



اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدررفت آب

1st National Conference on Water Loss & Consumption Management

۲۸ و ۲۹ آذرماه ۱۳۹۶



دانشگاه شهید بهشتی



انجمن بین‌المللی آب و فاضلاب

مدیریت مصرف انرژی در بهره برداری از ایستگاه های پمپاژ شبکه های آبرسانی - مطالعه ی موردی شهر رضوانشهر گیلان

علیرضا آقاچان پور

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

Alireza.aghajanpour@gmail.com

حامد منصف

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

Hamed.monsef@gmail.com

خلاصه

مساله بحران مصرف انرژی پیش رو و افزایش هزینه ی حامل های انرژی در دنیا و به خصوص ایران مساله مدیریت مصرف انرژی در بهره برداری از شبکه های آبرسانی و توزیع آب، توجه متخصصان حوزه ی آب را به خود جلب نموده است. بخش اعظم انرژی در شبکه های آب در سیستم های افزایش فشار و پمپاژ مصرف می گردد که هزینه های سنگینی را برای شرکت های آب و فاضلاب به دنبال دارد. از همین رو ارائه ی راهکار هایی برای مدیریت مصرف این انرژی حیاتی تر می نماید. در پژوهش پیش رو روشی برای بهره برداری از ایستگاه های پمپاژ ارائه گردید که علاوه بر صرفه جویی در هزینه ها، شرایط هیدرولیکی شبکه را نیز در نظر بگیرد. بدین منظور از یک الگوریتم ژنتیک در کنار مدل هیدرولیکی شبکه ی واقعی استفاده شده است تا برنامه ی زمانبندی مناسب برای کارکرد پمپ ها بدست آید. در نهایت عملکرد شبکه با استفاده از این برنامه با روش های معمول بهره برداری از سیستم های پمپاژ مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی: ایستگاه های پمپاژ، برنامه ی زمان بندی پمپاژ، الگوریتم ژنتیک، شبکه های آبرسانی، مدل سازی هیدرولیکی

۱. مقدمه

شبکه های آب و فاضلاب یکی از مصرف کنندگان عمده ی انرژی در بخش عمومی به حساب می آیند و با توجه به افزایش هزینه های مصرف انرژی بواسطه محدود بودن منابع و همچنین هزینه ی تولید، مدیریت مصرف انرژی سامانه های تامین آب به یکی از مسائل مهم پیش روی متخصصان این حوزه تبدیل شده است. بخش عمده ی انرژی مصرف شده در این سامانه ها در بخش سیستم های تامین فشار و ایستگاه های پمپاژ به مصرف می رسد بنابراین مدیریت مصرف انرژی در این بخش کلید حل مساله ی بیان شده خواهد بود. مهمترین پارامتر برای کاهش هزینه و انرژی مصرف شده در این سیستم های تامین فشار، تعیین زمان روشن و خاموش بودن پمپ هاست که با توجه به تعرفه ی



اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدررفت آب

1st National Conference on Water Loss & Consumption Management

۲۸ و ۲۹ آذرماه ۱۳۹۶



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

International Water Association (IWA)

متفاوت برق و مصرف متغیر آب شبکه در ساعات مختلف شبانه روز، تغییرات در میزان مصرف و هزینه ی انرژی را به دنبال دارد.

برای مدیریت مصرف انرژی می بایست ابتدا درک درستی از وضعیت شبکه موجود داشت و مهمترین اصل در شبکه های آبرسانی تامین آب مشترکان با شرایط و کیفیت استاندارد بر طبق ضوابط تعیین شده است. در این پژوهش شبکه ی آب شهر رضوانشهر گیلان انتخاب گردید و پس از مدلسازی هیدرولیکی شبکه به کمک نرم افزار واترجمز^۱ و کالیبره کردن آن از یک الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع^۲ به منظور بهینه کردن زمانبندی کارکرد پمپ ها استفاده شد. مصرف آب نیز از طریق یک الگوریتم طراحی شده بر مصرف مدل هیدرولیکی شبکه اعمال گردید که قابلیت پیش بینی آب مصرفی را در بازه ی کوتاه مدت و با گام های یک ساعته دارا بود. در نهایت نیز نتایج با روش معمول کنترل زمان روشن و خاموش بودن پمپ ها به کمک معیار سطح آب در مخازن مورد مقایسه قرار گرفت.

۲. پیشینه ی موضوع

روش های مختلفی برای بهینه سازی عملکرد پمپ ها در ایستگاه های پمپاژ در طی سال ها توسط محققین مورد استفاده قرار گرفت. در تحقیقات ابتدایی و قبل از دهه ی ۸۰ میلادی، متخصصان تنها از ویژگی های پمپ ها و منحنی های مشخصه شان و شرایط یکنواخت فیزیکی مساله برای طراحی ایستگاه های پمپاژ کمک می گرفتند، حال آنکه عواملی چون روشن و خاموش شدن پمپ ها و الگو های مصرف مشترکین بر روی کارکرد سیستم های انتقال آب بسیار تاثیر گذار هستند. لذا استفاده از مدلسازی دینامیکی شبکه برای پوشش عوامل تاثیر گذار شبکه ی آب اهمیت یافت. در سال ۱۹۹۵ ارمزی^۳ و همکاران از یک روش غیر خطی برای بهبود عملکرد سیستم های پمپاژ بهره برد که مبتنی بر یک بهینه ساز غیر خطی و یک مدل شبیه سازی شده ی هیدرولیکی برای ارضای قید های شبکه بود. برای پیدا کردن عملکرد بهینه روش های مختلفی توسط محققان استفاده شد [1]. در سال ۱۹۹۵ ماکل^۴ و همکاران در تحقیق خود از الگوریتم ژنتیک برای حداقل کردن هزینه ی مصرف انرژی ایستگاه های پمپاژ استفاده کردند [2]. در سال ۱۹۹۸ رادین^۵ به کمک الگوریتم ژنتیک از کنترل میزان آب ذخیره شده در مخازن برای کنترل بهینه ی عملکرد ایستگاه های پمپاژ بهره گرفت [3]. در سال ۲۰۰۰ ارتین^۶ و همکاران خط انتقال آب شامل ایستگاه پمپاژ و مخزن هوایی را با معادله ای درجه ۱ بیان کردند و سپس با استفاده از روش مونت کارلو ارتفاع بهینه ی آب در مخزن را بدست آوردند که سبب کاهش ۱۲٫۵ درصدی مصرف انرژی گردید [4] همچنین در سال ۲۰۰۲ رادین و مرادی از الگوریتم ژنتیک برای به حداقل رساندن هزینه ی انرژی ایستگاه پمپاژ در طی یک شبانه روز استفاده کردند [5]. در سال ۲۰۰۸ لویز^۷ و همکاران قید هایی همچون تعداد روشن و خاموش شدن پمپ ها را به الگوریتم ژنتیک اضافه

¹ WaterGems

² Fast Messy

³ Ormsbee

⁴ Mackle

⁵ Rodin

⁶ Ertin

⁷ Lopez

نموده و بهبود در نتایج را مشاهده کردند [6]. در سال ۲۰۰۹ محند^۸ و همکاران و در سال ۲۰۱۱ دنیل^۹ و همکاران با استفاده از مدل هیدرولیکی و الگوریتم ژنتیک به این نتیجه رسیدند که می توان با ذخیره ی آب در مخزن برای ساعات پرهزینه ی تعرفه ی برق، آب مورد نیاز شبکه را با فشار، سرعت و هد مناسب در اختیار داشت و با خاموش کردن پمپ ها هزینه ی انرژی را کاهش داد [7] و [8]. در سال ۲۰۱۲ آندرید^{۱۰} با استفاده از کد الگوریتم ژنتیک نوشته شده در متلب و مدل هیدرولیکی شبیه سازی شده در اپنت^{۱۱} با بهینه سازی عملکرد پمپ ها به ۳۴٪ کاهش انرژی مصرف شده ی سیستم دست یافت [9].

۳. روش پژوهش

۳-۱. شبکه ی مورد مطالعه

شبکه ی مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه ی آبرسانی و توزیع آب شرب شهر رضوانشهر از شهرهای استان گیلان انتخاب شد. ابتدا مدل هیدرولیکی شبکه با توجه به نقشه های موجود در نرم افزار واترجمز شبیه سازی شد. طول لوله های شبکه ی توزیع رضوانشهر ۴۸ کیلومتر بوده، دارای یک مخزن هوایی، یک ایستگاه پمپاژ با دو پمپ از یک مدل و همچنین یک پمپ دور متغیر است که آب را به طور مستقیم در شبکه تزریق می کند. در ادامه با توجه به دیتاها ی فشار و دبی موجود شبکه کالیبره کردن مدل برای نزدیکی نتایج به واقعیت صورت پذیرفت شکل ۱ نمایی از شبکه ی توزیع آب شهر رضوانشهر را نمایش می دهد.



شکل ۱- نمایی از شبکه ی آب شهر رضوانشهر

⁸ Muhannad

⁹ Daniel

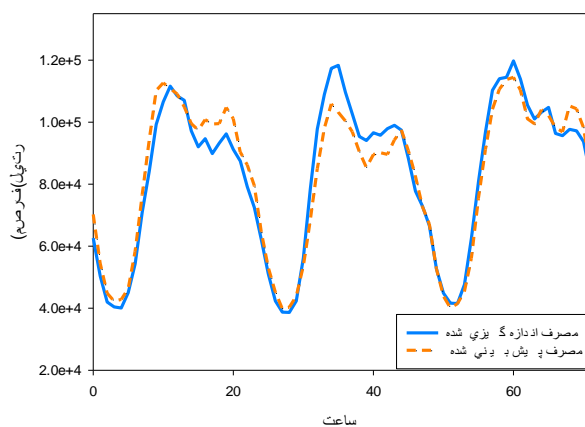
¹⁰ Andrade

¹¹ EPANET

۲-۳. داده های مورد نیاز برای ارائه ی برنامه ریزی کارکرد پمپ ها

۱-۲-۳. پیش بینی کوتاه مدت تقاضا

برنامه ارائه شده نیازمند پیش بینی تقاضای کوتاه مدت آب شبکه ی مورد نظر است که این پیش بینی برای ۲۴ ساعت آینده، با گام های پیش بینی یک ساعته صورت پذیرفته است. زیرا که نوسانات تقاضای آب موجب تغییراتی در دبی پمپ ها شده و این خود باعث تفاوت در رانندمان و همچنین انرژی مصرف شده توسط پمپ ها می شود. در شکل ۲ الگوی مصرفی اندازه گیری شده و پیش بینی شده ی شبکه در طی ۷۲ ساعت آورده شده است.



شکل ۲ - الگوی مصرفی اندازه گیری شده و پیش بینی شده ی شبکه در طی ۷۲ ساعت

۳-۳. قید های برنامه ی زمانبندی

قید حدود فشار معیاری برای کنترل تامین آب به مشتریان در حالت مطلوب و استاندارد خواهد بود. همچنین قید سرعت آب در لوله ها معیاری برای کنترل و حفاظت از خطوط لوله در برابر حوادث و نشتی ها خواهد بود. همچنین مقدار آب باقی مانده در مخزن را در پایان دوره ی برنامه ریزی معین کرد که می تواند به توالی برنامه ی زمانبندی برای دوره های آتی کمک کند ساده سازی های هوشمندانه موثر ترین راهکار برای افزایش سرعت ارائه مدل خواهد بود. در این پژوهش نیز برای پمپ دور متغیر که تعداد دورهای بسیار متفاوتی خواهد داشت، ۵ سرعت متفاوت در بازه ی ۰٫۲ تا ۱ مشخص گردید که این تغییر جزئی کمک شایانی به کوچک کردن فضای جستجوی بهینه سازی نمود.

۴-۳. ارائه ی برنامه زمانبندی

۳ روز متفاوت (۷۲ ساعت) از شبکه با الگوهای متفاوت مصرف که بر اساس پیش بینی های کوتاه مدت بدست آمد مدل شد و برای این سه روز به کمک الگوریتم ژنتیک برنامه ی کارکرد بهینه ی پمپ ها در شبکه ارائه گردید برای پمپ های ایستگاه پمپاژ وضعیت روشن و خاموش بودن پمپ ها و برای پمپ دور متغیر، دور مناسب در هر ساعت ارائه گردید. برنامه ی ارائه شده برای پمپ های ایستگاه پمپاژ در ۲۴ ساعت اول در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ - برنامه ی زمانبندی ارائه شده به کمک الگوریتم ژنتیک برای پمپ های ایستگاه پمپاژ در ۲۴ ساعت نخست

ساعت	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
پمپ ۲	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
پمپ ۳	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
ساعت	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
پمپ ۲	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱
پمپ ۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰

روش معمول دیگر مدیریت عملکرد ایستگاه های پمپاژ ، استفاده از سیستم های کنترلی مبتنی بر تراز ارتفاع سطح آب در مخازن است، این روش نیز به طور جداگانه بر مدل اعمال گردید و نتایج حاصل با روش برنامه ی زمانبندی مورد مقایسه قرار گرفت.

۴. نتایج

کارکرد دو روش در طی ۳ روز متوالی با الگو های مصرف متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای هر یک از دو روش سطح مجاز ماکزیمم و مینیمم آب در مخزن تعریف شد. طول بازه ی اختلاف دو ارتفاع برای هر دو حالت یکسان و برابر ۲،۷۵ متر خواهد بود.

۴-۱. مصرف انرژی شبکه

. برای دو روش استفاده شده، میزان هزینه ی انرژی در طول دوره ی مورد بررسی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲ - میزان هزینه ی انرژی (ریال) برای دو روش در ۳ روز مورد بررسی

	هزینه ی روز اول	هزینه ی روز دوم	هزینه ی روز سوم	مجموع هزینه ها
کنترل توسط برنامه زمانبندی	۵۶۷۵۹۴	۶۰۳۸۸۵	۶۱۵۷۸۸	۱۷۸۷۲۵۶
کنترل توسط سطح آب مخزن	۶۸۵۷۹۳	۶۹۴۳۵۶	۶۸۱۱۹۴	۲۰۶۱۳۴۹

مجموع هزینه ی پمپاژ سیستم در ۳ روز با استفاده از برنامه ی زمانبندی به جای استفاده از کنترل توسط سطح آب مخازن با کاهش ۱۳،۳٪ رو به رو شد که قابل توجه است.

۴-۲. کارکرد پمپ ها

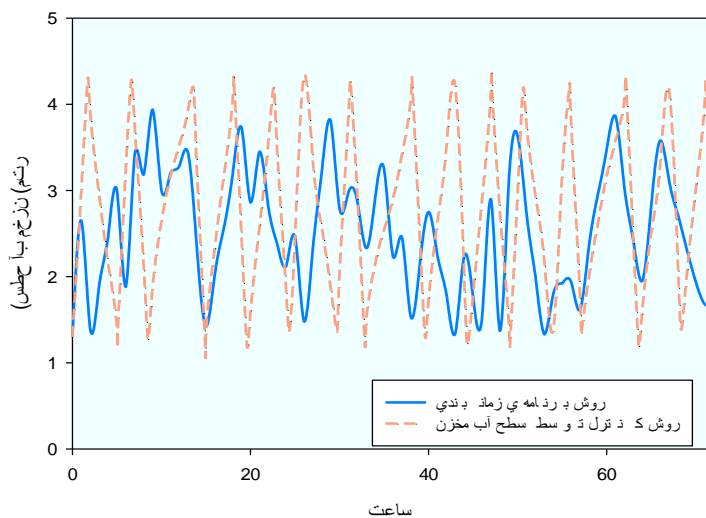
در جدول ۳ نیز ویژگی های کارکردی هر یک از پمپ ها به تفکیک آورده شده است. این ویژگی ها شامل حجم آب پمپاژ شده توسط هر یک از پمپ ها در طی ۷۲ ساعت ، مدت زمان روشن بودن پمپ ها در طی ۷۲ ساعت و تعداد سوئیچ شدن پمپ هاست در طول دوره در طی ۷۲ ساعت می باشد

جدول ۳- ویژگی های کارکردی پمپ ها ، در حالت به کار بردن هر یک از دو روش مورد استفاده

	کنترل توسط سطح آب مخزن			کنترل توسط برنامه ی زمانبندی		
	پمپ ۱	پمپ ۲	پمپ ۳	پمپ ۱	پمپ ۲	پمپ ۳
آب پمپ شده (لیتر)	۱۲۲۲۵۲۰	۴۰۳۴۶۷۴	۴۰۳۴۶۷۴	۷۳۲۷۸۳	۳۸۹۷۹۴۰	۴۵۸۹۱۷۵
ساعت کارکرد	۷۲	۴۳	۴۳	۳۹	۴۱	۴۸
تعداد سوئیچ شدن	-	۱۴	۱۴	۴	۱۲	۱۰

۳-۴. کارکرد مخزن هوایی

با اعمال هریک از روش ها، عملکرد هیدرولیکی مخزن هوایی دستخوش تغییر گردید.. در شکل ۳ سطح آب موجود در مخزن در ساعات مختلف آورده با استفاده از دو روش بیان شده نمایش داده شده است.



شکل ۳- ارتفاع سطح آب در مخزن در طی ۷۲ ساعت برای دو روش استفاده شده

نکته ی مهم در تحلیل سطح آب در مخازن، رعایت حدود تعیین شده برای ماکزیمم و مینیمم سطح آب در مخزن می باشد. در جدول ۴ نتایج رعایت این حدود بیان گردیده است.

جدول ۴- حدود مجاز سطح آب در مخزن و نتایج حاصل از مدل پس از تحلیل برای دو روش به کار گرفته شده

	حدود تعریف شده (متر)	ماکزیمم نتایج تحلیل (متر)	مینیمم نتایج تحلیل (متر)
برنامه ی زمانبندی	۱,۲۵ - ۴	۳,۹۴	۱,۳
کنترل با سطح آب مخزن	۱,۴ - ۴,۱۵	۴,۳۳	۱,۲۱

۴-۴. فشار شبکه

در دو روش بیان شده تفاوت محسوسی در بازه فشار حداکثر و حداقل گره های مصرف کننده و همچنین بازه حداکثر و حداقل سرعت آب در لوله ها مشاهده نشد که به دلیل تامین درصد زیادی از آب مورد نیاز از طریق مخزن هوایی است برای سنجش کیفیت آب، پارامتر سن آب از زمان پمپاژ در مخزن تا مصرف مورد بررسی قرار گرفت در جدول ۵ اطلاعات کلی سن آب در شبکه در طی دوره و در زمان اوج مصرف صبحگاهی آورده شده است.

جدول ۵ - اطلاعات ماکزیمم سن آب (ساعت) برای هر گره در طی ۷۲ ساعت و ماکزیمم، مینیمم و میانگین سن آب همه ی گره ها در ساعت ۱۱ صبح

	کنترل توسط سطح آب مخزن			کنترل توسط برنامه ی زمانبندی		
	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	میانگین
ماکزیمم سن آب در طی ۷۲ ساعت	۰,۹۶۱	۳۹,۰۴۰	۱۰,۳۳۲	۳,۵	۳۹,۴۴۱	۱۰,۳۲۸
سن آب در ساعت اوج مصرف صبحگاهی	۰,۳	۱۱	۶,۶۹۳	۰,۵	۱۱	۶,۲۰۱

۵. نتیجه گیری

برای زمان روشن و خاموش شدن پمپ های شبکه دو روش مورد استفاده قرار گرفت. روش کنترلی توسط سطح آب مخزن و روش ارائه ی برنامه زمانبندی برای کارکرد پمپ ها. دو روش بر روی مدل شبیه سازی شده ی شبکه اعمال گردید. نتایج حاصل از این دو روش ارائه شد. در بحث کاهش هزینه، روش برنامه ی زمانبندی باعث کاهش هزینه ی ۱۳,۳٪ نسبت به روش کنترلی گردید. همچنین در بحث میزان مصرف انرژی نیز کاهش ۱۰٪ را با کمک برنامه ی زمانبندی شاهد بودیم.

در مقوله ی کارکرد پمپ ها، با برنامه ی زمانبندی کارکرد ۱۲۸ ساعته برای مجموع پمپ ها در ۷۲ ساعت ثبت گردید که این مقدار با استفاده از روش کنترلی در مدت زمان مشابه ۱۵۸ ساعت محاسبه شد که استفاده از برنامه ی زمانبندی موجب کاهش ۱۹٪ زمان کارکرد پمپ ها گردید. تعداد سوئیچ شدن پمپ ها نیز با برنامه ی زمانبندی در ایستگاه پمپاژ ۲۲ بار در مقابل ۲۸ بار روش کنترلی ثبت شد که باز هم کاهش ۲۱٪ در تعداد سوئیچ کردن را نشان می دهد. هر دوی عوامل ذکر شده از پارامترهای مهم در ارزیابی عمر و فرسودگی پمپ ها در شبکه محسوب می شوند. نکته ی قابل ذکر دیگر، تشابه همه ی برنامه های زمانبندی بر اختصاص بار بیشتری از تامین آب شبکه ی توزیع از طریق ایستگاه پمپاژ و مخزن هوایی نسبت به پمپ دور متغیر بود، که نشان دهنده ی افزایش هزینه ی انرژی با استفاده از پمپ های بدون مخزن در شبکه است. این عامل نیز با عنوان هزینه ی پمپاژ به ازای هر متر مکعب در نتایج حاصل از کارکرد پمپ ها در جدول ... آورده شد.

در مورد وضعیت مخزن هوایی در دو روش، ابتدا میزان تخطی از مقادیر مجاز مورد بررسی قرار گرفت. در حالت استفاده از برنامه ی زمانبندی، در طول دوره ی مورد بررسی، هیچ گاه سطح آب در مخازن از محدوده های ماکزیمم و مینیمم تعیین شده خارج نشد، اما در مورد برنامه ی کنترلی، اصولاً به دلیل وجود فواصل، رعایت یک محدوده ی تعیین شده برای سطح آب مخزن امکان پذیر نبود.



اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدر رفت آب

1st National Conference on Water Loss & Consumption Management

۲۸ و ۲۹ آذرماه ۱۳۹۶



در مورد فشار نقاط در گره ها ، نتایج نشان داد که تغییرات قابل ملاحظه ای در فشار گره ها با استفاده از دو روش رخ نمی دهد . در مورد سرعت و کیفیت آب در حین استفاده از دو روش نتایج نشان داد که حداکثر سرعت در لوله ها که پارامتر مهمی در بروز حوادث است در دو روش یکسان است . میانگین سرعت آب در حالت استفاده از برنامه ی زمانبندی افزایش جزئی نسبت به روش کنترلی را نشان داد. کمیت مورد استفاده برای مقایسه ی کیفیت آب در دو روش، سن آب انتخاب شد و نتایج بدست آمده حاکی از بهبود این پارامتر (نیم ساعت بهبود) با استفاده از روش برنامه ی زمانبندی بود .

به طور کلی با کمک برنامه ی ارائه شده ی زمانبندی پمپ ها، بدون تغییر سخت افزاری و یا اضافه نمودن اجزای جدید ، و به تبع آن بدون صرف هزینه های معمول در مدیریت شبکه، بهبود هزینه و مصرف انرژی در بهره برداری از شبکه و کنترل بهتر اجزا و همچنین بهبود وضعیت کیفیت آب مورد استفاده ی مشترکین بدست آمد.

۶. مراجع

1. Ormsbee, L.E. & Reddy, S.L.(1995). Nonlinear heuristic for pump operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121 (4) pp. 302–309
2. M^aackle, G., Savic, D.A. & Walters, G.A. (1995). Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. In: *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, GALESIA '95*, vol. 414, pp.400–405. Sheffield, UK: IEE Conference Publication.
3. Rodin, S. I. (1998). “Use of genetic algorithm for optimal control of bulk water supply.
4. Ertin, E., Dean, A., Moor, M., and Priddy, K. (2004). “Dynamic optimization for optimal control of water distribution system.” *SPIE proceedings series*).
5. Rodin, S. I., and Moradi-Jalal, M. (2002). “Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations, WAPIRRA program.” (June 10,2002).
6. Lopez-Ibanez, M., Prasad, T., and Paechter, B. (2008) , Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks J. Water Res. PI-ASCE, 134, 337–346, .
7. Muhannad Alrheeh, habib Mahmoud,(2009). Using Genetic Algorithms in Pump Scheduling to Reduce the Pumping Cost, Damascus University Journal Vol. (25) - No. (2)
8. Daniel Filipe Moreira, Helena Ramos. (2011) . BRAGHIROLI; Costa and Ramos
9. Andrade-Campo.Et al,(2012),Analysis of diverse optimisation algorithms for pump scheduling in water supply systems,International Conference on Engineering Optimization EngOpt 2012 – 3rd