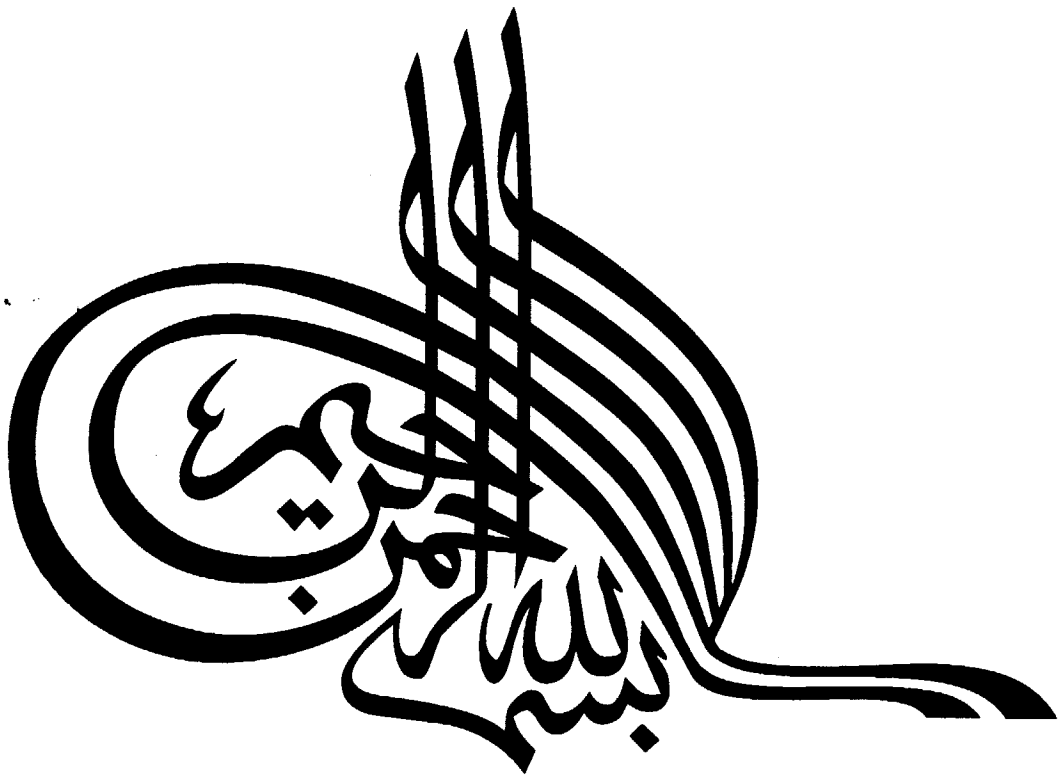

٣٣٠٥٥

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

۱۳۸۰ /۱/ ۱۰

طـراحی بهینهٔ عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم مدارک

پایان نامه کارشناسی ارشد سازه

بهـروز جعفـری

۱۰۱۱۶۹

استاد راهنما

دکتر کمال میرطلائی

۱۳۷۹

۳۲۰ ۵۵

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه - **آقای بهروز جعفری**

تحت عنوان :

طراحی بهینهٔ عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده

در تاریخ ۷۹/۸/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

۱ - استاد راهنمای پایان‌نامه — دکتر کمال میرطلائی .....

۲ - استاد مشاور پایان‌نامه — دکتر داود مستوفی‌نژاد .....

۳ - ممتحن مدعو (از دانشکده فنی دانشگاه تهران) — دکتر محمدصادق معرفت .....

۴ - عضو کمیته دفاع — دکتر بیژن برزومند .....

۵ - عضو کمیته دفاع (از پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا) — دکتر کیاچهر بهفرنیا .....

۶ - سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر داود مستوفی‌نژاد .....

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس بیقیاس ملک و العرشی را سزاست که از الطاف بی انتها تاج عزت بر سر انسان نهاد و او را مظهر صفت خالقیت خود نمود که در دنیای هنر و صنعت، مظاهر زیبا و سودمندی بیافریند. خدای منان را بی حد و حصر شاکرم که مرا در دامان پر مهر پدر و مادری دلسوز و مهربان پروراند؛ پدر و مادری که همچون شمع سوختند تا فرزندشان به آسانی مسیر علم و دانش را طی کند.

خالق بی‌همتا را بسیار سپاسگزارم که توفیق ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی اصفهان و نزد اساتید مجرب دانشکدهٔ عمران این دانشگاه را برای اینجانب فراهم نمود. امید آنکه بتوانم جوانب مختلف علمی و اخلاقی این بزرگواران را الگویی برای زندگی آیندهٔ خود قرار داده و به زعم خویش سهمی هر چند کوچک در شکوفائی شکوفه‌های آیندهٔ مملکت خود و آبادانی این مرز و بوم داشته باشم. اینجانب بر خود واجب می‌دانم که از زحمات و توجهات بی دریغ استاد راهنمای گرانقدر جناب آقای دکتر کمال میرطلائی که با رهنمودهای بسیار ارزندهٔ خود انجام این مهم را به بهترین صورت ممکن میسر نمودند و همچنین جناب آقای دکتر داود مستوفی‌نژاد استاد مشاور محترم که در این راستا زحمات قابل توجهی را متحمل شدند، نهایت سپاسگزاری و قدردانی را داشته باشم.

در ازل پرتو حسنت ز تجلی دم زد عشق پیدا شد و آتش به همه عالم زد

بهروز جعفری

بیست‌وپنجم آبان ۱۳۷۹

کلیه حقـوق مـادی مـترتب بـر نتـایج مطالعـات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیـق موضـوع این پایان نامه (رساله) متعلق بـه دانشـگاه صنعتـی اصفهان می‌باشد.

تقدیم به پدر و مادرم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
نمادها	دوازده
چکیده	۱
فصل اول : مقدمه و کلیات	
۱-۱- بهینه‌سازی	۲
۱-۲- پل	۳
۱-۳- تاریخچه کارهای انجام شده	٤
۱-٤- اهمیت موضوع و هدف آن	۸
فصل دوم : پلهای بتنی پیش‌تنیده	
۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲- مفهوم پیش‌تنیدگی	۱۲
۲-۲-۱- مزایا و معایب بتن پیش‌تنیده	۱۲
۲-۳- مشخصات بتن مورد استفاده در اعضای پیش‌تنیده	۱۲
۲-٤- فولادهای پیش‌تنیدگی	۱۳
۲-۵- انواع تیرهای پیش‌تنیده	۱۳
۲-۵-۱- تیرهای پیش‌کشیده	۱۳
۲-۵-۲- تیرهای پس‌کشیده	۱۳
۲-٦- دستورات آئین‌نامه‌ای	۱٤
۲-٦-۱- تنش‌های مجاز	۱٤
۲-٦-۲- محافظت در برابر خوردگی	۱٤
۲-٦-۳- محدودیت فواصل فولادهای پیش‌تنیدگی	۱۵
۲-٦-٤- ضرائب تقلیل ظرفیت	۱۵
۲-٦-۵- عرض مؤثر دال	۱۵
۲-٦-٦- مقاومت فشاری بتن پیش‌تنیده	۱٦
۲-۷- محاسبه تنش‌ها در بتن پیش‌تنیده	۱٦
۲-۸- مقاومت نهائی خمشی اعضای پیش‌تنیده	۱۷
۲-۹- لنگر ترک خوردگی	۱۷

۲-۱۰- نقاط بحرانی جهت کنترل تنشهای خمشی ۱۸
۲-۱۱- طراحی تیرهای پیش‌تنیده در مقابل برش ۱۸
۲-۱۲- پل ۱۹
۲-۱۳- بارهای وارده بر پل ۱۹
۲-۱۳-۱- بار مرده ۱۹
۲-۱۳-۲- بارهای زنده ۱۹
۲-۱٤- طبقه بندی بارهای جاده‌ای ۲۰
۲-۱٤-۱- بارگذاری نوع H ۲۰
۲-۱٤-۲- بارگذاری نوع HS ۲۰
۲-۱۵- اثر دینامیکی وسائل نقلیه(اثر ضربه) طبق آئین‌نامه آشتو ۲۱
۲-۱٦- نحوهٔ کاربرد بارهای زنده ۲۱
۲-۱۷- تعداد خطوط طرح ۲۲
۲-۱۸- ضوابط آئین‌نامه آشتو در طرح پل ۲۲
۲-۱۸-۱- لنگر خمشی مثبت در پایه‌های میانی ۲۲
۲-۱۸-۲- فولادهای توزیع در دالها ۲۳
۲-۱۸-۳- محدودیت خیز روسازه‌ها ۲۳
۲-۱۹- ترکیب بارها ۲۳
۲-۲۰- روشهای طراحی ۲٤
۲-۲۰-۱- روش تنش مجاز ۲٤
۲-۲۰-۲- روش مقاومت نهائی ۲٤
۲-۲۱- روشهای آنالیز عرشه پل ۲٤
۲-۲۲- بهینه‌سازی ۲۵
۲-۲۲-۱- بیان مسئله بهینه‌سازی ۲٦
۲-۲۲-۲- بردار طراحی ۲٦
۲-۲۲-۳- قیدهای طراحی ۲۷
۲-۲۲-٤- تابع هدف ۲۷
۲-۲۳- روشهای حل مسئله بهینه‌سازی ۲۷

فصل سوم : طرح بهینهٔ سیستم پل

۳-۱- مقدمه ۲۹
۳-۲- روند طراحی بهینهٔ پلهای بتنی پیش‌تنیده ۲۹
۳-۳- فرضیات اولیه ۳۰
۳-۴- فرمول‌بندی مسئله ۳۱
۳-۵- متغیرهای طراحی ۳۱

۳-٦- هزینه‌های اجرائی ۳٤
۳-٦-۱- هزینه بتن مصرفی در تیرهای پیش‌تنیده ۳٤
۳-٦-۲- هزینه فولادهای پیش‌تنیدگی ۳٤
۳-٦-۳- هزینه فولاد معمولی ۳٤
۳-٦-٤- هزینه بتن دال ۳٥
۳-٦-٥- هزینه بالشتکهای الاستومری ۳٥
۳-٦-٦- هزینه قالب‌بندی ۳٥
۳-٦-۷- هزینه حمل و نقل و نصب ۳٥
۳-٦-۸- هزینه پی‌کنی ۳٦
۳-۷- تابع هدف ۳٦
۳-۷-۱- هزینه تیر ۳۷
۳-۷-۲- هزینه دال ٤۰
۳-۸- قیود طراحی ٤۲
۳-۸-۱- قیود مرحله انتقال ٤٤
۳-۸-۲- قیود مرحله سرویس ٤٥
۳-۸-۳- کنترل خروج از مرکزیت ماکزیمم در وسط دهانه ٤٦
۳-۸-٤- کنترل مقاومت خمشی نهائی مقطع مرکب در ناحیه لنگر مثبت (وسط دهانه) ٤۷
۳-۸-٥- مقاومت خمشی نهائی مقطع مرکب در ناحیه لنگر منفی (روی تکیه‌گاه) ٤۹
۳-۸-٦- کنترل فولاد حداکثر لنگر منفی دال روی تکیه‌گاه ٥۰
۳-۸-۷- فولاد منفی عرضی دال ٥۰
۳-۸-۸- کنترل فولاد حداکثر لنگر منفی عرضی دال ٥۱
۳-۸-۹- فولاد مثبت عرضی دال ٥۱
۳-۸-۱۰- کنترل فولاد حداکثر لنگر مثبت عرضی دال ٥۱
۳-۸-۱۱- کنترل لنگر ترک خوردگی (فولاد حداقل) ٥۲
۳-۸-۱۲- تعیین آرماتور برشی تیر ٥۲
۳-۸-۱۳- کنترل خیز ٥۳
۳-۹- روش آنالیز عرشهٔ پل ٥۳
۳-۱۰- حل مسئله بهینه‌سازی ٥٥
۳-۱۱- جعبه ابزار بهینه‌سازی *MATLAB* ٥٥
۳-۱۱-۱- موارد کاربرد جعبه ابزار بهینه‌سازی ٥٥
۳-۱۲- فلوچارت طراحی بهینه سازه ٥۷
۳-۱۳- بررسی عملکرد برنامه ٥۹
۳-۱٤- طرح بهینه سیستم‌های پل-کاربرد عملی ٦۱
۳-۱٤-۱- روش تحقیق ٦۱

۳-۱۵- بررسی نتایج ٦۲
۳-۱۵-۱- مقاومت بهینه بتن تیر ٦۲
۳-۱۵-۲- نیروی پیش‌تنیدگی بهینه ٦٦
۳-۱۵-۳- ضخامت بهینه دال ٦۸
۳-۱۵-٤- خروج از مرکزیت بهینه ۷۱
۳-۱٦- هزینه حداقل واحد عرشه ۷۱
۳-۱٦-۱- مقطع بهینهٔ تیر ۷۱
۳-۱٦-۲- فاصله بهینه تیرها (تعداد بهینه تیرها در عرض) ۷۳
۳-۱٦-۳- تعداد دهانه ۷۷
۳-۱۷- تحلیل حساسیت ۸۰
۳-۱۷-۱- موقعیت نقاط شکستگی کابل ۸۰
۳-۱۷-۲- نسبت f'_{ci}/f'_{c} ۸۱
۳-۱۷-۳- مقاومت بتن دال ۸۱
۳-۱۷-٤- محدودیت ضخامت دال ۸۲
۳-۱۸- مقایسه مقاطع آشتو و $CPCI$ ۸۳
۳-۱۹- محدودهٔ دهانه قابل پوشش توسط مقاطع آشتو ۸٤

فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات

٤-۱- مقدمه ۸٦
٤-۲- نتیجه گیری ۸۷
٤-۳- پیشنهادات ۸۸
پیوست۱ ..... ۸۹
پ۱-۱- هزینه زیرسازه ۹۰
پ۱-۱-۱- طراحی بالشتکهای الاستومری ۹۱
پ۱-۱-۲- طراحی پایه‌های میانی پل ۹۲
پ۱-۱-۳- طراحی پی ۹٤
پ۱-۲- تعیین حالت طولی بهینه ۹٦
پیوست۲ ..... ۱۰۰
مراجع ۱۳٦
چکیده انگلیسی ۱۳۸

نمادها

A_t	مساحت پلان بالشتک
A_p	سطح مقطع تیر پیش‌تنیده
A_{ps}	سطح مقطع فولادهای پیش‌تنیدگی
A_s^-	سطح مقطع آرماتورهای طولی لنگر منفی روی پایه‌ها در دال مربوط به عرض مؤثر
A_{sf}	سطح مقطع آرماتور خمشی لازم برای یک متر از پی
A_{ss}^+	سطح مقطع آرماتور لنگر مثبت عرضی مربوط به یک متر از دال
A_{ss}^-	سطح مقطع آرماتور لنگر منفی عرضی مربوط به یک متر از دال
A_{st}	سطح مقطع فولاد توزیع مربوط به یک متر از دال
A_{swv}	سطح مقطع فولادهای قائم لازم برای یک متر از دیوار
b_1	عرض واحد که برابر یک متر در نظر گرفته می‌شود.
b_e	عرض مؤثر دال
b_f	عرض پی
$C.G.C$	مرکز هندسی مقطع بتنی
$C.G.S$	مرکز هندسی فولادهای پیش‌تنیدگی
C_c	هزینه بتن تیر بر متر مکعب
C_e	هزینه کل بالشتکها
C_{eu}	هزینه بالشتک بر حسب ریال بر دسی متر مکعب
C_f	هزینه قالب‌بندی بر حسب ریال بر متر مربع
C_{fc}	هزینه کل بتن پی
C_{fcu}	هزینه بتن پی بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{fe}	هزینه کل پی‌کنی
C_{feu}	هزینه واحد پی‌کنی بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{ff}	هزینه کل قالب‌بندی پی
C_{ffu}	هزینه واحد قالب‌بندی پی بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{fs}	هزینه کل فولادهای خمشی پی
C_{fst}	هزینه آرماتورهای افت و حرارت در پی
C_{ft}	هزینه کل حمل خاک
C_{ftu}	هزینه واحد حمل خاک بر حسب ریال بر متر مکعب
C_g	هزینه یک تیر شامل مصالح، ساخت، حمل و نقل، نصب، قالب‌بندی و دورریز
C_{gc}	هزینه بتن تیر
C_{gcr}	هزینه جرثقال بر حسب ریال بر ساعت با توجه به وزن تیر
C_{gct}	هزینه کل حمل و نقل و نصب یک تیر بر حسب ریال

C_{gf}	هزینه کل قالب‌بندی یک تیر بر حسب ریال
C_{gs}	هزینه کل فولادهای پیش‌تنیدگی یک تیر بر حسب ریال
C_{gsp}	هزینه کل فولاد لنگر مثبت یک تیر بر حسب ریال
C_{gt}	هزینه حمل بر حسب ریال با توجه به طول تیر
C_{gv}	هزینه کل آرماتورهای برشی یک تیر
C_{ps}	هزینه فولاد پیش‌تنیدگی بر حسب ریال بر کیلو گرم
C_{s}	هزینه فولاد معمولی بر حسب ریال بر کیلو گرم
C_{sc}	هزینه بتن دال برای کل عرشه
C_{scu}	هزینه بتن دال بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{sf}	هزینه کل قالب‌بندی دال عرشه بر حسب ریال
C_{sl}	هزینه کل دال شامل مصالح، ساخت، قالب‌بندی و دورریز
C_{sn}	هزینه کل فولاد منفی عرضی دال بر حسب ریال
C_{sn}^{-}	هزینه کل آرماتور طولی لنگر منفی بر حسب ریال
C_{sp}	هزینه کل فولاد مثبت عرضی دال بر حسب ریال
C_{st}	هزینه کل فولادهای توزیع و حداقل در دال بر حسب ریال
C_{sub}	هزینه زیرسازه بر واحد سطح عرشه بر حسب ریال بر مکعب
C_{wc}	هزینه کل بتن دیوار
C_{wcu}	هزینه بتن دیوار بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{wf}	هزینه کل قالب‌بندی دیوار
C_{wfu}	هزینه قالب‌بندی دیوار بر حسب ریال بر متر مکعب
C_{wsh}	هزینه کل فولاد برشی (افقی) در دیوار
C_{wsv}	هزینه کل فولاد خمشی در دیوار
d	فاصله آرماتورهای لنگر منفی از وجه تحتانی تیر
d_c	پوشش آرماتور
d_f	عمق مؤثر پی
d_p	فاصله مرکز سطح فولادهای پیش‌تنیدگی از وجه فشاری مقطع مرکب
d_{sb}	فاصله فولاد منفی عرضی تا وجه تحتانی دال
d_{st}	فاصله فولاد مثبت عرضی تا وجه فوقانی دال
d_w	عمق مؤثر دیوار
e	خروج از مرکزیت کابل پیش‌تنیدگی
e_{max}	حداکثر خروج از مرکزیت قابل دسترس
f_c	تنش مجاز فشاری بتن در مرحله بهره‌برداری
f'_c	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن
f_{ci}	تنش مجاز فشاری بتن در مرحله انتقال

f'_{ci}	مقاومت فشاری بتن در مرحله انتقال
f_t	تنش مجاز کششی بتن در مرحله بهره‌برداری
f_{ti}	تنش مجاز کششی بتن در مرحله انتقال
G	مدول برشی بالشتک
h_w	ارتفاع دیوار
I	ممان اینرسی تیر پیش‌تنیده
I_c	ممان اینرسی مقطع مرکب
I_s	تنش مؤثر پیش‌تنیدگی اصلاح شده در بتن
L	طول دهانه پل
L_e	طول بالشتک
L_f	طول پی
L_v	طول آرماتور برشی
L_w	طول دیوار
M_{an}	حداکثر لنگر منفی ناشی از بار مرده اضافی (آسفالت)
M_{aP}	حداکثر لنگر مثبت ناشی از بار مرده اضافی (آسفالت)
M_{asn}	لنگر منفی ناشی از وزن آسفالت در جهت عرضی در مقطع دال
M_{asp}	لنگر مثبت ناشی از وزن آسفالت در جهت عرضی در مقطع دال
M_b	لنگر ناشی از وزن تیر در وسط دهانه
M_{Ln+I}	حداکثر لنگر منفی ناشی از بار زنده بعلاوه ضربه
M_{LP+I}	حداکثر لنگر مثبت ناشی از بار زنده بعلاوه ضربه
M_{Lsn+I}	لنگر منفی ناشی از بار زنده بعلاوه ضربه در جهت عرضی در مقطع دال
M_{Lsp+I}	لنگر مثبت ناشی از بار زنده بعلاوه ضربه در جهت عرضی در مقطع دال
M_s	لنگر ناشی از وزن دال در وسط دهانه
M_{sn}	لنگر منفی ناشی از وزن دال در جهت عرضی
M_{sp}	لنگر مثبت ناشی از وزن دال در جهت عرضی
n	تعداد دهانه‌ها
n_e	تعداد بالشتک در هر ردیف تیر
n_g	تعداد کل تیرها
n_{gw}	تعداد تیرها در عرض پل
n_n	تعداد تکیه‌گاه‌های میانی
P_e	نیروی پیش‌تنیدگی مؤثر بعد از کلیه افتها
P_f	نیروی فشاری وارده به یک متر از پی
P_i	نیروی پیش‌تنیدگی اولیه
P_r	محیط مقطع تیر به‌جز وجه فوقانی

R	نیروی کل وارده به هر بالشتک
R_a	عکس‌العمل تیر در اثر وزن آسفالت
R_{bs}	نیروی وارده به هر بالشتک در اثر وزن تیر و دال روی آن
R_L	عکس‌العمل تیر در اثر بار زنده
S	فاصله آرماتورهای برشی
S_b	فاصله آزاد بین تیرها
t	ضخامت دال
t_e	ضخامت بالشتک
t_{ef}	ضخامت مؤثر دال
t_f	عمق پی
t_l	زمان لازم برای حمل و نقل و نصب یک تیر
V_a	نیروی برشی در اثر وزن آسفالت در مقطع بحرانی
V_{L+I}	نیروی برشی در اثر بار زنده بعلاوه ضربه در مقطع بحرانی
W	عرض پل
W_b	وزن واحد طول تیر
W_e	عرض بالشتک
W_s	وزن واحد طول دال مربوط به عرض مؤثر
Y_b	فاصله تار خنثی تیر پیش‌تنیده تا وجه تحتانی
Y_{cb}	فاصله تار خنثی مقطع مرکب تا وجه تحتانی این مقطع
Y_{ct}	فاصله تار خنثی مقطع مرکب تا وجه فوقانی این مقطع
Y_t	فاصله تار خنثی تیر پیش‌تنیده تا وجه فوقانی
X	فاصله مقطع بحرانی برش تا انتهای تیر
α	نسبت افت پیش‌تنیدگی در مرحله انتقال
α_c	ضریب انبساط حرارتی بتن
β	نسبت افت پیش‌تنیدگی در مرحله بهره‌برداری
ΔT	تغییر دما
δ_c	مقدار متوسط تنش فشاری وارده بر هر بالشتک
Δ_s	حداکثر تغیر طول حرارتی تیر
γ_c	وزن مخصوص بتن
γ_s	وزن مخصوص خاک
ρ_{min}	نسبت آرماتور حداقل
ρ_s	جرم واحد حجم فولاد

چکیده

دراین تحقیق سیستم پلهای بتنی پیش‌تنیده از لحاظ اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. پلهای مورد نظر از نوع دال-تیر می‌باشد، بطوریکه در آنها تیرهای بتن پیش‌تنیده با یک دال که روی تیرها بصورت درجا بتن ریزی می‌شود، یکپارچه شده و در مقابل بارهای خارجی بصورت مرکب عمل می‌نماید. بدین ترتیب آنچه که در این تحقیق مورد نظر است، بهینه‌سازی سیستم‌های پل و تیرهای بتنی پیش‌تنیده مربوطه می‌باشد. در این زمینه یک سری از متغیرهای طراحی که در تعیین طرح بهینه مؤثر می‌باشند، یک تابع هدف که شایستگی طرح‌های مختلف را اندازه‌گیری می‌کند و همچنین گروهی از قیود طراحی که مربوط به کنترل ضوابط آئین‌نامه‌ای می‌باشند، برای سازه پل در نظر گرفته می‌شوند. همچنین چهار پارامتر مهم که می‌توانند تأثیر بسیار زیادی روی هزینه داشته باشند، در روند بهینه‌سازی تغییر داده می‌شوند. این چهار پارامتر شامل شکل و سطح مقطع تیرها، فاصله عرضی تیرها، تعداد و طول دهانه می‌باشد. بهینه‌سازی انجام شده شامل بهینه‌سازی اجزاء (تعیین مقدار بهینه متغیرها) و ترکیب اعضای طولی (تعداد دهانه) و عرضی (تعداد تیر در عرض) پل می‌باشد؛ بطوریکه در ابتدا با انتخاب هر کدام از پارامترهای چهارگانه فوق و با انجام روند بهینه‌سازی، مقدار بهینه متغیرهای طرح شامل نیروی پیش‌تنیدگی، خروج از مرکزیت کابلها، مقاومت فشاری بتن تیر، ضخامت دال، میزان فولادهای غیر پیش‌تنیدگی در دال و فاصله آرماتورهای برشی تیر بدست می‌آید. سپس طرحهای مختلف با توجه به هزینه مؤثر نسبی آنها نسبت به هم مقایسه شده و اقتصادی‌ترین طرح از لحاظ سطح مقطع تیرها و ترکیب اعضای طولی و عرضی مشخص می‌شود. بدین ترتیب روند بهینه‌سازی بکاربرده شده در این تحقیق می‌تواند جهت تعیین طرح بهینه مقاطع بتنی پیش‌تنیده و آرایش اعضاء در جهت طولی و عرضی پل مناسب باشد. از مهمترین نتایج بدست آمده به این صورت می‌باشد که استفاده از تیرهای عمیق‌تر با مقاومت بتن کمتر نسبت به تیرهای کم عمق‌تر با مقاومت بتن بیشتر، اقتصادی‌تر می‌باشد. همچنین فاصله بهینه تیرها تقریباً ثابت و برابر ۲/۸ متر می‌باشد. در تمام طرحهای بهینه مورد تحقیق، قیود تنش فشاری در مرحله انتقال و تنش کششی در مرحله بهره‌برداری فعال بودند؛ قید تنش کششی در مرحله انتقال، تنها برای دهانه‌های کوتاه فعال بود. همچنین به منظور نشان دادن دامنه کاربرد نتایج بدست آمده نسبت به فرضیات و متغیرهای در نظر گرفته شده، تحلیل حساسیت مسئله بهینه‌سازی انجام شده و حساسیت تابع هدف نسبت به فرضیات و متغیرهای مسئله نشان داده می‌شود.