی و اجرا صرف کند.

۱- ۳ هدف تحقیق

اهداف مورد نظر در این پایان نامه عبارتند از:

۱- شناخت رفتار سازه های کابلی

۲- ارائه روشی جدید جهت تحلیل استاتیکی غیر خطی سریعتر و کارآتر پل های کابلی در حالت سه- بعدی

۱- ۴ فرضیات تحقیق

این تحقیق بر مبنای فرضیات زیر انجام شده است:

۱- ترکیبات بارگذاری شامل آثار انواع بارگذاری ها (باد، بارهای مرده و زنده، بار ترافیک، بار پیاده رو) بدون ضرایب افزایش بار می باشد.

۲- در تحلیل سازه اثرات غیر خطی ناشی از اندرکنش کابل و برج و عرشه و نیز آثار $P-\Delta$ در سازه در نظر گرفته شده است.

۳- تحلیل سازه در حالت سه بعدی انجام شده است.

۴- سازه عرشه پل فلزی، سازه برج و پایه بتنی و جنس کابل ها هم فلزی با مقاومت کششی بالا می باشد.

۵- بدلیل اثر بیشتر بار باد نسبت به بار زلزله، فقط اثر بار باد بر سازه در نظر گرفته شده است.

۱- ۵ خلاصه فصول پایان نامه

در فصل اول این پایان نامه ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق و فرضیات تحقیق بیان شده است. فصل دوم این پایان نامه به دو بخش تقسیم شده است: در بخش اول، تاریخچه تحقیقات انجام گرفته مطرح شده است. این بخش نیز خود به سه زیر بخش تقسیم شده است.

در زیر بخش اول تاریخچه تحقیقات انجام گرفته در مورد مدلسازی کابل ها مطرح شده است، در زیربخش دوم تاریخچه تحقیقات انجام گرفته در مورد آنالیز کابل مطرح شده است، و در زیربخش سوم به صورت خلاصه به روش تحلیل به کارگرفته شده در این پایان نامه اشاره شده است.

در بخش دوم از فصل دوم به تئوری کابل ها و موضوعات مورد توجه در مورد کابل‌ها اشاره شده است. در فصل سوم روش تحلیل بکار گرفته شده در این پایان نامه به صورت مشروح آورده شده است. در این فصل یک روش جدید برای تحلیل پل‌های کابلی ارائه شده است.

در فصل چهارم این پایان نامه به مطالعات موردی اشاره شده است و با ارائه سه مورد، کاربرد روش تحلیل ارائه شده آورده شده است و نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از برنامه *sap2000* مقایسه

شده است. در بررسی این موارد انواع بارهای وارد بر پل با توجه به نشریه ۱۳۹ وزارت راه و ترابری ایران در نظر گرفته شده است.

فصل پنجم نیز شامل نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات حاصل از مطالعات انجام شده طی این پژوهش می‌باشد.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته و تئوری کابل‌ها

۲- ۱ بخش اول؛ مروری بر تحقیقات انجام گرفته

۲- ۱- ۱ مدلسازی کابل ها

بطور کلی در بحث مدل کردن کابل‌ها دو روش وجود دارد. این روش ها بطور خلاصه در جدول (۲- ۱) عنوان شده است (عبدالقفار و همکاران[۱]، ۱۹۹۱ ؛ احمدی کاشانی و بل[۲] ، ۱۹۸۸).

جدول(۲- ۱). روش های مدلسازی کابل

روش مدلسازی کابل	ویژگی	تقسیمات	توضیحات
روش های مبتنی بر المان های سازه ای	استفاده از چندین المان برای مدلسازی کابل	المان های میله ای (خرپایی)	رایج ترین شیوه است
			روش E معادل هم برای همین مورد به کار می رود
			بدلیل ناپیوستگی شیب در محل گره ها، جواب ها دارای خطا است
		المان های ایزوپارامتریک	
		المان های تیری	برای ایجاد پیوستگی شیب در محل اتصال دو المان
			المان های تیری جایگزین باید سختی خمشی کمی داشته باشند
روش های فرض شکل کابل	استفاده از فقط یک المان برای مدلسازی کابل	المان های سهموی	براساس فرض سهمی بودن شکل کابل است
			برای کابل با انحنای کم نتایج مناسب است
		المان های الاستیک زنجیری	حقیقی ترین المان است.

۲- ۱- ۲ تحقیقات و بررسی های انجام گرفته

یکی از روش های مدلسازی کابل ها استفاده از روش E معادل[۳] می باشد. این روش نخستین بار در سال ۱۹۶۵ توسط ارنست[۴] معرفی شد. در این روش سختی معادل تابعی از کشش، وزن، طول، و مدول الاستیسیته کابل است.

1- Abdel-Gaffar et al
2- Ahmadi-Kashani, K. Bell
3- Equivalent E
4- Ernst

این روش برای مدلسازی کابل با انحنای کم مناسب است و برای مدلسازی کابل-های با انحنای زیاد با شرط در نظر گرفتن المان های بیشتر نیز می توان از آن استفاده کرد. برای یک کابل تحت بار مرده وزن خود می توان از المان‌های الاستیک زنجیری که نخستین بار توسط ایروین[۱] (۱۹۸۱) و دومین بار توسط احمدی کاشانی[۲] (۱۹۸۵) ارائه شد استفاده نمود.

سان بینگ و زانگ[۳] (۲۰۰۴) به صورت موردی تحلیل سه بعدی غیر خطی یک پل ترکیبی معلق-کابلی را جهت مطالعه پایداری دینامیکی آن با در نظر گرفتن برخی پارامترها همچون شکم دادگی کابل، طول بخش معلق و شکل عرشه انجام دادند و در انتها به این نتیجه رسیدند که پل ترکیبی معلق- کابلی نسبت به یک پل معلق با همان طول دهانه دارای برتری است. همچنین دریافتند که هر چه طول بخش معلق کوتاهتر باشد برای پل ترکیبی مفیدتر است. دیگر اینکه استفاده از عرشه مرکب روشی مناسب برای بهبود پایداری دینامیکی پل ترکیبی است. از طرفی ستون‌های فرعی در دهانه‌های کناری از نظر دینامیکی برای پل ترکیبی مناسب است.

مایکل تسوس و همکارنش[۴] (۱۹۹۸) نیز روشی را برای فرمولبندی کابل تحت اثر وزن کابل در راستای طول آن ارائه دادند و نتایج خود را به صورت روابطی برای مدول الاستیسیته ارائه دادند و مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از روش ارائه شده خود را با مدول الاستیسیته مماسی مقایسه نمودند.

تانگ، وانگ و هوانگ[۵] (۱۹۶۳) در تحقیقات خود معادله تغییر شکل کابل را تحت اثر وزن خود ارائه داده و سپس روابطی را برای توصیف خوردگی کابل در اثر شرایط محیطی بدست آوردند و با معرفی کرنش معادل اصلی، مشخصات خوردگی کابل مورب را با کاهش مدول الاستیسیته مورد توجه قرار دادند

1- Irvin
2- Ahmadi-Kashani
3- Zhang Xin-jun, Sun Bing-nan
4- G.T. Michaltsos, N. Hajdin, T.G. Konstantakopoulos
5- Tao Tang, Juan Huang, Ronghui Wang

و با این کار یک روش مهندسی مناسب و راحت برای تعیین حالت واقعی کابل در سازه های کابلی موجود یافته و توسعه داده شده است.

رید کارومی[1] (۲۰۰۰) نیز روشی را برای مدلسازی و تحلیل پل های کابلی تحت تاثیر وسایل نقلیه ارائه داد که در آن از المان های محدود موثر و صحیح برای مدلسازی سازه پل، المان تیری برای مدل کردن شاهتیر و برج و نیز از المان کابلی پیوسته دو گرهی با استفاده از تعابیر تحلیلی دقیق برای زنجیره الاستیکی جهت مدل کردن کابل، استفاده شده است. همچنین در تحقیقات او میرایی پل، رفتار واقعی کابل و آثار هندسه غیر خطی حین تحلیل پاسخ دینامیکی مورد توجه قرار گرفت و اثر سرعت وسایل نقلیه، میرایی پل، عکس العمل بین پل و وسیله نقلیه و میراگر جرمی تنظیم شده بر روی واکنش دینامیکی پل مورد بررسی قرار گرفت.

فلمینگ[2] (۱۹۷۸) تحقیق خود را روی تحلیل استاتیکی غیر خطی پل های کابلی ارائه نمود. ایشان در این تحقیق با ارائه یک برنامه کامپیوتری، تحلیل سازه ای انجام داد و در بررسی خود آثار غیر خطی ناشی از کابل در اثر وزن آنها، اندرکنش بین بارمحوری و لنگر خمشی در اعضای خمشی و نیز تغییر شکل های بزرگ را در نظر گرفت و برای لحاظ نمودن اثر غیر خطی کابل ها از مدول الاستیسیته معادل برای آنها استفاده نمود.

کوماتسو و همکارانش[3] (۱۹۷۵) تحقیقات موردی را در مورد مشخصات دینامیکی پل های کابلی انجام دادند و نتایج عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. در تحقیقات ایشان تاثیر عواملی مثل سختی کابل بر روی مشخصات ارتعاشی سازه و سرعت وسایل نقلیه بر روی ضریب تقویت دینامیکی بررسی شد.

لیو و همکارانش[4] (۱۹۹۱) روش سختی مماسی را برای تحلیل سه بعدی اعضا در تحلیل آنها مورد استفاده قرار داد و نحوه اعمال آنها را در تحلیل پل های کابلی نشان دادند.

1- Raid Karoumi
2- Fleming
3- Komatso, Sada et al
4- Liu- Guangdong et al

استفان[1] (۱۹۹۲) تحقیقاتی را در زمینه پاسخ دینامیکی سازه های کابلی تحت کشش در اثر بارگذاری-های باد ارائه نمود. در تحقیق او مراحل تحلیل سازه های کابلی تحت اثر بارهای استاتیکی و واکنش آنها به بارهای دینامیکی باد تشریح شد. روش تحقیق ارائه شده توسط او قادر به احتساب حالت غیر خطی نیز بود که از روش حداقل کردن کل انرژی پتانسیل سیستم با روش گرادیان[2] انجام می شد.

وونگ و همکارانش[3] (۱۹۹۲) تحقیقاتی در زمینه ارتعاش پل های کابلی در اثر ارتعاش عرشه آنها انجام دادند و در ضمن آن واکنش پل های کابلی را به عبور وسیله نقلیه از عرشه پل بررسی کردند. بار کامیون در تحقیقات ایشان مطابق کامیون *HS20-44* بوده است و همچنین رفتار غیر خطی هندسی کابل ها، شاهتیر سخت کننده، برج ها و پایه های پل در اثر بارهای مرده در نظر گرفته شده است.

نظمی و همکارانش[4] (۱۹۹۲) در مورد ارتعاش پل های کابلی در اثر زلزله تحقیقاتی موردی ارائه دادند و جهت شناخت دقیق از رفتار سازه در اثر زلزله با استفاده از مدل های سه بعدی مناسب، آثار تغییر امواج زلزله در طول حرکت خود را لحاظ نمودند.

عبدالقفار و همکارانش[5] (۱۹۹۱) تحقیقات خود را در زمینه رفتار لرزه ای پل های کابلی سه بعدی ارائه کردند. در این تحقیق رفتار لرزه ای پل های کابلی سه بعدی مورد بررسی و مطالعه واقع شد و حرکات غیر یکنواخت و یکنواخت اعمال شده بر پایه های پل در نظر گرفته شد. حالت های غیر خطی (مانند تغییر هندسی ناشی از تغییر شکل های بزرگ و اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی در برج و شاهتیر سخت کننده) در پل های کابلی نیز مورد توجه قرار گرفت. سپس روش تکرار با استفاده از ماتریس سختی مماسی برای مطالعه پاسخ لرزه ای غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت مثال-های عددی نیز برای مقایسه بین تحلیل پاسخ خطی و غیر خطی در مقابل زلزله با استفاده از روش نموی (گام به گام) ارائه شد.

1- Stefanou,G.D. *2- Gradient Method* *3- Wong Ton-Lo et al*
4- Nazmy Aly,S et al *5- Abdel-Gaffar et al*

نظمی و همکارانش[1] (۱۹۹۰) تحقیقاتی را در زمینه تحلیل استاتیکی غیر خطی سه بعدی پل‌های کابلی ارائه نمودند. در این تحقیق روش آنالیز استاتیکی غیر خطی پل‌های کابلی تحت اثر وزن خود و نیروی پیش کشیدگی اولیه در کابل ها بیان شد. همچنین تمامی منابع غیر خطی (اعم از خیز کابل ها، اندر کنش $P\text{-}M$، و تغییر هندسی سازه در اثر تغییر شکل های بزرگ) در نظر گرفته شد و برای آنالیز استاتیکی غیر خطی سه بعدی یک برنامه کامپیوتری با استفاده از ماتریس سختی مماسی و روش تکرار ارائه شد.

جایارامان و نودسن[2] (۱۹۸۱) یک روش تحلیل تکراری را برای کابل های مدل شده با المان زنجیری الاستیک با استفاده از روابط تحلیلی دقیق ارائه دادند و المان زنجیری الاستیک با قابلیت کرنش کم را برای تحلیل سازه‌های کابلی معرفی نمودند. سختی المان کابلی و نیروهای دو سر کابل با استفاده از روش نیوتن - رافسون بدست آمد.

احمدی کاشانی[3] (۱۹۸۸) دو نوع المان کابلی زنجیری الاستیک و وابسته دو گرهی را بر اساس فرمول بندی ریاضی و بدون هیچ تقریبی ارائه دادند. با استفاده از این دو المان توانستند کابل های تحت بار یکنواخت توزیع شده بر کابل را فرمول بندی کنند.

محرمی و حیدری[4] (۱۳۸۸) تحقیقاتی را در زمینه دکل های مهار شده با کابل ارائه دادند و با استفاده از مدلسازی ریاضی، روش جدیدی برای تحلیل استاتیکی غیر خطی دکل های مهار شده با کابل با استفاده از روش پاره سازی سازه‌ها ارائه دادند و در تحقیقات خود منابع غیر خطی را نیز در نظر گرفتند.

۲- ۱- ۳ روش مورد استفاده در این پایان نامه

در این پایان نامه با روش پاره سازی سازه، و جدا نمودن قسمت های خطی سازه از قسمت غیر خطی آن (کابل ها) و مدلسازی کابل با المان زنجیری الاستیک و نیز با استفاده از برنامه *MATLAB* سازه پل

1- Nazmy Aly,S and et.al *2- Jayaraman HB, Knudson WC*
3- Ahmadi-Kashani K, Bell AJ *4- H.Moharrami , M.Heydary*