



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

12380-NWWCE

بهینه‌سازی طراحی پمپ معکوس به منظور استفاده در شبکه‌ی آبرسانی برای تولید توان و

کاهش فشار

مجتبی طحانی^{۱*}، روشنگر فهیمی^۲، حسین یوسفی^۳، یونس نوراللهی^۴

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، گروه هوا و فضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران،

۲- دانشجوی دکتری دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران،

۳- عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران،

۴- عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران،

*m.tahani@ut.ac.ir

خلاصه

استفاده از شیرهای فشارشکن در شبکه‌های آب شهری به منظور تعدیل فشار امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. اما کاهش فشار با استفاده از این شیرها منجر به هدر رفتن انرژی آب در جریان می‌شود. یکی از راه‌حل‌ها استفاده از پمپ‌های معکوس به جای فشارشکن می‌باشد. در این حالت علاوه بر کاهش فشار آب، تولید توان نیز اتفاق خواهد افتاد. در پژوهش حاضر، ابتدا عملکرد یک پمپ در حالت مستقیم بررسی شده و روش حل عددی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس با تعیین شرایط مرزی مناسب عملکرد پمپ انتخابی در حالت معکوس (توربینی) مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با انجام تغییرات هندسی، سعی شده است عملکرد پمپ معکوس بهینه شود. نتایج نشان دادند که با پخ زدن لبه‌ی پره، بازده به اندازه‌ی ۱/۲ درصد و با انحراف پره به اندازه‌ی ۵ درجه رو به جلو بازده به اندازه‌ی ۲ درصد افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شیر فشارشکن، پمپ معکوس، تولید توان، حل عددی

۱. مقدمه

با توجه به گسترده‌ی خطوط انتقال و توزیع آب، موقعیت جغرافیایی و پستی و بلندی‌های طبیعی در مسیر، معمولاً فشار آب داخل لوله‌های انتقال آب به علت توپوگرافی منطقه به حدی بالا می‌رود که از شیرهای فشارشکن برای تعدیل و خنثی‌سازی نیروی فشار اضافی داخل خطوط، به منظور جلوگیری از ترکیدگی و شکستگی شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شود. امروزه می‌توان با استفاده از فناوری‌های روز دنیا از هدر رفتن انرژی مازاد، جلوگیری و از آن برای تولید انرژی الکتریکی بهره‌برداری نمود. از جمله‌ی این فناوری‌ها افزودن سیستم فشارشکن نرم با قابلیت تولید توان در ایستگاه‌های تقلیل فشار است. سامانه‌های انتقال آب شهری موجود، موقعیت و فرصت منحصر به فردی را به منظور استحصال انرژی تجدیدپذیر موجود در جریان آب، فراهم می‌نمایند. این فرصت تولید انرژی هم دارای مزایای اقتصادی و هم دارای مزایای زیست‌محیطی بسیار است. نیروگاه‌های برق‌آبی با توجه به اثرات زیست-محیطی ناشی از ساخت سد و راه‌های هدایت جریان، ممکن است زیاد موردپسند نباشند. اما راه‌اندازی فشارشکن نرم با قابلیت تولید توان، درون سامانه‌های تأسیساتی موجود و در حال کار، منجر به تولید الکتریسیته بدون اثرات زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های آبی می‌شود.

یکی از موارد تاثیرگذار بر روی عملکرد این نوع از سیستم‌های تولید توان، نوع مبدل مکانیکی آن می‌باشد. انواع توربین‌های آبی از جمله توربین‌های پلتون، تورگو، کاپلان، فرانسیس، پمپ معکوس و غیره می‌توانند بسته به دبی و هد جریان مورد استفاده قرار بگیرند. پرکاربردترین مبدل مکانیکی مورد استفاده برای تولید توان و هم‌چنین کاهش فشار در شبکه‌های آبرسانی پمپ معکوس می‌باشد. در زمینه‌ی شبیه‌سازی عددی و هم‌چنین



شرکت مهندسی آب و فاضلاب ایران



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



طراحی پمپ معکوس کارهای متفاوتی انجام شده است، زیرا جریان سیال زمانی که پمپ در نقطه خارج طراحی کار می‌کند، بنا به دلایلی همچون انحنای پره، دوران پروانه، اندرکنش بین روتور و استاتور، اثرات توربولانس و هدایت جریان، بسیار پیچیده می‌شود. از جمله این کارها می‌توان به مطالعات عددی گولچ و فاوره [۱] بر روی پروانه‌های مختلف با سرعت مخصوص ۱۲ تا ۱۶۰ اشاره کرد. در مطالعه‌ی حاضر نتایج خروجی با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفتند و بررسی نشان داد که با استفاده از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ هد پمپ با انحراف استاندارد ۲/۵ درصد تخمین زده می‌شود. کلدر و همکارانش [۲] جریان مغشوش با عدد رینولدز $10^6 \times 1/76$ را درون یک حلزونی با سرعت مخصوص پایین به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که در شرایط نزدیک به نقطه طراحی جریان اصلی به صورت یک جریان پتانسیل عمل می‌کند، لذا آنها از معادلات سیال غیر لزج برای حل میدان استفاده کردند. فنک و همکارانش [۳] از مدل‌های مختلف توربولانس جهت شبیه‌سازی جریان مغشوش در یک پمپ با دیفیوزر شعاعی استفاده کردند. آنها داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج تجربی به دست آمده از سرعت‌سنجی داپلر (LDV) و سرعت-سنجی تصویری ذرات (PIV) مقایسه کردند. آنها گزارش دادند که تغییر مدل توربولانسی تأثیر زیادی بر روی نتایج میدان فشار نگذاشته و در میان تمامی مدل‌های توربولانس مدل $k - \omega$ در پیش‌بینی راستای بردار سرعت و سطح انرژی توربولانس توانمندی بالاتری دارد. جعفرزاده و همکارانش [۴] با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی جریان با مدل $k - \epsilon$ جریان در یک پمپ با سرعت مخصوص پایین را بررسی کردند. آنها اثر تعداد پره‌ها بر بازه پمپ را مورد مطالعه قرار دادند و هم‌چنین دریافته‌اند که موقعیت زبانه نسبت به پره اثر بسیار مهمی در وقوع جدایش جریان دارد. گو و همکارانش [۵] اندرکنش بین پروانه و حلزونی در یک پمپ سانتریفیوژ مجهز به زبانه با پروفیل متغیر را با استفاده از مدل توربولانس SST و نرم افزار CFX بررسی نمودند. آنها مشاهده کردند که وقتی کشیدگی پروفیل زبانه حلزونی کاهش می‌یابد، منحنی بازده در نزدیکی نقطه طراحی تخت‌تر شده و در گستره بیشتری از جریان بازده بالا وجود خواهد داشت. علاوه بر این، این تغییر پروفیل سبب می‌شود که نقطه بهینه پمپ به سمت دبی بالاتر انتقال یابد. ژو و همکارانش [۶] با استفاده از مدل SST جریان داخل پمپ دو مکشه را تحلیل کرده و نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند. آنها گزارش دادند که مدل SST می‌تواند با دقت مناسبی عملکرد پمپ را در دبی‌های مختلف پیش‌بینی نماید. رودریگز و همکارانش [۷]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، کارکرد چند پمپ به عنوان توربین مورد بررسی قرار داده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند بر اساس آزمایشات انجام شده، بازده حالت معکوس یک پمپ در حدود همان حالت مستقیم است.

در کار پژوهشی حاضر، سعی شده است که عملکرد پمپ معکوس به منظور تولید توان بیشینه و هم‌چنین کاهش فشار شبکه آب شهری، با انجام اصلاحات هندسی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بهینه شود. برای این منظور، ابتدا روش حل برای پمپ انتخاب شده مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است و سپس با توجه به این که شرایط مرزی ورودی و خروجی پمپ مشابه هم می‌باشد، همان روش حل برای عملکرد در حالت معکوس نیز مورد استفاده قرار گرفته است. سپس با انجام اصلاحات هندسی عملکرد پمپ در حالت معکوس بهینه شده است.

۲. روش تحلیل عددی

پمپ مورد نظر برای استفاده در شبکه آب شهری، پمپ ۲۵۰-۱۰۰ می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی‌های لازم از نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. در این قسمت فرآیند حل عددی مربوط به معادلات حاکم بر پمپ ارائه می‌گردد.

اولین قدم در روش‌های حل عددی تولید هندسه‌ی مورد نظر در محیط نرم‌افزار است. برای این منظور، هندسه پمپ ۲۵۰-۱۰۰ با استفاده از داده‌های موجود در کاتالوگ ترسیم گردیده است. برای تولید هندسه دقیق پروانه، ابر نقاط از روی مدل اصلی با استفاده از روش فیوژن بدست آمده است. برای ایجاد شبکه از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. این نرم‌افزار توانایی ایجاد شبکه بی‌سازمان و سازمان‌یافته را دارد. هندسه پمپ جهت شبکه‌بندی به دو قسمت چرخ متحرک و حلزونی تفکیک شده است. به دلیل حساسیت نتایج اطراف دیواره به شبکه، جهت تولید شبکه مجاورت دیواره پره‌ها، از شبکه سازمان یافته استفاده شده است. بخش چرخ متحرک پس از تقسیم به شش قسمت به صورت تک پاساژ و کاملاً سازمان یافته شبکه‌بندی می‌شود تا علاوه بر دقت بالا در جواب، سرعت همگرایی بالایی نیز حاصل گردد.

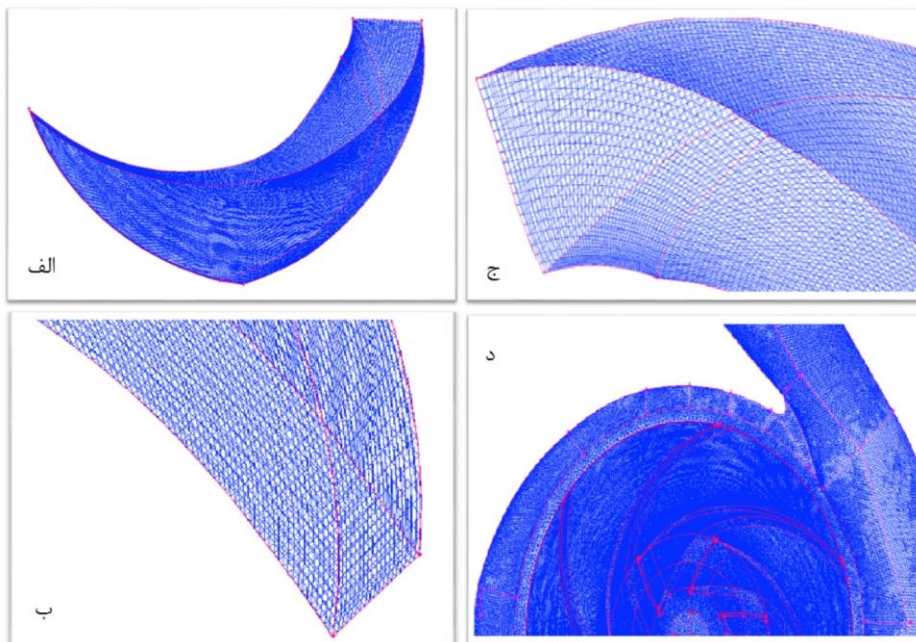
تولید شبکه مناسب اولین قدم برای دستیابی به نتایج دقیق در روش‌های تحلیل عددی است. به علت پیچیدگی از سلول‌های شش‌وجهی و چهاروجهی در نواحی مختلف استفاده گردیده است. در نزدیکی قسمت‌های مهم همچون لبه حمله و فرار پره‌های پروانه و زبانه حلزونی که امکان جدایش سیال وجود دارد، شبکه به مقدار لازم ریز شده است. در فرآیند ایجاد شبکه، تعامد، نسبت شکلی و ضریب کشیدگی مورد بررسی قرار گرفته است و از قرارگیری این مشخصه‌ها در محدوده مطلوب اطمینان حاصل شده است. جهت حصول اطمینان از دقت محاسبات در نزدیکی دیواره با توجه

به مقادیر استفاده شده در مقالات محدوده $100 < \gamma^+ < 10^4$ در نزدیک دیواره تأمین می گردد. جدول (۱) نوع و تعداد المان‌های مورد استفاده جهت شبکه- بندی قسمت‌های مختلف را نشان می دهد.

جدول ۱- نوع المان‌های بکار رفته در شبکه بندی

شش وجهی	هرمی	تعداد المان	ناحیه
۱۵۸۹۲۴۰	۰	۱۵۸۹۲۴۰	پاساز
۰	۱۸۵۷۳۷۰	۱۸۵۷۳۷۰	حلزونی
۱۵۸۹۲۴۰	۱۸۵۷۳۷۰	۳۴۴۶۶۵۰	کل

شکل (۱) المان بندی مربوط به قسمت‌های مختلف حلزونی و پروانه را نشان می دهد.

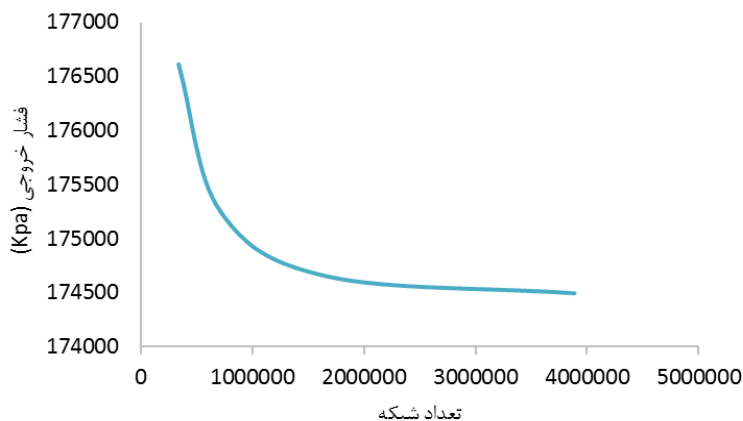


شکل ۱- (الف) شبکه سازمان یافته فضای بین دو پره، (ب) شبکه انتهای فضای بین دو پره، (ج) شبکه ابتدای فضای بین دو پره، (د) شبکه نیمه بالای سطح پروانه و حلزونی

حل مساله باید مستقل از تعداد المان‌های شبکه باشد بنابراین تاثیر این پارامتر نیز بر روی نتایج مربوط به اعتبارسنجی مورد بررسی قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی نتایج عددی، بررسی حساسیت حل به شبکه از اهمیت زیادی برخوردار است. برای این منظور دو پارامتر فشار خروجی و بازده، برای ارزیابی تعداد شبکه‌های متفاوت بر روی حل عددی در نظر گرفته شده اند. جدول (۲) تغییرات بازده و فشار خروجی را با افزایش تعداد المان‌های شبکه نشان می دهد. در شکل (۲) نیز نمودار مقادیر فشار بر حسب شبکه تولید شده آورده شده است. با توجه به جدول (۲) و شکل (۲)، شبکه با تعداد ۳۴۴۶۶۵۰ یک شبکه مناسب برای حل عددی از نظر دقت است که به همین علت در این مطالعه، از مدل سازی با این تعداد سلول استفاده شده است.

جدول ۲- حساسیت حل به تعداد شبکه

تعداد المان	راندمان هیدرولیکی (%)	فشار خروجی (pa)
۷۳۲۸۴۵	۱۷,۰۵۷۱	۱۷۶۶۱۳
۱۲۱۳۵۲۹	۱۷,۲۰۹۵	۱۷۵۲۵۳
۲۸۲۷۷۴۶	۱۷,۲۹۹۵	۱۷۴۶۵۳
۳۴۴۶۶۵۰	۱۷,۳۱۰۹	۱۷۴۴۹۶



شکل ۲- نمودار فشار خروجی بر حسب تعداد شبکه

در پژوهش حاضر جهت تطابق شرایط مرزی با شرایط واقعی آزمون‌ها و امکان مقایسه مستقیم توزیع فشار تجربی با مقادیر عددی، در حالت مستقیم فشار ورودی و در حالت معکوس فشار خروجی از روی مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده‌اند. سطح این مقادیر فشار در حین آزمون با تغییر ناچیزی روبرو بوده و در حالت مستقیم و معکوس حدود ۰/۱ bar اندازه‌گیری شده است. جدول (۳) نوع شرایط مرزی انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- شرایط مرزی پمپ و حلزونی

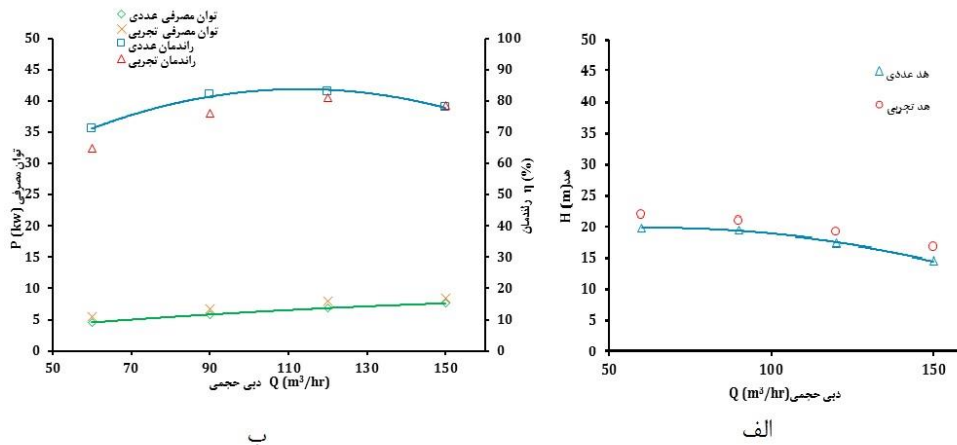
موقعیت	پمپ در کارکرد مستقیم	پمپ در کارکرد معکوس
ورودی	فشار کل ثابت	دبی جرمی ثابت و عمود بر سطح
خروجی	دبی جرمی ثابت و عمود بر سطح	فشار استاتیک ثابت
فصل مشترک بین ورودی و پروانه	فصل مشترک روتور منجمد	فصل مشترک روتور منجمد
بین پروانه و حلزونی	فصل مشترک روتور منجمد	فصل مشترک روتور منجمد
بین حلزونی و حجم جانبی عقبی	فصل مشترک عمومی	فصل مشترک عمومی
بین حلزونی و حجم جلویی پروانه	(GGI) یکپارچه	(GGI) یکپارچه
دیواره‌ها	زبری ۰/۰۰۰۱ و عدم لغزش	زبری ۰/۰۰۰۱ و عدم لغزش

با توجه به مطالعات انجام شده، بهترین مدل برای توربولانس عبارت است از $k - \omega$ و SST و در پژوهش حاضر نیز از مدل SST استفاده می‌شود.

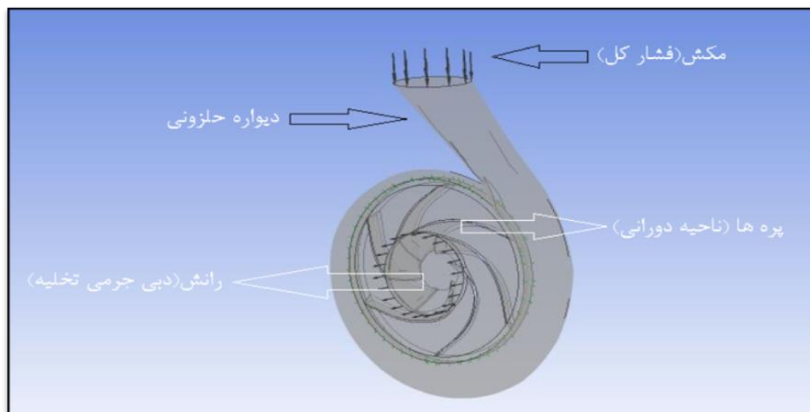
۳. نتایج و بحث

نتایج مربوط به اعتبارسنجی پمپ مورد نظر در دبی‌های مختلف در شکل (۳-الف) و (۳-ب) ارائه شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده، روش حل عددی، شبکه‌بندی و هم‌چنین مدل توربولانسی مورد انتخاب برای حل مساله مورد نظر مناسب است.

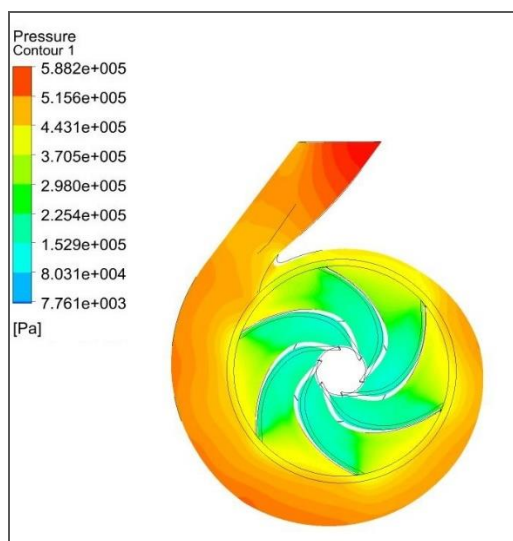
عملکرد پمپ در حالت معکوس با استفاده از نرم‌افزار Fluent مورد بررسی قرار گرفت. شرایط مرزی به کار رفته مشابه پمپ می‌باشد و محل ورودی و خروجی جریان تغییر کرده است. در شکل (۴) شرایط مرزی به کار گرفته شده نشان داده شده است. مقادیر داده شده ورودی فشار ۶۰ متر و خروجی دبی آب ۱۸۰ متر مکعب بر ساعت است و مقدار دور پروانه ۱۵۴۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. شکل (۵) مقادیر فشار در صفحه میانی پمپ معکوس در دور ۱۵۴۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. بازده پمپ معکوس در هر دو دور ۱۵۴۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، ۸۶ درصد می‌باشد، هد خروجی به ترتیب برابر ۴۰/۸ متر و ۴۸/۶۴ متر می‌باشد و توان خروجی به ترتیب برابر ۱۷/۱۴ و ۲۰/۵۴ کیلووات می‌باشد.



شکل ۳- (الف) نمودار مقادیر هد بر حسب دبی برای مقادیر عددی و تجربی، (ب) نمودار مقادیر توان و بازده بر حسب دبی برای مقادیر عددی و تجربی



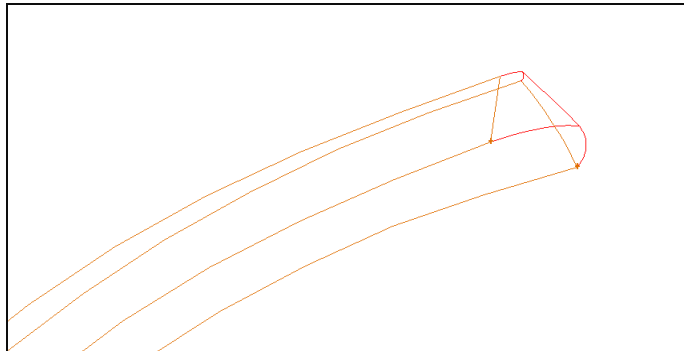
شکل ۴- شرایط مرزی در حالت توربین



شکل ۵- مقادیر فشار در صفحه میانی پمپ معکوس برای دور ۱۵۴۰

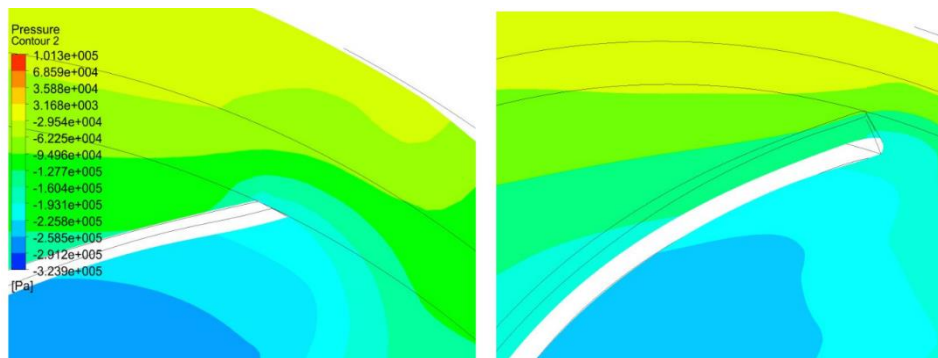
به منظور بهینه‌سازی عملکرد پمپ معکوس، دو تغییر هندسی مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از: (۱) پخ‌زنی لبه‌های ورودی پره و لبه‌های ورودی هاب و شروود و (۲) تغییر زاویه ورودی پره.

با توجه به مطالعات پیشین، در اولین مرحله به منظور افزایش بازده، لبه‌های پره پخ‌زنی شده‌اند تا میزان تاثیر آن بر روی بازده توربین مورد نظر با تحلیل عددی بررسی گردد. در شکل (۶) پره پخ زده شده که شعاع آن برابر نصف ضخامت پره است، نشان داده شده است. نتایج تحلیل عددی پره پخ زده نشان‌دهنده افزایش میزان بازده نسبت به حالت بدون پخ می‌باشد. مشاهده می‌شود که به دلیل وجود پخ بازده به اندازه‌ی ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد.



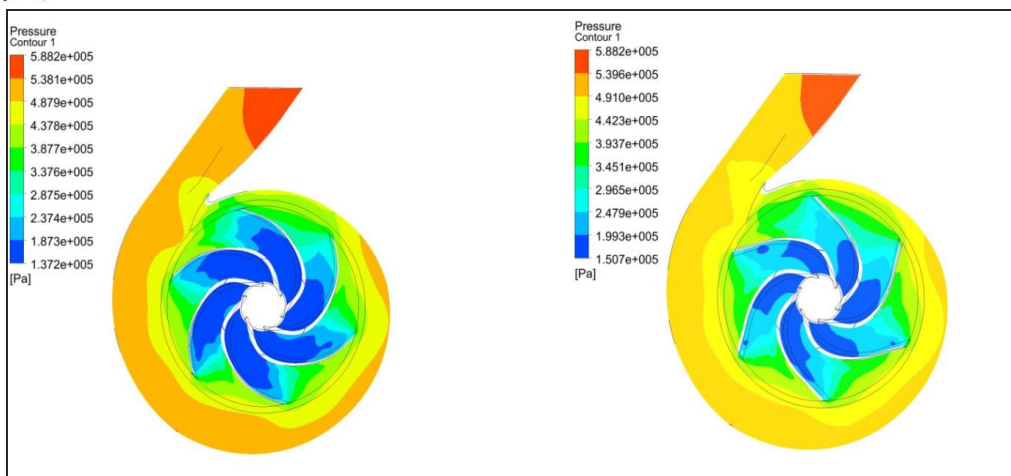
شکل ۶- اصلاح لبه‌ی پره با پخ

سطوح هم‌تراز فشار استاتیک، یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت بررسی و مقایسه علت افزایش بازده با حالت بدون تغییر هندسه پمپ معکوس است. وقتی که سیال از پمپ معکوس خارج می‌شود، به علت کاهش افت‌های هیدرولیکی، هد در مقایسه با حالت هندسه اولیه کاهش می‌یابد. لذا سطوح هم‌تراز فشار استاتیک نیز باید بیانگر این مطلب باشند. در شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقادیر فشار در اطراف پره پمپ پخ زده شده افت فشار کمتری را دارد.

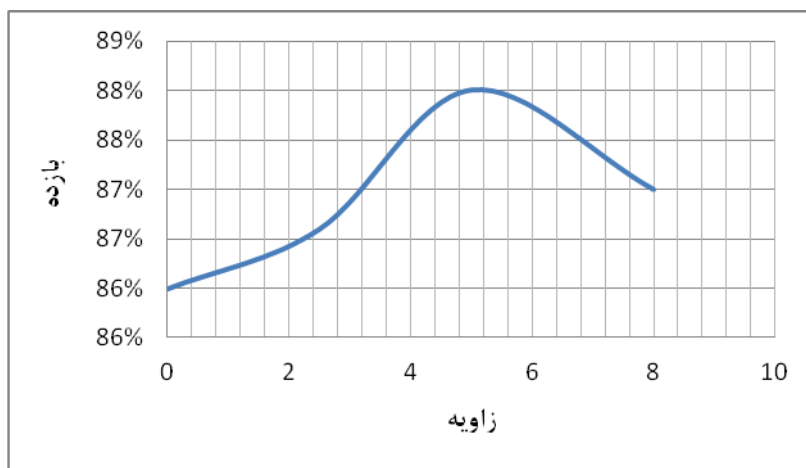


شکل ۷- مقادیر توزیع فشار اطراف پره ساده (سمت چپ) و پخ‌زده (سمت راست)

برای بررسی میزان اثر افزایش و کاهش زاویه ورودی پره توربین، زاویه ورودی به سمت جلو و عقب تغییر داده شده است. تحلیل برای زوایای مختلف زاویه رو به جلو (بازشدگی) و زاویه رو به عقب (جمع شدگی) انجام شده است. برای بررسی تغییرات، مقادیر فشار در صفحه میانی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل (۸) مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود برای زاویه رو به عقب مقادیر افت فشار در مقایسه با حالت زاویه رو به جلو افت بیشتری دارند و این نشان‌دهنده بازده کمتر برای پمپ معکوس با زاویه رو به عقب است. برای بدست آوردن مقدار بهینه این زاویه، زوایای مختلف رو به جلوی پره تحلیل گردیده است که در شکل (۹) مقادیر بازده بر حسب زاویه مشاهده می‌شود. زاویه بهینه بدست آمده برای پره، ۵ درجه می‌باشد که حدود ۲ درصد در بهبود بازده تاثیر دارد.



شکل ۸- مقادیر فشار در صفحه میانی پمپ معکوس برای زاویه پره در حالت ۲/۵ درجه به سمت جلو (شکل راست) و ۲/۵ درجه به سمت عقب (شکل چپ)



شکل ۹- مقادیر بازده بر حسب زاویه بازشدگی پره

۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، هدف بهینه سازی طراحی پمپ معکوس به منظور استفاده در شبکه آبرسانی می باشد. به دلیل توپوگرافی منطقه و هم چنین پستی و بلندی های طبیعی، در نواحی از شبکه آبرسانی فشار افزایش می یابد و باعث آسیب رسیدن به تجهیزات شبکه می گردد. بنابراین برای جلوگیری از صدمات، از شیرهای فشار شکن استفاده می شود. اما، وظیفه ی این شیرها صرفا کاهش فشار می باشد و در نتیجه منجر به تلف شدن انرژی زیادی می شوند. یکی از جای گزین های مناسب شیرهای فشار شکن، پمپ های معکوس می باشند که هم می توانند فشار شبکه را کنترل کنند و هم می توانند تولید توان کنند. بنابراین در این پژوهش، ابتدا روش حل عددی با استفاده از نتایج موجود برای پمپ مورد نظر، مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند سپس، عملکرد پمپ در حالت معکوس برای دو سرعت دورانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که در حالت سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه توان تولیدی بالاتر می باشد اما راندمان در هر دو سرعت دورانی یکسان می باشد. هم چنین به منظور بهینه سازی عملکرد پمپ معکوس، دو تغییر هندسی مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از: (۱) پخ زنی پره و (۲) تغییر زاویه ی ورودی پره. نتایج نشان دادند که درحالتی که انحراف پره ۵ درجه رو به جلو باشد، بهینه ترین حالت برای عملکرد پمپ معکوس بدست می آید.



شرکت مهندسی آب و فاضلاب ایران

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



۵. مراجع

1. Guelich, J.F., Favre, J.N., Denus, K., (1997)“ .An Assessment of Pump Impeller Performance Predictions by 3D-Navier–Stokes Calculations .”*Proceedings of ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, FEDSM* ,pp. 22-26.
2. J. Kelder, R. Dijkers, B. Esch, N. Kruyt(2001)“ .Experimental and theoretical study of the flow in the volute of a low specific-speed pump .”*Fluid Dynamics Research*, 28, pp. 267-280.
3. J. Feng, K. Benra · H. Dohmen(2010)“ Application of Different Turbulence Models in Unsteady Flow Simulations of a Radial Diffuser Pump .”*Forschung im Ingenieurwesen*, 74(3), pp 123-133.
4. B. Jafarzadeh, A. Hajiari, M.M. Alishahi, M.H. Akbari, (2011), “The Flow Simulation of a Low-Specific-Speed High-Speed Centrifugal Pump”, *Applied Mathematical Modelling*, 35, pp: 242-249.
5. P. Guo, X. Luo, J. Lu, X. Zheng(2009)“ .Numerical Investigation on Impeller-Volute Interaction in the Centrifugal Pump with Radial GAP and Tongue Profile Variation .”*In Fluids Machinery and Fluid Mechanics, Beijing, China*.
6. P. J. Zhou, F. J. Wang, M. Yang (2012), “ Internal Flow Numerical Simulation of Double-Suction Centrifugal Pump Using DES Model .”*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Beijing, China*, pp 32.-51.
7. A. Rodrigues, A.A Williams, P. Singh, F. Nestmann, E. LAI.(2003), Hydraulic Analysis of a Pump as a Turbine with CFD and Experimental Data .”*IMEchE seminar, Computational Fluid Dynamics for Fluid Machinery, London, UK, November*.
8. J. Fernández, R. Barrio, E. Blanco, J. Parrondo, A. Marcos(2009)“ .Experimental and Numerical Investigation of a Centrifugal Pump Working as a Turbine .”*ASME*, 1, pp. 471-479.