



## افزایش عمر توربین بخار با بهینه‌یابی زمان وصل RCP یک حلقه خاموش به سه حلقه کاری دیگر نیروگاه بوشهر

سید محسن قوامی<sup>۱\*</sup>، پیمان منعمی گوهری<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۲. دانشگاه شهید باهنر کرمان

### چکیده:

محاسبات اتصال RCP حلقه‌ای که کار نمی‌کند به سایر حلقه‌های کاری نیروگاه‌های مجهز به پمپ با مشخصه RCP-195 که در سال ۱۹۷۴ انجام گرفته است منجر به طراحی نوع دیگری از پمپ با مشخصه RCP-1391 شد که امروزه برای تمام نیروگاه‌های WWER-1000 استفاده می‌شود. وصل کردن یک حلقه در فاصله زمانی کوتاه، منجر به افزایش راکتیویته و در نتیجه افزایش قدرت نوترونی خواهد شد. از آنجایی که قدرت راکتور به هنگام وصل نباید از ده درصد قدرت نامی تجاوز نماید و رعایت حداقل قدرت مجاز، به منظور جلوگیری از کاهش عمر توربین بخار، باید از مرحله راه اندازی RCP حلقه خاموش سریع عبور شود. در این مقاله راه اندازی پمپ RCP-1391 و زمان رسیدن به دور نامی آن و همچنین محدودیت‌های جریان راه اندازی الکتروموتور بررسی و به شبیه سازی‌هایی برای بهینه‌یابی زمان راه اندازی RCP حلقه خاموش پرداخته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** RCP، سیال خنک کننده، راکتیویته، جریان راه اندازی، زمان راه اندازی

## Optimizing the connection time of the RCP related to one off loop to the other three operating loops of Bushehr power plant in order to increase the life time of the steam turbine

S.M. Ghavami<sup>\*1</sup>, P. Monami Gohari<sup>2</sup>

1. Graduate University of Advanced Technology - Kerman – Iran

2. Shahid Bahonar University of Kerman

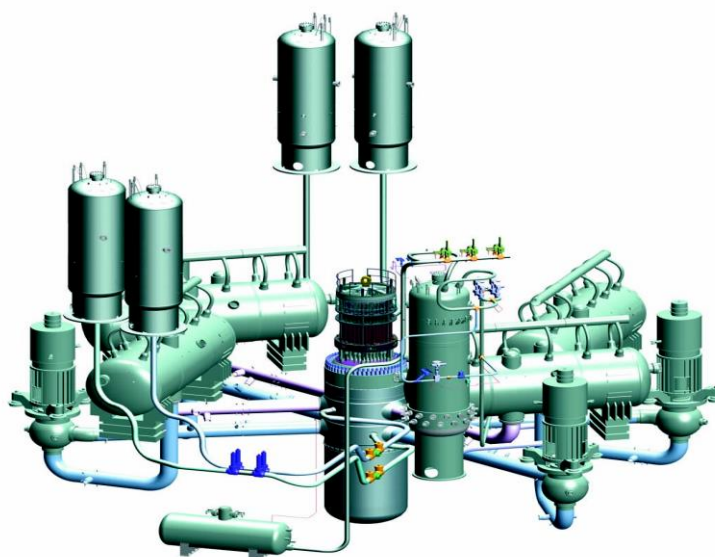
### Abstract:

Calculations regarding the connection of the off-loop RCP to other operating circuits equipped with RCP-195, which were carried out in 1974, led to the design of another type of pump with the RCP-1391 characteristic, which is now used for all WWER-1000 power plants. Connecting a loop in a short time will increase the reactivity and thus the neutron power. Since the power of the reactor at the moment of connection should not exceed ten percent of the rated power and in order to observe the minimum allowable power and prevent shortening of the life of the steam turbine, the commissioning stage of new RCP must be passed quickly. In this paper, the start-up of RCP-1391 and the time to reach its nominal speed as well as the limitations of the electromotor start-up current have been studied and simulations are performed to optimize the start-up time of the off-loop RCP.

**Keywords:** RCP, coolant, reactivity, start-up current, start-up time

## ۱. مقدمه

راکتور بوشهر نوعی راکتور حرارتی محسوب می‌شود و از نوع PWR (راکتور آب تحت فشار) است. راکتورهای PWR از جمله رایجترین راکتورهای هسته‌ای هستند که از آب معمولی هم به عنوان کندکننده نوترونها و هم به عنوان خنک‌کننده استفاده می‌کند. در یک راکتور PWR، مدار اولیه، از آب تحت فشار استفاده می‌کند و پس از عبور آب مدار اولیه از محفظه تحت فشار، این آب به دمای بالایی می‌رسد اما تحت فشار به جوش نمی‌آید. این آب داغ و تحت فشار با پمپ شدن به سمت یک مبدل حرارتی، گرما را به مدار دوم که یک نوع چرخه بخار است و از آب تغذیه معمولی استفاده می‌کند، منتقل می‌سازد. محرک پمپها الکتروموتورهایی از نوع آسنکرون می‌باشند. شکل ۱ نمایی از مدار اول این راکتور را نمایش می‌دهد



شکل ۱. مدار اول نیروگاه WWER-1000.

پمپ مدار اول، برای گردش سیال از میان قلب راکتور و خنک‌سازی مدار اول در رژیم‌های عادی، اختلال و حوادث برای نیروگاه طراحی شده است. محاسبات وصل حلقه‌ای که کار نمی‌کند به سایر حلقه‌های کاری برای نیروگاه‌ها با پمپ مشخصات RCP-195M که در سال ۱۹۷۴ انجام گرفته است منجر به طراحی نوع دیگری از پمپ RCP-1391 شده که امروزه برای تمام نیروگاه‌های WWER-1000 استفاده می‌شود. در ادامه به موضوع محدودیتهای مربوط به ورود یک RCP اشاره می‌شود و به کمک شبیه ساز نیروگاه اتمی بوشهر از نوع WWER-1000، اثر روشن کردن یک RCP در قدرت‌های مختلف در ابتدای سیکل کاری آورده شده است. در انتها، با شبیه سازی موتور پمپ به کمک نرم افزار MATLAB، خواهیم دید می‌توان با پارامترهایی از قبیل اینرسی موتور و بهینه کردن زمان تغییر اتصال ستاره به مثلث موتور، زمان رسیدن به دور نامی را بهینه کرد و همزمان مراقب جریان راه اندازی موتور نیز بود.

## ۲. اتصال RCP حلقه جدید

از خصوصیات اصلی یک RCP-1391 می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- دبی سیال ۲۲۰۰۰ متر مکعب بر ساعت
- هد پمپ ۰٫۵۸۸ مگا پاسگال
- دوسرعت بودن برای راه اندازی و متعاقبا کاهش جریان راه اندازی و افزایش عمر سیم پیچ پمپ

- زمان رسیدن به دور نامی در RCP-1391 تقریباً دو برابر RCP-195M می‌باشد.
- برای روانکاری از آب استفاده شده است.

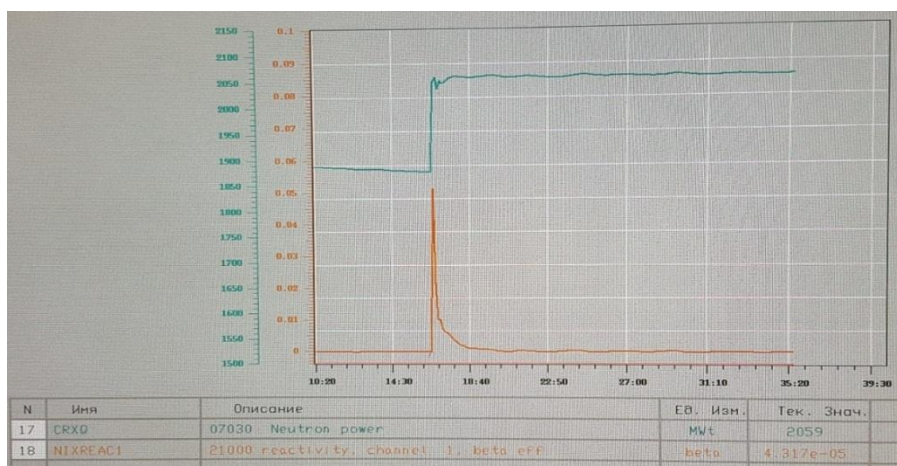
با توجه به اینکه دمای حلقه جدید پائین تر از دمای راکتور است اتصال حلقه جدید سبب می‌گردد تا دمای سیال خنک کننده در قلب راکتور کاهش یابد. با توجه به خواص نوترونی قلب راکتور، کاهش دمای سیال خنک کننده باعث آزاد شدن راکتیویته مثبت و افزایش قدرت راکتور می‌شود [1]. بنابراین وصل کردن یک حلقه در فاصله زمانی کمی منجر به افزایش راکتیویته و در نتیجه افزایش قدرت نوترونی خواهد شد. بدین ترتیب روشن کردن پمپ باید در قدرت پائین راکتور انجام گیرد. با توجه به گزارش های نیروگاه اتمی بوشهر، حداکثر مقدار مجاز افزایش ناگهانی قدرت هنگام وصل پمپ نباید از ۱۰ درصد قدرت نامی تجاوز نماید. برای دستیابی به این هدف هنگام وصل یک RCP به سه حلقه کاری دیگر، قدرت راکتور باید تا ۳۰ درصد قدرت نامی، و هنگام وصل دو RCP قدرت راکتور باید تا ۲۰ درصد قدرت نامی کاهش یابد. همچنین طبق محدودیتهای سازنده، حداقل قدرت مجاز توربین ۲۱۲ مگاوات الکتریکی می‌باشد. زمانی که برای روشن کردن دو عدد RCP قدرت راکتور رابه ۲۰ درصد قدرت نامی راکتور کاهش می‌دهیم، بار توربین به حدود ۱۴۰ الی ۱۵۰ مگاوات الکتریکی می‌رسد در صورتی که حداقل قدرت مجاز توربین ۲۱۲ مگاوات الکتریکی می‌باشد و مادارای محدودیت زمان می‌باشیم و باید از این مرحله سریع عبور کرد زیرا کار در این محدوده قدرت با توجه به کیفیت بخار باعث کاهش عمر توربین خواهد شد.

برای بررسی بهتر اثر تغییرات دمای سیال خنک کننده روی پارامترهای قلب، به کمک شبیه ساز نیروگاه اتمی بوشهر از نوع WWER-1000، اثر روشن کردن یک RCP در قدرت های مختلف در ابتدای سیکل کاری در بخش بعد، اخذ شده از گزارشهای نیروگاه اتمی بوشهر آورده شده است.

### ۳. شبیه ساز راکتور WWER-1000

۱.۳ وصل یک RCP خاموش به سه حلقه در حال کار در قدرت ۶۷ درصد

تغییر راکتیویته و توان نوترونی قلب راکتور در شکل ۲ مشاهده می‌شود. این شکل، افزایش راکتیویته و به دنبال آن افزایش توان نوترونی در نتیجه ورود سیال خنک کننده با دمای کمتر به قلب راکتور را نشان می‌دهد.

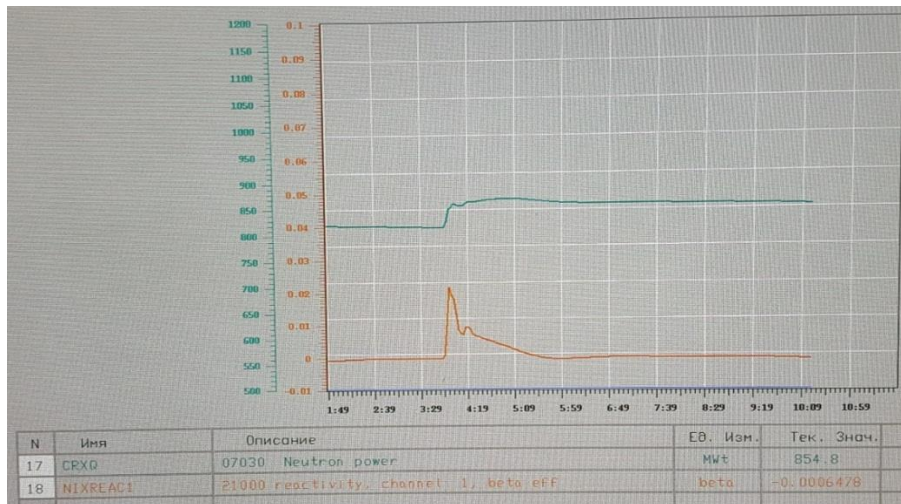


شکل ۲. راکتیویته و توان نوترونی در اثر اتصال RCP حلقه جدید در قدرت ۶۷ درصد.

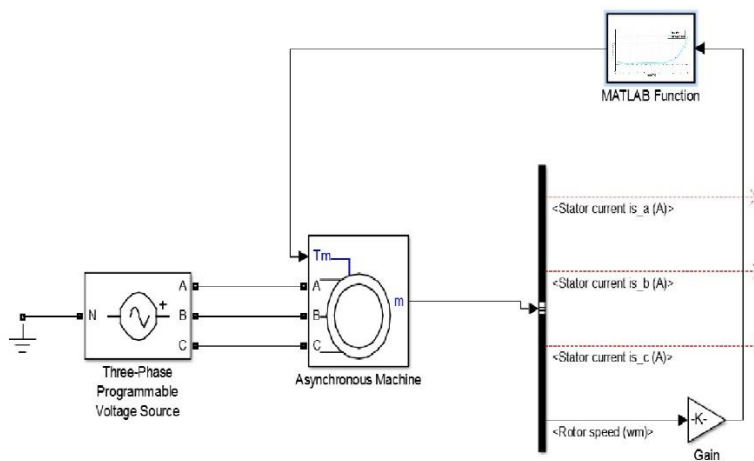
۲.۳ وصل یک RCP خاموش به سه حلقه در حال کار در قدرت ۳۰ درصد تغییر راکتیویته و توان نوترونی قلب راکتور در شکل ۳ مشاهده می شود. تغییر توان در این حالت بسیار کمتر از قبل بوده که می تواند افزایش اطمینان و پایداری راکتور را به همراه داشته باشد.

#### ۴. مطالعه عملکرد پمپ RCP-1391

در این قسمت به شبیه سازی پمپ و انجام آزمونهایی برای دستیابی به کمترین زمان رسیدن پمپ به دور نامی پرداخته شده است. همانگونه که در بخشهای قبل ملاحظه گردید، به علت نیاز ضروری کم بودن توان راکتور قبل از ورود یک RCP جدید، محدودیت زمان توقف در این توان کم را داریم و اهمیت زمان رسیدن پمپ به دور نامی مشخص می گردد. مدل شبیه سازی شده موتور پمپ در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳. راکتیویته و توان نوترونی در اثر اتصال RCP حلقه جدید در قدرت ۳۰ درصد.

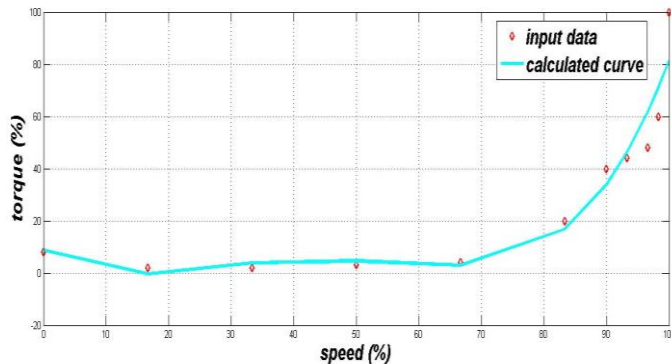


شکل ۴. مدل شبیه سازی پمپ.

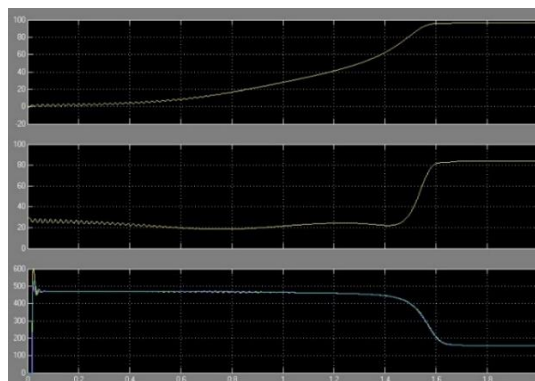
به منظور مدل‌سازی گشتاور بار پمپ، ابتدا مقادیر پیش بینی شده با استفاده از [2,3] در محیط MATLAB تعریف و سپس منحنی منطبق شده اخذ گردید. شکل ۵ بیانگر منحنی گشتاور-سرعت پمپ می باشد که در مدل شکل ۴ بایستی به موتور اعمال گردد. نحوه وصل موتور به منبع تغذیه برق به دو صورت ستاره و مثلث می باشد که از شیوه راه اندازی ستاره-مثلث برای کاهش جریان راه اندازی استفاده می شود [4,5]. در این روش، موتور ابتدا به صورت ستاره راه اندازی شده و لذا جریان کمتری اخذ می کند و پس از سپری شدن یک زمان، به حالت مثلث تغییر می یابد. نکته مهم زمان مناسب تبدیل ستاره به مثلث می باشد که در صورت کم بودن باز هم شاهد افزایش جریان لحظه شروع خواهیم بود و در صورتی که این عمل کند انجام گیرد مقدار جریانی که از داخل سیم پیچی موتور در حالت کار ستاره عبور می کند بیشتر از جریان نامی موتور بوده و باعث گرم شدن و آسیب دیدن سیم پیچی خواهد شد. شکل ۶ راه اندازی موتور در حالت سرعت کم (ستاره) و شکل ۷ در حالت مثلث را نشان می دهد. دیده می شود در حالت سرعت کم، گشتاور خروجی کافی نیست و در حالت مثلث نیز با وجود اینکه سریعتر موتور به سرعت نامی می رسد، افزایش تا ۱۱ برابری جریان ورودی وجود دارد. همچنین شکل ۸ راه اندازی در حالت ستاره به مثلث می باشد. این تغییر حالت در زمان ۱.۸ ثانیه رخ داده است. بوضوح دیده می شود که جریان کمتری از شبکه اخذ شده و زمان رسیدن به سرعت نامی نیز کمتر از حالت ستاره می باشد.

بعنوان یک تست و برای دستیابی به بهترین زمان رسیدن به سرعت نامی و رعایت محدودیت جریان سیم پیچ موتور، طی ۸ تست، نمودار جریان موتور و زمان رسیدن به سرعت نامی نسبت به زمان تغییر دور موتور ترسیم و در شکل ۹ به نمایش آمده است. طبق نمودار دستیابی به زمان بهینه وصل RCP با لحاظ نمودن جریان موتور امکان پذیر می باشد.

در تست دیگر، به پارامتر اینرسی موتور پمپ پرداخته شده و سعی می شود تا با تغییر اینرسی موتور، تغییرات سرعت گرفتن موتور پمپ بدست آید. در همه این تستها موتور از همان ابتدا با حالت مثلث راه اندازی می شود.

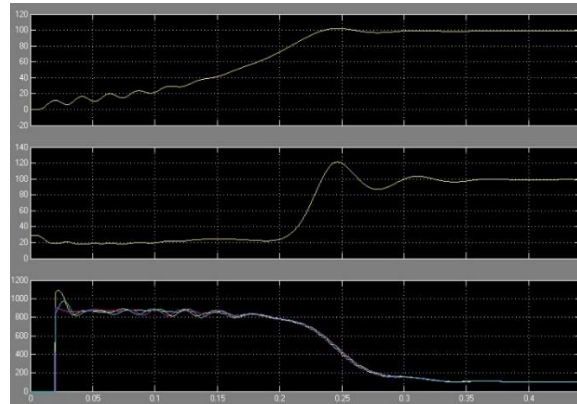


شکل ۵. منحنی گشتاور-سرعت موتور پمپ.

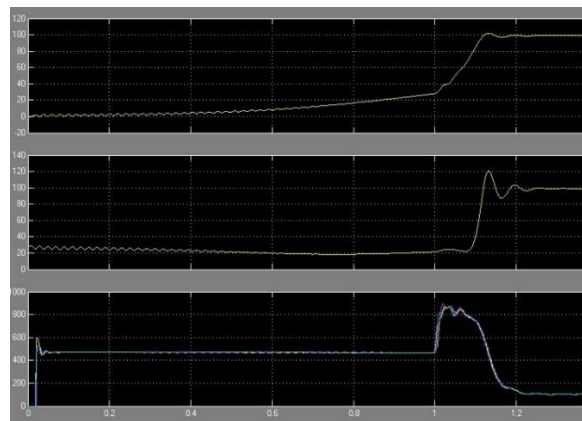


شکل ۶. راه اندازی پمپ در حالت ستاره از بالا به ترتیب سرعت-گشتاور بار و جریان برحسب درصد نامی .

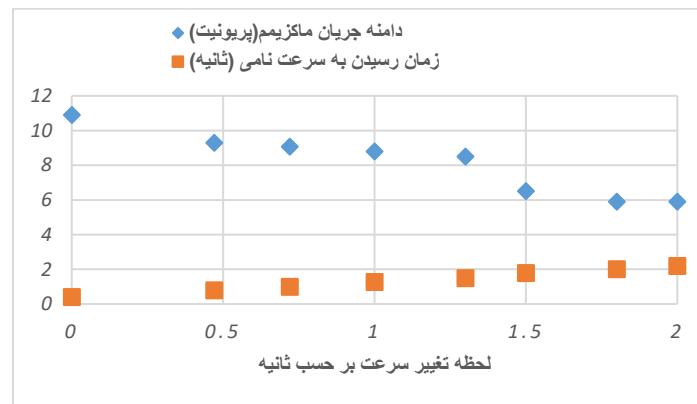




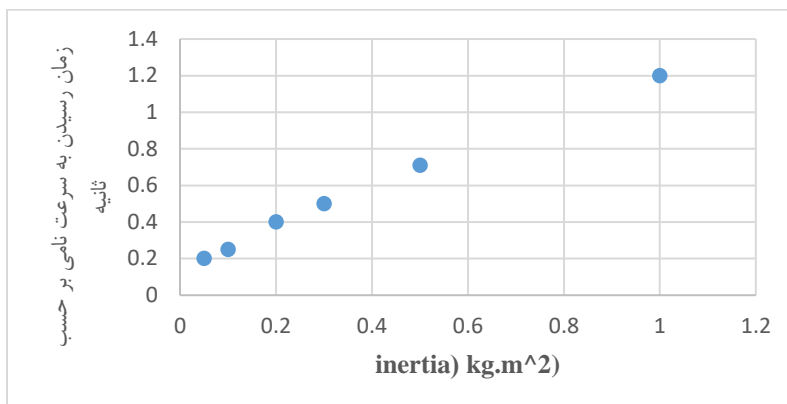
شکل ۷. راه اندازی پمپ در حالت مثلث.



شکل ۸. راه اندازی پمپ در حالت ستاره- مثلث.



شکل ۹. نمودار تغییرات زمان رسیدن به سرعت نامی و دامنه جریان ماکزیمم نسبت به لحظه تغییر دور موتور پمپ RCP.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات زمان رسیدن به سرعت نامی نسبت به تغییر اینرسی موتور پمپ RCP.

## ۵. نتیجه‌گیری

اثر روشن کردن یک RCP در قدرت های مختلف در ابتدای سیکل کاری آورده شد. دیده شد با توجه به اینکه دمای حلقه جدید پائین تر از دمای راکتور است اتصال حلقه جدید سبب می گردد تا دمای سیال خنک کننده در قلب راکتور کاهش یابد. با توجه به خواص نوترونی قلب راکتور، کاهش دمای سیال خنک کننده باعث آزاد شدن راکتیویته مثبت و افزایش قدرت راکتور می شود. از آنجایی که حداکثر مقدار مجاز افزایش ناگهانی قدرت هنگام وصل پمپ نباید از ۱۰ درصد قدرت نامی تجاوز نماید. لذا لازم می باشد تا در این هنگام، توان راکتور کاهش یابد و سپس اقدام به وصل RCP جدید نمود اما از آنجایی که طبق محدودیتهای سازنده، حداقل قدرت مجاز توربین ۲۱۲ مگاوات الکتریکی می باشد ضروری است تا عملیات راه اندازی و رسیدن به سرعت نامی موتور پمپ با زمان کمتر صورت پذیرد. لذا در این مقاله با شبیه سازی موتور پمپ به کمک نرم افزار MATLAB، دیدیم می توان با پارامترهایی از قبیل اینرسی موتور و بهینه کردن زمان تغییر اتصال ستاره به مثلث موتور، زمان رسیدن به دور نامی را بهینه کرد و همزمان مراقب جریان راه اندازی موتور نیز بود.

## مراجع

1- R.M.Pearce” The Doppler effect in thermal reactors” Journal of Nuclear Energy. Part A. Reactor Science-Volume 13, Issues 3–4, January 1961, Pages 150-175.

2- ABB,Synergy,Robotics and motion newsletter,October 2017.

۳- ماهنامه پمپ-شماره اول-شهریور ۱۳۶۳ (in persian).

۴- D. Dhawale<sup>1</sup>, Anup M Bhagat, Shubham E Baghele, Aishish Rawada, “ANALYSIS OF DIFFERENT STARTIN METHODS OF INDUCTION MOTOR” IJARIII-ISSN(O)-2395-4396-Vol-3 Issue-2 2017.

۵- L. Nagarajan, “Star Delta Starter Using Soft Switch For Low Power Three Phase Induction Motors” Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 9(21) Special 2015, Pages: 175-178.