



کد مقاله: ۱-۱۴۳

بهینه سازی مخازن بتنی نیمه مدفون نگهدارنده سیالات توسط الگوریتم اجتماع ذرات و غلاف تقویتی منشوری

غلامرضا هوایی^۱، سعید کیا^۲

۱-عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، havaei@aut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

مخازن بتنی یکی از سازه‌های مهم در نگهداری سیالات به منظور ذخیره‌سازی و استفاده در شبکه‌های آب شرب می باشند. این مخازن مستطیلی معمولاً دارای اشکال ثابتی بوده و با توجه به میزان دبی ورودی، شرایط زمین ساختگاه، نوع بار استاتیکی و دینامیکی طراحی و محاسبه می گردند. در این تحقیق بر اساس آنالیزهای انجام شده در ابتدا المان‌های جداره‌های مخزن تیپ شده و سپس میزان دامنه ضخامت پوسته و سطح مقطع میلگرد مصرفی حداقل و حداکثر در هر یک از المان‌ها بر اساس میزان تنش حداکثری مشخص شده اند. در مرحله بعد برپایه آنالیز مخزن و به کمک الگوریتم رابط PARIS اطلاعات مربوطه با کد الگوریتم اجتماع ذرات (Particle Swarm Algorithm) که یک الگوریتم جستجوی اجتماعی می باشد ترکیب شده تا میزان ضخامت بهینه مقاطع المان‌های پوسته مخزن به همراه میزان بهینه سطح مقطع میلگرد های مصرفی مشخص شوند. با توجه به مدل‌های خطی ریاضی بسیار پیچیده برای جانمایی صحیح و زوایای مربوط به زنجیره ای از غلاف های تقویتی پیرامونی که باعث بهسازی لرزه‌ای سازه می شوند، یک رابطه دو طرفه بین نرم افزار مدل سازی و کد الگوریتم اجتماع ذرات در جهت بهینه سازی انتخاب گردیده است. در انتها میزان مقایسه ای وزن بهینه سازی شده مخزن بتنی توسط غلاف تقویتی پیرامونی با روش های متداول مورد ارزیابی قرار گرفته است که نشان دهنده کاهش ۱۹٪ وزن میلگرد مصرفی، ۲۰٪ وزن بتن مصرفی و حداقل صرفه جویی ۱۳٪ هزینه ساخت بر اساس آیتم های فهرست بهاء در یک مخزن بتنی ۱۰۰۰۰ متر مکعبی شده است.

کلمات کلیدی: بهینه سازی، الگوریتم اجتماع ذرات، مخازن بتنی، غلاف تقویتی پیرامونی، PSO

۱. مقدمه

امروزه، کاربرد سازه های بتن مسلح به منظور ذخیره آب یا دیگر مایعات آبی گسترش فراوانی یافته است. در این راستا، برای ساخت سازه هایی با کیفیت بالا و با صرفه اقتصادی رعایت یک طراحی و اجرای درست و دقیق آن از اهمیت خاصی برخوردار است [۱]. هر سازه ای که برای نگهداری مایعات طراحی می شود باید از پایداری، مقاومت و استحکام کافی در برابر ترک خوردگی و تغییر شکل برخوردار باشد. طراحی باید به گونه ای باشد که مایع نتواند از میان بتن سازه نفوذ و یا تراوش نماید [۲]. در سازه های معمولی، جنبه بحرانی طراحی، پایداری و مقاومت سازه در مقابل بار های وارده می باشد. اما در طراحی مخازن نگهدارنده مایعات، سازه باید افزون بر پایداری و استحکام سازه ای، در برابر نفوذ و تراوش نیز مقاومت کافی نشان دهد. بنابراین در این گونه سازه ها، باید پوشش بتنی مناسب برای آرماتور در نظر گرفته شود. لذا طراحی سازه های نگهدارنده مایعات آبی، حساستر از سازه های معمولی می باشد [۳].

در گذشته طراحی سازه های بتنی بر مبنای تئوری الاستیک انجام می پذیرفته حال آنکه پایه و اساس این تئوری، کنترل تنش های حداکثر زیر بار های وارده می باشد. طراحی سازه های نگهدارنده مایعات آبی، براساس روابط الاستیک و با محدود بودن تنش های مصالح به مقادیر مجاز انجام گرفته شده است و با وجود این تنش کم، ترک در سازه به میزان زیاد توسعه نیافته است. این مساله سبب کاربرد مقاطع ضخیم بتن همراه با مقدار زیادی از فولاد می شود. در آن زمان تحلیل مسائل بر روی احتمال ترک خوردگی حرارتی و ترک خوردگی ناشی از افت بتن بر اساس پایه های قابل قبولی صورت نگرفته بود. همچنین در آیین نامه ها فقط مقادیر اسمی فولاد آورده می شد. در سال های اخیر حالت حدی که پایه های منطقی بیشتری دارد، برای تعیین فاکتور های ایمنی معرفی شد در این روش ضرایب بار های وارده به همراه مقاومت های نهایی مصالح در طراحی سازه مخازن استفاده گردیده است. به منظور محاسبه عرض ترک خمشی و مقایسه آن با بیشترین مقدار مجاز، از روش های تحلیلی توسعه یافته ای استفاده می شود. افزون بر آن، روش های محاسبه اثرات کرنش های حرارتی و کرنش های ناشی از افت خشک شدن بتن نیز مطرح گردیده است. پیشرفت های مذکور سبب توسعه اعمال روش حالات حدی در طراحی سازه های نگهدارنده مایعات آبی شده اند. روش طراحی حالات حدی، امکان شناسایی و بررسی حالت های ممکن شکست سازه را به طراحان می دهد، بطوریکه بتوان از گسیختگی زودرس سازه جلوگیری به عمل آورد [۴].

در این تحقیق با توجه به یکسان بودن شکل سازه مخازن بتنی و میزان دامنه دبی آب ورودی که از ۱۰۰۰ الی ۳۰۰۰۰ متر مکعب می باشند. در ابتدا یک مخزن با حجم دبی ورودی ۱۰۰۰۰ متر مکعبی و با توجه به حالت حداکثری شرایط طراحی در کشور انتخاب گردیده است. طبق آنالیز های انجام شده بر اساس فرضیات مطرح شده محدوده ای از ضخامت المان های پوسته و میلگرد های مصرفی بر طبق بیشترین تنش موجود در سازه مشخص شده اند. سپس با کمک الگوریتم رابط **PARIS (Parameter Identification System)** که به مفهوم ارتباط دهنده نرم افزار محاسباتی به روش المان محدود و کد نگارش شده الگوریتم اجتماع ذرات در نرم افزار مطلب می باشد [۵] و [۱۴]، یک رابطه دو طرفه برای دستیابی به مقاطع بهینه انتخاب گردیده است. در انتها در جهت استفاده از غلاف تقویتی پیرامونی هر یک از پارامتر های بهینه سازی شده با توجه به قیود مربوطه مورد ارزیابی مجدد در فرآیند آنالیزی قرار گرفته تا جهت قرارگیری و جانمایی بهینه آن ها مشخص شوند.

۲. مسائل بهینه سازی

مسائل بهینه سازی را در حالت کلی می توان به دو گروه مسائل بدون قید و مسائل مقید تقسیم می شوند [۶]. در بهینه سازی سازه ها به دلیل وجود قیود متعدد برای محدود نمودن تنشها، تغییر شکلها و مصالح مصرفی، غالباً با مسائل مقید سروکار داریم. مسئله بهینه سازی مخازن بتنی نگهدارنده سیالات نیز یک مسئله بهینه سازی سازه ای مقید می باشد. برای تبدیل یک مسئله مقید به یک مسئله بدون قید روشهای مختلفی وجود دارد که رایج ترین آنها استفاده از تابع جریمه است که نوع به کار گرفته شده در تحقیق حاضر می باشد. حال به بیان مسئله بهینه سازی کلی می پردازیم. یک مسئله بهینه سازی (کمینه سازی) را می توان به صورت زیر مطرح نمود:

$$\text{minimize } : F(\{X\}) \quad (1-2)$$

$$\text{subject } : \begin{cases} g_i(\{X\}) \leq 0 & [i = 1, 2, \dots, k] \\ h_j(\{X\}) = 0 & [j = 1, 2, \dots, z] \end{cases} \quad (2-2)$$

$$(X_L) \leq (X) \leq (X_U) \quad (3-2)$$

در رابطه (۱-۲) بردار $\{X\}$ نمایانگر متغیرهای طراحی و نماد F نشان دهنده تابع هدف مسئله بهینه سازی بوده که معیاری برای طرح های مختلف و انتخاب طرح برتر به شمار می آید. مشخص است که کمینه سازی تابع هدف نباید اثر نامطلوبی بر رفتار سازه و کارایی آن داشته باشد. سپس لازم است نقطه کمینه تابع هدف نابرابری های رابطه (۲-۲) را که قیود مسئله نامیده می شوند، برآورده نماید. نمادهای g و h در

برگیرنده شرایطی است که دامنه حدود تغییرات، توانایی سازه برای تحمل بارهای وارده و نیز سایر معیارهای کاربردی آن را تضمین می کند. از طریق می توان محدودیت های حداقل و حداکثر میزان آرماتور مصرفی، تغییرات ضخامت جداره مخازن بتنی، بیشترین تنش و بیشترین تغییر مکان را نام برد. سرانجام رابطه (۲-۳) نشان دهنده محدودیتهایی است که به دلیل ملاحظات غیر رفتاری سازه مانند مسائل اجرا برمتغیرهای طراحی وارد می گردند [۲۰].

۳. طراحی مخزن بتنی از منظر ساخت و بهره برداری

۳-۱- کلیات

در تاسیسات آبرسانی، مخازن آب جهت هماهنگ کردن تولید و مصرف آب و همچنین تنظیم فشار در شبکه آبرسانی استفاده می شوند. تاسیسات آبیگری و تصفیه آب بر پایه حداکثر دبی مصرفی روزانه تا هفتگی مصرف آب طرح می شود. توجه به جنبه های اقتصادی طرح و بهره برداری ایجاب میکند، که ظرفیت تاسیسات برداشت بطوری باشد که در روندی یکسان در شبانه روز، بتواند آب مورد نیاز را تامین نماید [۳]. روشن است که مصرف آب در شهر نمی تواند تابع این روند بخواهد باشد، مصرف آب در ساعات مختلف، بر حسب شرایط، ممکن است تا چند برابر میانگین مصرف روزانه متغیر باشد. برای کاهش یا حذف تاثیر این نوسانات و ایجاد هماهنگی بین تولید و مصرف آب، ساخت مخازن هماهنگ کننده یا تعدیل کننده از منظر اقتصادی و بهره برداری قابل توجه می باشد [۲۱]. این مخازن بتنی در هر نقطه از تاسیسات آبرسانی که ساخته شوند، پیرامون خود را از تغییرات شدید مصرف ساعتی آب محفوظ نگه خواهند داشت. مناسبترین محل برای ساخت این مخازن در صورتی که شرایط ایجاب نماید در مرکز توزیع آب یا در کنار آن می باشد. در این موقعیت، خطوط انتقال و تاسیسات آبیگری و تصفیه از تغییرات ساعتی مصرف ایمن بوده و هزینه های بهره برداری طرح از نگاه اقتصادی مناسب می شود [۱۰].

در این تحقیق با توجه به یکسان بودن المان های سازه ای در مخازن بتنی مستطیلی مدفون یک مخزن بتنی با امکان ذخیره ۱۰۰۰۰ مترمکعب آب مورد نیاز شبکه توزیع انتخاب گردیده است در این مرحله با توجه به سوابق طراحی گوناگون مخازن حدود ضخامت دیوارها، فونداسیون و سقف برای دستیابی به حدود مرزی قید ها انتخاب شده است تا فضای بهینه سازی مسئله در فضای مناسب انتخاب شود. در مرحله بعدی با کمک آنالیز محاسباتی به روش المان های محدود دامنه ای از جداره های پوسته مخزن با توجه به موقعیت های کناری و میانی با فرض تاثیر بارگذاری نیروی آب درون مخزن بر دو جداره متقابل در حالت پر از آب و یک جداره انتخاب گردیده است. در بین المان های مطرح شده آن طیف از المان هایی که حداکثر میزان تنش وارده را دارند انتخاب گردیده اند تا در ابتدا ضخامت بهینه جداره پوسته، میزان بهینه میلگرد مصرفی محاسبه و در مرحله بعد همین پارامتر های مورد بررسی برپایه غلاف تقویتی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

۳-۲- فرضیات محاسبات مخزن بتنی

در این تحقیق با توجه به تیپ بودن شکل سازه ای مخازن بتنی فرضیاتی بر اساس مدل سازی صورت گرفته انتخاب شده است. سازه مخزن به صورت نیمه مدفون بوده که آب مخزن ۱۰۰۰۰ متر مکعبی هدایت شده می باشد. حداکثر تراز آب در مخزن برابر ۴,۷+ متر نسبت به تراز کف می باشد. ابعاد تراز های سازه مخزن در کف برابر ۴۱,۶۰ متر عرض، ۶۱,۶۰ متر طول و در ارتفاع ۵,۳۵+ متر برابر ۴۰,۶۰ متر عرض، ۶۰,۶۰ متر طول می باشد. به منظور افزایش ضریب اطمینان و همچنین کاهش مقادیر تنش در پای دیوارها، در کف پاشنه ای به عرض ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. سازه بتنی مخزن شامل دیوارهای پیرامونی بتنی به ارتفاع ۵,۱۰ متر می باشد که بر روی سقف آن ۴۰ سانتیمتر خاکریزی انجام شده است. این سازه به صورت نیمه مدفون در زمین در نظر گرفته شده است و همچنین با توجه به محافظت از محموله، امکان تردید وسایط نقلیه از روی سقف مخزن وجود ندارد [۹ و ۳].

مصالح بتنی مورد استفاده در مخزن، با توجه مقاومت مورد نیاز و همچنین کاربری سازه مورد نظر، با حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی برابر ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و حداقل سیمان مصرفی برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. بتن مورد استفاده حداکثر مقدار نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ فرض شده و طرح اختلاط جهت عملیات اجرایی در محل احداث سازه و با توجه به شرایط موجود، قابل ارائه خواهد بود. نوع میلگرد مصرفی در بتن ریزی های قسمت های مختلف سازه (فونداسیون، دیوار ها، سقف و ستون ها)، با توجه به مقاومت مورد نیاز و همچنین ایجاد گیرایی مناسب بین مصالح فولادی و بتنی و عملکرد همزمان، از نوع AIII آجدار و با حداقل حد جاری شدن ۴۰۰۰ تا ۴۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع فرض شده و در مدل منظور گردیده است [۷ و ۴].

خاک محل ساختگاه از نوع II در نظر گرفته شده است. ظرفیت باربری خاک برابر ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و وزن مخصوص خاک موجود در محل نیز برابر ۲ تن بر متر مکعب فرض شده است. سطح آب زیر زمینی در محل احداث سازه مخزن، با توجه فرضیات منطقه، پایین تر از تراز کف در نظر گرفته شده و در نتیجه بار گذاری های جانبی استاتیکی و دینامیکی آب ناشی از زمین لرزه در پیرامون دیوار های سازه تعریف نشده است [۸].

محل اجرای پروژه در شهری با خطر پذیری نسبی زلزله زیاد انتخاب شده است که مقادیر نیروی زلزله و بارهای دینامیکی آب و خاک وارد بر سازه قابل محاسبه می باشند. در محاسبه ضریب زلزله، محل ساختگاه، پهنه با خطر نسبی زلزله زیاد و حداکثر شتاب زلزله برابر $0.3g$ و با توجه به اینکه سازه مورد نظر مربوط به تاسیسات آبرسانی است، سازه با اهمیت خیلی زیاد و ضریب اهمیت ۱٫۴ در نظر گرفته شده است. ضریب رفتار برابر ۳ نیز بر اساس شکل پذیری و قابلیت استهلاک انرژی پایین این سازه ها، به منظور اعمال بار های جانبی زمین لرزه بر سازه بتنی مخزن و فشار های دینامیکی آب و خاک لحاظ شده است [۹]. طبق ضوابط آیین نامه جهت اعمال شرایط ترک خوردگی المان ها و اثرات کاهش مقاومت و سطح مقطع هر یک، ضریب ترک خوردگی موثر در ممان اینرسی اعضا را برای ستون ها ۰/۷۰ حول محور های y و z لحاظ شده است. همچنین اثرات کاهش سختی ناشی از ترک خوردگی، در دیوار ها با ضریب کاهش ۰/۷۰، در سقف با ضریب کاهش ۰/۲۵ و در نواحی صلب انتهایی اعضا در اتصالات، صلبیت این ناحیه برابر ۰/۵۰ فرض شده است [۳].

۳-۳- انتخاب المان های سازه مخزن بتنی

ضخامت المان های پوسته برای دیوار های پیرامونی، فونداسیون و سقف، با توجه به ابعاد هر المان و شرایط بارگذاری آن، بر اساس تجربه های پیشین در مدل سازی ها تعریف شده است. بگونه ای که برای دیوار ها با توجه به وجود تنش های بزرگ در محل اتصال به پی، بیشترین ضخامت و با کاهش تنش و حرکت به سمت سقف مخزن، مقادیر ضخامت به تدریج کاهش یافته است. در پی نیز که این دیوار ها به آن متصل هستند ضخامت بیشتری جهت تامین گیرداری مناسب و باربری در پای دیوار ها تعریف گردیده که با حرکت به سمت مرکز مخزن این مقادیر با توجه به کاهش مقادیر تنش، کاهش یافته است. در تعریف این المان ها، جهت محور های محلی مطابق با فرضیات اولیه طراحی و چگونگی بارگذاری سازه، تعریف شده است.

ابعاد مقاطع المان های قاب ستون ها، بر اساس مقادیر بار های اعمالی تابع اندازه دهانه ها، ارتفاع سازه و شرایط بارگذاری و همچنین تجربه های پیشین مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به شرایط بارگذاری، سهولت قالب بندی و آرماتوربندی و ضخامت سقف، به صورت اولیه در مدل ها منظور شده است. در تعریف این المان ها، جهت محور های محلی مطابق با فرضیات اولیه طراحی تعریف و ترک خوردگی مقاطع ستون، در مدل ها بر اساس آیین نامه منظور شده و همچنین در محل اتصالات اثر کاهش صلبیت مقاطع تعریف شده است. ابعاد اولیه ستون ها با استفاده از تجربه های مدل سازی پیشین و با توجه به طول دهانه، ارتفاع سازه و مقادیر بارهای اعمالی برابر ۴۰ در ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. تعداد آرماتورها نیز به صورت اولیه در هر ستون برابر ۸ عدد فرض شده است. میزان سطح مقطع میلگرد مصرفی برابر ۰،۰۰۴ الی ۰،۰۰۴ سانتی متر مربع با بتن پوشش ۵ سانتی متر مشخص شده است [۴، ۹ و ۱۰].

۳-۴- بارگذاری مخزن بتنی

با توجه به اینکه سازه مورد نظر به صورت نیمه مدفون در خاک و تحت فشار استاتیکی و دینامیکی آب ذخیره شده می باشد، لذا جهت تعریف انواع بار های وارده ضوابط و معیار های آیین نامه اعمال شده اند. به منظور نیروهای جانبی زلزله به سازه مخزن میزان ضریب زلزله C برابر با ۰,۳۵ مورد استفاده قرار گرفته است و پس از آنالیز اولیه و پایین بودن زمان تناوب محاسبه شده، صحت فرض ضریب بازتاب برابر با ۲,۵ انتخاب شده است. به منظور انجام آنالیز مودال و تعیین صحیح زمان تناوب مخزن در مدل و همچنین بارگذاری زمین لرزه ای سازه مخزن با استفاده از مفهوم ضریب زلزله، نیاز به تعریف جرم موثر در زمین لرزه برای سازه می باشد، لذا با توجه به مفاهیم تحلیل لرزه ای، این جرم برابر مجموع بار مرده به همراه ۰/۲ بار زنده در مدل تعریف شده است [۳ و ۸].

خلاصه بار های وارده به سازه طی محاسبات انجام شده برای مجموع بار مرده اعمالی برابر با ۰,۷۲ تن بر متر مربع، بار برف طبق ضوابط مربوطه برابر با ۰,۱۵۰ تن بر متر مربع می باشد. وزن المان های پوسته و قاب ها موجود در مدل با اعمال ضرایب ۱ در تعریف بارها به صورت خود افزایشی در بار مرده منظور شده است. با توجه به نیمه مدفون بودن سازه در خاک در تماس با جداره های پوسته مخزن بتنی می بایست اثرات فشار جانبی خاک را بر روی المان های دیوارها اعمال نمود لذا ضریب فشار جانبی خاک در یک متر عرض دیوار برابر ۲,۵۷ تن بر متر مربع محاسبه شده است [۴ و ۷].

تغییرات فشار خاک در هنگام زلزله، برای اعمال فشار جانبی خاک در حالت دینامیکی را می توان از رابطه سید و ویتمان بر اساس ضوابط و معیار های طرح و محاسبه مخازن آب زمینی استفاده نمود و فشار دینامیکی حاصل را به المان های پوسته دیواره های جانبی مدفون در خاک اعمال نمود لذا این متغیر از ۱,۵۷ تن بر متر مربع در ارتفاع ۳ متری تا کف مخزن متغیر می باشد. فشار جانبی و قائم مایعات با استفاده از تئوری مکانیک سیالات طبق رابطه $P = \gamma y$ محاسبه می شود که در آن P فشار جانبی یا قائم مایع، γ وزن مخصوص مایع و y عمق تراز مورد نظر از سطح آزاد مایع می باشد. با توجه به کاربری این سازه و وجود ۴,۷ متر آب در داخل مخزن می بایست اثرات فشار جانبی آب را به المان های پوسته دیوار های بتنی پیرامونی وارد نمود، همچنین فشار قائم ناشی از وزن آب بر روی کف مخزن نیز گسترده وارد می شود. وزن مخصوص آب برابر ۱ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است و میزان P برابر با ۴,۷۰ تن بر متر مربع خواهد بود [۲۱]. در بارگذاری مخازن، جدار سازه از نوع سخت فرض می شود، لذا مطابق تئوری هازنر، مدل دینامیکی مایعات با ویسکوزیته ای در حدود آب که درون مخزنی با جدار سخت قرار دارند، مدلی با دو درجه آزادی است. یک درجه آزادی مربوط به جرمی شامل وزن آن قسمت از مایع است که همراه مخزن نوسان می کند و جرم سخت (W_1) نامیده می شود و یک درجه آزادی شامل وزن آن قسمت از مایع درون مخزن می باشد که به طور مستقل، با زمان تناوبی به مراتب بزرگتر از زمان تناوب قسمت سخت و سازه نوسان می کند و جرم موج (W_2) نامیده می شود [۹]. با توجه به تغییرات فشار آب در هنگام زلزله، برای اعمال این فشار جانبی در حالت دینامیکی می توان از روابط موجود در ضوابط و معیار های طرح و محاسبه مخزن آب زیر زمینی استفاده نمود و فشار دینامیکی حاصل را به المان های پوسته دیوار های جانبی اعمال نمود. این میزان در راستار X برای دومیزان Q_1 برابر با ۱,۵۵ تن بر متر مربع در سقف و ۳,۹۷ تن بر متر مربع در کف می باشد و همچنین در راستار Y برای دومیزان Q_1 برابر با ۱,۷۱ تن بر متر مربع در سقف و ۴,۱۳ تن بر متر مربع در کف می باشد. به منظور اعمال نیرو های ناشی از تغییر درجه حرارت بر روی المان های پوسته، تغییر درجه حرارتی برابر ۲۰ درجه سانتیگراد بر روی این اعضا با توجه قرار گرفتن این سازه در زمین و خاکریز روی سقف اعمال شده است.

۳-۵- نرم افزار و مدل سازی مخزن بتنی

به دلیل استفاده از المان های پوسته و نیاز به شبکه بندی و تحلیل قسمت های مختلف این سازه، به منظور مدل سازی مخزن از نرم افزار المان محدود SAP2000 با قابلیت انجام تحلیل های خطی المان های پوسته متصل به المان های قاب، استفاده شده است [۱۷]. سازه مخزن

با توجه به درزهای انبساط موجود به شش قسمت تقسیم گردیده که به منظور طراحی قسمت های مختلف این سازه، سه مدل طبق ضوابط [۱۳] در برنامه فوق الذکر ساخته و بررسی گردیده است. برای اعضای دیوار مخزن، ضخامت المان پوسته با توجه به طول و ارتفاع دیوار و شرایط بارگذاری آن، در محل اتصال به پی تا ۸۰ سانتیمتر و با حرکت به سمت بالا و سقف به تدریج کاهش یافته و در محل اتصال به سقف حداقل ۳۵ سانتی متر فرض شده است. ضخامت دیوارهای برشی حداقل ۳۵ سانتی متر و ضخامت پی نیز با توجه به تجربه های پیشین و لنگر و برش انتقال یافته از طرف دیوارها، در محل اتصال به دیوار حداکثر ۸۰ سانتی متر فرض شده که با حرکت به سمت مرکز مخزن این مقدار به تدریج کاهش یافته و پس از ۷ متر حداقل ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. ضخامت سقف نیز با توجه به تجربه های پیشین و لنگر و برش انتقال یافته از طرف دیوارها و همچنین ضخامت خاک سربار، حداقل ۲۵ سانتیمتر در مدل تعریف شده است. پس از اتمام هندسه و بارگذاری، هر یک از مدل های فوق تحلیل استاتیکی خطی قرار گرفته و با توجه به نتایج حاصل، المان های پوسته به صورت دستی و المان های قاب توسط برنامه طراحی شده است.

۳-۶- نتایج تحلیل مخزن بتنی

پس از انجام تحلیل، نتایج تحلیل استاتیکی خطی تمامی حالات بارگذاری مدل ها، برای طراحی دستی سازه بتنی بر اساس مقادیر نیروها و لنگر ها حاصل از آنالیز مدل ها مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور طراحی سازه بتنی مخزن متشکل از المان های پوسته، نتایج تحلیل سازه برای انواع بار های وارد بر آن، در قالب ترکیبات بار مشخص و پاسخ های لنگر خمشی و نیرو های کششی وارد بر پوسته های دیوار، فونداسیون و سقف مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از مقادیر لنگر کشش ضمن تعیین و طراحی ضخامت اعضای سازه جهت مقاومت در برابر نیروی برشی وارده و همچنین بهینه کردن مقادیر میلگرد مورد نیاز برای مقاومت در برابر لنگر و کشش، آرما تور های مورد نیاز در اعضا به همراه مقادیر اضافی در نقاط تمرکز تنش محاسبه شده است. به منظور کنترل تنش های زیر پی جهت جلوگیری از ایجاد کشش در خاک و همچنین بیشتر شدن تنش های زیر پی نسبت به تنش مجاز خاک، میزان تغییر مکان قائم پی تحت ترکیبات بارگذاری فونداسیون کنترل گردیده و با توجه به نتایج حاصل از آنالیز مدل، بلندشدگی در پی رخ نداده و خاک زیر پی تحت کشش قرار نگرفته است.

۳-۷- راستی آزمایی نرم افزار تحلیل مخزن بتنی

در جهت راستی آزمایی آنالیز نرم افزار یک پوسته فلزی مستطیلی انتخاب گردید و یکبار به صورت المان پوسته ای نازک و بار دیگر به صورت المان پوسته ای ضخیم به کمک نرم افزار مدل سازی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. مدل سازی اولیه مطابق جدول شماره (۳-۱) بر اساس یک المان ۸ گره ای با ۱۲ عضو با ضخامت ۰,۰۰۱ متر می باشد که تکیه گاه های آن در راستای X و Y گیردار و در راستای Z دارای پیچش صفحه ای و در راستای X و Y داری خمش می باشند. نتایج بدست آمده از نرم افزار و محاسبات دستی طبق جدول (۳-۲) نشان داده شده است [۱۲].

جدول (۳-۲): محاسبات تنش و لنگر					جدول (۳-۱): مختصات گره های المان				
تخطی	محاسبات دستی	نرم افزار مدل سازی	واحد	پارام تر	مختصات گره ها (m)				
					شماره گره	x	y	z	
بدون ضخامت	٪۰	۱۳۳۳	۱۳۳۳	Pa	σ_{xx}	۱	۰	۰	۰
	٪۰	۱۳۳۳	۱۳۳۳	Pa	σ_{yy}	۲	۰	۰,۱۲	۰
با ضخامت	٪۰	۴۰۰	۴۰۰	Pa	σ_{xy}	۳	۰	۰,۰۲	۰,۰۴
	٪۰	1.11E-07	1.11E-07	Nm / m	M_{xx}	۴	۰	۰,۰۸	۰,۰۸
با ضخامت	٪۰	1.11E-07	1.11E-07	Nm / m	M_{yy}	۵	۰	۰,۰۳	۰,۱۸
	٪۰	3.33E-07	3.33E-07	Nm / m	M_{xy}	۶	۰	۰,۰۸	۰,۱۶
						۷	۰	۰	۰,۲۴
						۸	۰	۰,۱۲	۰,۲۴

۴. الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات یک تکنیک بهینه‌سازی بر پایه قوانین احتمال می‌باشد که ایده اولیه آن توسط راسل ابرهارت، دانشمند علوم کامپیوتر و جیمز کندی، روان‌شناس مسائل اجتماعی در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۱۶]. این الگوریتم از رفتار اجتماعی پرندگان در حین جستجوی غذا برای هدایت مجموعه پرندگان به منطقه امید بخش در فضای جستجو استفاده می‌کند. الگوریتم اجتماع ذرات ذاتاً یک الگوریتم بهینه‌سازی پیوسته است و نسخه باینری این الگوریتم برای بهینه‌سازی مسائل گسسته به کار می‌رود [۲۰]. همان‌طور که گفته شد این الگوریتم از رفتار جمعی پرندگان در یافتن غذا الگوبرداری می‌شود. به این ترتیب که مجموعه ای متشکل از یک سری ذرات تشکیل می‌شود که هر ذره معرف یک پرنده در فضای جستجو می‌باشد. این الگوریتم با بهنگام کردن موقعیت ذرات با توجه به میزان شایستگی آنها مجموعه را به سمت جواب بهینه هدایت می‌کند.

این روش همانند روش الگوریتم وراثتی از یک جمعیت استفاده می‌کند که فضای مساله را به دنبال نقطه بهینه جستجو می‌کند. بنابراین برای هر ذره اندازه سرعت و جهت آن با ذره دیگر متفاوت خواهد بود. به هنگام جابجایی سرعت به دست آمده در یک اینرسی ضرب شده و سپس با مکان فعلی ذره جمع می‌شود.

$$\vec{v}_i(t) = \phi \vec{v}_i(t-1) + r_1 c_1 (\vec{x}_{pbest} - \vec{x}_i(t-1)) + r_2 c_2 (\vec{x}_{Gbest} - \vec{x}_i(t-1)) \quad (۱-۴)$$

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (۲-۴)$$

که در آن ϕ ضریب اینرسی، c_1 و c_2 عوامل یادگیری فردی و اجتماعی می‌باشند. مقادیر c_1 و c_2 مقدار عددی ثابت بین ۱/۵ تا ۲/۵ را به خود می‌گیرند r_1 و r_2 از بازه (۰،۱) بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند تا پایداری سیستم را متضمن شوند t شمارنده تکرار و $\vec{x}_i(t)$ ، $\vec{v}_i(t)$ به ترتیب بردارهای سرعت و مکان برای i امین ذره می‌باشند. \vec{x}_{pbest} مبین بردار مکان بهترین موقعیت در تاریخچه ذره i امین تاکنون می‌باشد. \vec{x}_{Gbest} بهترین موقعیت در بین کل ذرات تا کنون است که از همه به جواب نزدیکتر بوده است [۲۱]. از آنجایی که هیچ فرایندی جهت کنترل سرعت ذرات وجود نداشت، لازم شده است که یک مقدار حداکثر v_{max} برای آن در نظر گرفته شود که اگر سرعت از این حد

فراتر رود ، باید برابر با V_{max} قرار گیرد. مقدار این پارامتر برای فرایند بهینه سازی تعیین کننده است، زیرا ممکن است به ازای مقادیر بالای V_{max} ، ذرات از روی راه حل های خوب عبور نمایند و یا اینکه با مقادیر کم آن ، از اکتشاف مناسب در فضای جستجو جلوگیری شود.

۵. انطباق الگوریتم اجتماع ذرات با مخازن بتنی

بهینه سازی در سازه به مفهوم دستیابی به المان های سازه ای با حداقل وزن و عملکرد بهینه در برابر بار های استاتیکی و دینامیکی با کمترین میزان آسیب پذیری و حداکثر ایمنی می باشد [۲۰]. در مخزن بتنی در ابتدا بر اساس تجارب قبلی محدوده ای برای ضخامت المان های سازه ای با توجه به ابعاد مخزن و همچنین ارتفاع ۵/۱ متری آن در مدل انتخاب گردیده است. نقش اینرسی وزنی φ در رابطه (۴-۱) به عنوان شاخصی موثر بر رفتار همگرایی PSO مطرح گردیده است. اینرسی وزنی، جهت کنترل تاثیر سوابق سرعت های پیشین بر سرعت های جاری، مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین قابلیت اجتماع ذرات را در اکتشاف مناطق بهینه فراگیر و محلی، و استخراج جواب بهینه تنظیم می نماید. مقادیر زیاد پارامتر φ به اکتشاف مناطق بهینه فراگیر (جستجوی نواحی جدید) کمک می کند و این در حالی است که مقادیر کم این پارامتر به اکتشاف مناطق بهینه محلی و استخراج جواب بهینه، کمک می نماید. در ابتدا، مقدار اینرسی وزنی ثابت در نظر گرفته شده اما نتایج تجربی نشان داد که بهتر است در ابتدا، جهت بهبود اکتشاف فراگیر در فضای جستجو ، مقدار زیادتری برای اینرسی وزنی در نظر گرفته شود و بتدریج جهت بهبود در استخراج راه حل بهینه، از مقدار آن کاسته شود بنابراین می توان برای تعیین اینرسی وزنی از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\varphi = \varphi_{max} - \frac{(\varphi_{max} - \varphi_{min}) \times n}{iTer_{max}} \quad (۵-۱)$$

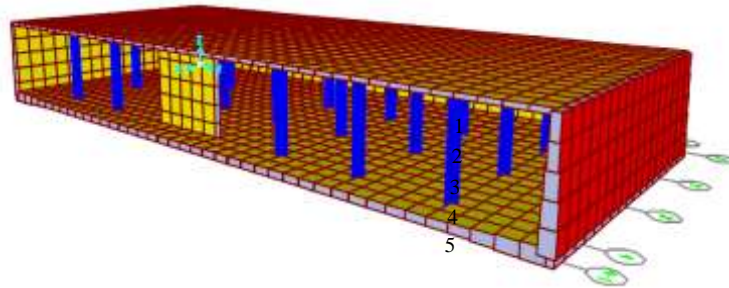
که در آن φ_{max} میزان اولیه اینرسی وزنی، φ_{min} میزان نهایی اینرسی وزنی، $iTer_{max}$ حداکثر تعداد تکرارها و n شماره تکرار جاری می باشد. اضافه نمودن جمله جریمه به برازندگی (اگر هدف یافتن مینیمم باشد این جمله به مقدار برازندگی اضافه می شود و در حالت یافتن ماکزیمم این جمله از برازندگی کم می شود). هدف این روش این است که مقدار بهینه ای که خارج از فضای ممکن یافت می شود، از مقدار بهینه در فضای ممکن بهتر نباشد. همانگونه که در فلوجارت (۵-۲) مشاهده می شود نحوه شروع مرحله برنامه کد نویسی شده در محیط نرم افزار مطلب به نمایش در آمده است تا توسط رابطه دو الگوریتم و فایل محاسباتی سازه مخزن بتنی میزان بهینه پوسته مخزن در حالت های مورد بررسی اخذ گردد.

فلوجارت (۵-۲): بهینه سازی مخزن بتنی توسط الگوریتم های PSO و PARIS



بر طبق برنامه نگارش ده بر اساس فلوجارت (۵-۲) المان های پوسته مخزن بتنی با ابعاد ۱۰۰ سانتی متری شبکه بندی شده و بر طبق آنالیز های صورت پذیرفته محدوده ضخامت پوسته مخزن از ۳۵ الی ۸۰ سانتی متر، فونداسیون از ۳۵ الی ۸۰ سانتی متر و سقف از ۲۵ الی ۳۵ سانتی متر متغییر در نظر گرفته شده اند. همانگونه که در شکل (۵-۳) مشاهده می شود یک مخزن دارای ۴ جهت دیوار پیرامونی می باشد که

با توجه به نسبت تنش ماکزیمم وارد شده به هر یک از المان های انتخابی، جداره گوشه در سمت مثبت راستای Y, X و Z برای انجام محاسبات انتخاب گردیده و هر یک از ۵ المان انتخابی بر اساس تیپ بندی جدار های پوسته مخزن در طول پوسته محیطی مخزن به صورت نوار های پیرامونی گسترده می شوند.



شکل (۳-۵): مدل سازی و جانمایی المان های مخزن بتنی

در ابتدا با توجه به حدود فضای مسئله برای حداقل سازی میزان وزن سازه و کنترل پایداری تحت بار های استاتیکی و دینامیکی محدوده ای از جزئیات المان ها بر اساس ارتباط (PARIS (Parameter Identification System) بین نرم افزار مدل سازی و کد الگوریتم اجتماع ذرات ایجاد گردید تا بر اساس هر تکرار در ابتدا محدوده انتخابی ضخامت به حداقل برسد و همچنین میزان آرمانتور مصرفی در واحد طول برای محاسبه نوع میلگرد مصرفی بهینه یابی گردند. پس از دستیابی به المان های بهینه از دو غلاف پیرامونی در المان های پوسته شماره ۲ و ۴ (شکل (۳-۵) استفاده گردید تأثیر این مورد بر رفتار سازه در مرحله مدل سازی و بهینه سازی پس از آن مورد ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه این رابطه دوطرفه بین آنالیز و کد الگوریتم در جهت انجام بهینه سازی در سه بخش کاهش وزن سازه، دستیابی به حداقل ضخامت جداره مخزن تحت بار گذاری انجام شده و کمینه نمودن میزان میلگرد مصرفی در واحد طول صورت پذیرفته است.

۱-۵- تابع هدف الگوریتم اجتماع ذرات

تابع هدف مورد استفاده در جهت حداقل نمودن وزن سازه به صورت رابطه (۴-۵) بوده که $f_{d_i}^W$ تابع حداقل سازی وزن مخزن بر اساس تغییر ضخامت المان i ام، F_y مقاومت مشخصه فولاد، f'_c مقاومت مشخصه فشاری بتن، M_{u_i} لنگر خمشی مقاومت نهایی المان i ام، ϕ و λ ضریب جزیی ایمنی، γ وزن مخصوص مصالح، b_w پهناى جان، d_i ضخامت المان i ام، V_{u_i} مقاومت برشی نهایی المان i ام، h_i ضخامت کل المان i ام، α و β ضرایب طراحی، l طول مخزن و b عرض مخزن می باشند. با توجه به حداقل سازی پارامتر های دخیل در بهینه سازی مخزن با توجه به آنالیز انجام شده دامنه ای از میزان لنگر خمشی و نیروی برش نهایی کسب و با توجه به قیود مطرح شده در هر یک از المان ها تابع مربوطه با توجه به ضوابط طراحی حداقل شده است تا میزان بهینه ضخامت پوسته مخزن به همراه میلگرد مصرفی بر اساس ضوابط طراحی محاسبه می شوند [۳ و ۴].

$$f_{d_i}^W = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \frac{F_y}{.85 f'_c} \frac{M_{u_i}}{\phi b_w d_i^2}}{F_y}}}{\frac{F_y}{.85 f'_c}} - ab d_i \gamma_1 (l + b) \right) + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\beta \gamma_2 h_i V_{u_i} (l + b)}{.17 \lambda d_i \sqrt{f'_c}} \right) \quad (۴-۵)$$

با توجه به حضور متغیرهای متفاوت طبق رابطه (۵-۳) در جهت امکان حل مسئله طبق فرضیات مطرح شده مقادیر M_{u_i} ، V_{u_i} و d_i المان i ام مطابق شکل (۵-۳) به عنوان دامنه و قیود مسئله در جهت حداقل سازی وزن سازه در نظر گرفته شده است. با توجه به حل مسئله توسط الگوریتم اجتماع ذرات بخشی از پارامترهای مورد استفاده در نرم افزار مطلب عبارتند از: تعداد متغیرها برابر ۲، دامنه بهینه همگرایی تعداد تکرارها ۸۰، میزان ضریب جاذب همگرایی بین اعضا برابر ۱،۵، دامنه اولیه انتخاب اعضا (۱، ۰، ۲۵)، میزان ضریب همگرایی در جامعه ۲ فرض شده اند [۱۹، ۱۵، ۱۶].

۵-۲- مقاطع بهینه انتخاب شده

با حل تابع هدف بر اساس قیود مطرح شده می توان ضخامت بهینه پوسته مخزن بتنی با استفاده از روش های الگوریتم اجتماع ذرات طبق جدول (۵-۵) بر اساس مقایسه ضخامت جداره پوسته بتنی برای چهار حالت که عبارتند از: حالت طراحی متداول، حالت طراحی بهینه سازی شده بر اساس اعداد تئوری، حالت طراحی بهینه سازی بر اساس اعداد اجرایی و حالت طراحی بهینه سازی شده توسط غلاف تقویتی پیرامونی مشاهده نمود. در جدول (۵-۶) میزان میلگرد مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش در جهت دستیابی به بهترین محدوده بوده که شامل چهار مرحله می باشد که عبارتند از: حالت طراحی متداول با حداکثر میزان میلگرد مصرفی، بهینه سازی میزان میلگرد مصرفی بر اساس نتایج تئوری، بهینه سازی میلگرد مصرفی بر اساس اعدادی با امکان اجرایی و بهینه سازی این مشخصه توسط غلاف تقویتی مورد استفاده به نمایش در آمده است. در محاسبه سازه به روش اجرایی، دقت نظر بر اساس حل تئوری بوده ولی اعداد مربوطه با توجه به امکان اجرایی بودن و حداقل نمودن دور ریز مصالح انتخاب شده است.

جدول (۵-۵): ضخامت مقاطع جداره پوسته بتنی مخزن



جدول (۵-۶): میزان میلگرد مصرفی در جداره پوسته مخزن بتنی



۳-۵- وزن بهینه و درصد کاهش مصالح مصرفی

عملکرد الگوریتم اجتماع ذرات در بهینه سازی مخزن بتنی ۱۰۰۰۰ متر مکعبی از لحاظ وزن بهینه سازه، درصد کاهش وزن سازه، درصد کاهش میلگرد مصرفی و حداقل صرفه جویی اقتصادی بر مبنای ریز آیتم های فهرست بهاء نظام فنی و اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی کشور بر اساس مقایسه سه پارامتر که عبارتند از مخزن بتنی با طراحی متداول، بهینه سازی پوسته مخزن بتنی در دو حالت تئوری و اجرایی و همچنین بهینه سازی پوسته مخزن توسط غلاف تقویتی پیرامونی در جدول (۵-۷) آورده شده است.

جدول (۵-۷): مقایسه حجم بتن، وزن کل میلگرد مصرفی و هزینه اجرایی

ردیف	نوع مخزن بتنی	حجم بتن مصرفی		میلگرد مصرفی (Ton)		هزینه اجرایی	
		متر مکعب	درصد کاهش	طولی	کل	میلیارد ریال	درصد کاهش
۱	سازه اولیه	۶۳۹,۸۴	%۰	۱۰۷,۶۵	۲۰۴,۵۴	۱۳,۰۰	%۰
۲	سازه تئوری	۴۹۳,۳۰	%۲۳	۸۵,۸۰	۱۶۳,۰۲	۱۱,۱۴	%۲۰
۳	بهینه اجرایی	۵۱۶,۰۰	%۱۹	۸۹,۹۹	۱۷۰,۹۸	۱۱,۴۸	%۱۶
۴	با غلاف تقویتی ضخامت پوسته	۵۰۹,۸۱	%۲۰	۸۶,۷۸	۱۶۴,۸۸	۱۱,۳۱	%۱۳

۶. نتیجه گیری

مخازن بتنی مستطیلی نگهدارنده سیالات بر اساس میزان دبی ورودی دارای حجم های متفاوتی می باشند این در حالی است که شکل کلی سازه ثابت بوده و تحت تاثیر مکانیک خاک منطقه، زمین ساختگاه و بارهای استاتیکی و دینامیکی وارده دارای ویژگی های مختص به خود می باشند. طبق بررسی صورت گرفته بر اساس مدل سازه ای انجام شده و ارتباط با کد الگوریتم اجتماع ذرات در بستر الگوریتم PARIS می توان مخازن بتنی را در هم در بخش ضخامت جداره پیرامونی و هم از طریق استفاده از غلاف تقویتی پیرامونی بهینه سازی نمود. در این تحقیق با بهینه سازی یک مخزن بتنی ۱۰۰۰۰ مترمکعبی توسط غلاف تقویتی پیرامونی و یا فقط بهینه سازی اعضاء سازه با فرضیات مطرح

شده و دارای ویژگی های متداول در شبکه توزیع آب شرب در کشور باعث کاهش ۲۰٪ وزن میلگرد مصرفی، ۲۳٪ میزان وزن بتنی مصرفی و حداقل صرفه جویی ۱۴٪ اجرایی بر اساس آیتم های فهرست بهاء در سازه شده است. نویسندگان این پژوهش بر این اعتقاد می باشند که با حل پارامتریک کلیه فرضیات مطرح شده برای کلیه مخازن بتنی دارای احجام متفاوت و در دامنه شرایط طراحی، می توان به کمک الگوریتم ذرات کلیه المان های پوسته، سقف و فونداسیون مخزن بتنی را بهینه سازی نمود که در مقالات آتی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مراجع

1. Manning, George Philip, and William Samuel. Gray. Reinforced Concrete Reservoirs and Tanks. London: Cement and Concrete Association, 1972. Print.
2. Anchor, R. D. Design of Liquid Retaining Concrete Structures. New York: McGraw-Hill, 1992. Print.
3. Seismic Design of Liquid-Containing. Concrete Structures (ACI 350.3-01), 2001. Print.
4. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08), 2008.
5. Sanayei, M., Santini Bell, E., and Rao, N., "Model Updating of UCF Benchmark Model Using PARIS," International Modal Analysis Conference, IMAC XXV, Orlando, Florida, February 19-22, 2007.
6. M.R. Ghasemi and B. Dizangian, "Size, Shape and Topology Optimization of Composite Steel Box Girders Using PSO Method" Asian Journal of Civil Engineering, VOL. XI, NO. 6 (2010).
7. Iranian National Codes of Design and Construction of Concrete (INC 9th), 2009. Print.
8. Iranian National Codes of loads on buildings (INC 6th), 2006. Print.
9. Design Criteria and Calculation of Water Reservoirs (No. 123). Iranian Management Plan and Budget Publication, 1995. Print.
10. General Specifications of Underground Water Reservoirs (No. 124). Iranian Management Plan and Budget Publication, 1996. Print.
11. R.H. MacNeal, R.L. Harder, A proposed standard set of problems to test finite element accuracy, Finite Elem. Anal. Des. 1 (1985) 3-20.
12. Timoshenko, S., S. Woinowsky-Krieger, and S. Woinowsky-. Krieger. Theory of Plates and Shells. Second. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1959. Print.
13. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. London: BSI, 2006. Print.
14. Sanayei, M., Wadia-Fascetti, S., Arya, B.G, and Santini, E.G, "Significance of Modeling Error in Structural Parameter Estimation," Special issue of the International Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering devoted to Health Monitoring of Structures, Vol. 16, pp. 12-27, January 2001, pp. 12-27
15. Kennedy J, Eberhart R, Shi Y. Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.
16. Venkayya VB. Design of Optimum Structures. *Computers and Structures*, (1971) 265-309.
17. Sap2000 Analysis User's Manual, Volume VII: Shells, Version 15, 2011.
18. Christensen PW, Klarbring A. An Introduction to Structural Optimization, Solid Mechanics and its Applications Series, Volume 153, Springer Science, 2009.
19. Clerc, Maurice. Particle Swarm Optimization. London: ISTE, 2006. Print.
20. Olsson, Andrea E. Particle Swarm Optimization: Theory, Techniques and Applications. New York: Nova Science, 2010. Print.
21. Anchor, R. D. Design of Liquid Retaining Concrete Structures. New York: McGraw-Hill, 1992. Print.