



## بررسی اثرات اقتصادی و فنی پوشش داخلی لوله‌های مسیر انتقال آب در تولید نیروی برق-آبی و اهمیت محاسبات افت هد

مرضیه ثمره هاشمی<sup>۱</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۳

مقاله پژوهشی

چکیده

با توجه به حیاتی بودن مسأله آب در مناطق خشک، همچنین توزیع غیریکنواخت منابع آبی و مراکز مصرف آن، انتقال آب از اهمیت خاصی برخوردار است. گزینه استفاده از پتانسیل انرژی برق-آبی در طرح‌های انتقال آب با مسیریابی با حرکت ثقلی می‌تواند برای اقتصادی‌تر کردن این نوع طرح‌ها مورد بررسی قرار داده شوند. هد خالص و دبی مستقیماً در پتانسیل‌های تولید این انرژی نقش دارند. در این مقاله مسأله اهمیت هد خالص با در نظر گرفتن مؤلفه‌های مؤثر در آن، شامل ابعاد لوله و کیفیت پوشش داخلی آن، مورد ارزیابی قرار داده شد. در این راستا برای طرح انتقال آب از سد صفارود جهت تأمین بخشی از آب شرب شهر کرمان که در حال اجرا می‌باشد، گزینه‌های مربوط به مؤلفه‌های انرژی و مخصوصاً نقش کمتر دیده شده پوشش داخلی، به عنوان یک معیار مهم در تصمیم‌گیری برای توجیه اقتصادی کل طرح، مورد مطالعه قرار داده شد. به این منظور استفاده از دو نوع پوشش داخلی "ملات ماسه سیمان" در حالت اجرای استاندارد و اجرای غیر استاندارد و "اپوکسی" از دیدگاه فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از پوشش اپوکسی ظرفیت تولید برق تا ۱/۲ مگاوات نسبت به حالتی که از پوشش ملات ماسه سیمان استفاده شده باشد، بالا می‌رود که در نتیجه افت هد کمتر آب است. بنابراین مسأله جدار داخلی لوله و حتی نحوه اجرای آن باید در کنار سایر معیارهای طراحی و اجرا مد نظر قرار گیرد. همچنین، باتوجه به طولانی بودن خطوط انتقال آب، دقت محاسبات افت هد می‌تواند به طور قابل توجهی توجیه اقتصادی چنین طرح‌هایی را تحت تأثیر قرار دهد.

واژه‌های کلیدی: اپوکسی، افت هد، انرژی برق-آبی، پوشش داخلی لوله، ملات ماسه سیمان

<sup>۱</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه باهنر کرمان، کرمان، ایران samare@uk.ac.ir

## مقدمه

با توجه به نقش حیاتی آب و کمبود منابع آبی در بخش‌های زیادی از ایران، طرح‌های انتقال آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. در حالت کلی، یک طرح انتقال آب می‌تواند شامل بخش‌های سد، ایستگاه پمپاژ، خط لوله، کانال، تونل، مخزن، فشارشکن و تصفیه‌خانه باشد. هرکدام از این بخش‌ها هزینه‌های خاص خود را دارند و در کنار ابعاد فنی مسئله انتقال آب، باید به ابعاد اقتصادی آن نیز توجه ویژه شود. به عبارت دیگر گرچه مسئله تأمین آب حیاتی است اما در کنار این موضوع بهینه‌کردن طرح‌های انتقال آب و توجیه اقتصادی آنها نیز باید مدنظر قرار گیرد. اما چگونه می‌توان با وجود هزینه‌های سنگین برای بخش‌های مختلف یک طرح انتقال آب به سمت توجیه اقتصادی آن رفت؟ از منظر اقتصادی در دو حالت می‌توان یک سیستم را بهینه کرد: کاهش هزینه‌ها و ایجاد یا افزایش درآمد. اما نکته‌ای که امروزه توجه طیف خاصی از محققین را به خود جلب نموده است، بهره‌وری از پتانسیل‌های برق-آبی این خطوط می‌باشد که این موضوع در کنار بحث بحران انرژی، امروزه رویکردهای جدیدی را در کنار دیگر مباحث مربوطه به وجود آورده است (Griffin, 2006). اولین نقطه مشترک بحث انرژی و انتقال سیال، مربوط به مصرف برق ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد و در مبحثی پیشرفته‌تر، بازیافت انرژی جنبشی سیال در طول خطوط انتقال آبی مطرح می‌شود. به این ترتیب که در طرح‌های انتقال آبی که حرکت ثقلی آب وجود دارد می‌توان از وجود این نیروی ثقلی در جهت تولید نیروی برق-آبی استفاده نمود. علاوه بر ایجاد درآمد توجه به این نکته نیز ضروری است که قیمت انرژی در حال افزایش است و این به دلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی است. بنابراین در آینده تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیری چون برق-آبی نیز افزایش خواهد یافت. در نقاط مختلف دنیا نیز به این مسئله توجه خاصی شده است از جمله در سال ۲۰۰۹ پتانسیل ایجاد تولید نیروگاه‌های برق-آبی مقیاس کوچک در تمام نقاط آمریکا مورد بررسی قرار گرفت. در انگلستان نیز در سال ۲۰۰۴ کنسرسیومی متشکل از چند شرکت دولتی و خصوصی دستورالعملی برای استفاده از نیروی

برق-آبی در جنوب شرقی این کشور تهیه نمودند. اسکاتلند نیز مانند انگلستان در سال ۲۰۰۸ گزارش مشابهی را منتشر کرد. همچنین مطالعات زیادی در مورد ماهیت نیروی برق-آبی، عوامل مؤثر در آن و اهمیت هر یک از آن عوامل انجام شده است که از آن جمله می‌توان به بررسی تجهیزات نیروی برق-آبی، سیاست‌گذاری، اثرات زیست‌محیطی، ابعاد فنی و تکنولوژیکی اشاره کرد که به ترتیب در مطالعات (Yang et al., 2016), Bracken et al., (2014) و (Järvikoski و Karjalainen (2010) et al., (2014) Paish (2002) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

دو فاکتور اصلی در ایجاد نیروی برق-آبی، دبی و هد خالص هستند. اگرچه دبی بستگی به منبع ذخیره آب یا همان مبدأ و میزان نیاز مقصد دارد و ایجاد تغییرات در آن نمی‌تواند مستقلاً تحت کنترل قرار گیرد، اما فاکتور بعدی (هد) را که وابسته به اختلاف ارتفاع مسیر، طول، قطر و جنس لوله (پوشش داخلی آن)، و مسیر لوله‌گذاری است می‌توان به عنوان یک متغیر منعطف طراحی مد نظر قرار داد. از مجموع عوامل یاد شده آنچه در طراحی بیشتر تحت کنترل است، افت هد ناشی از عوامل فوق می‌باشد. یکی از بخش‌های اصلی در نیروگاه‌های برق-آبی، پنستاک<sup>۱</sup> می‌باشد. عموماً این قسمت لوله‌هایی هستند که آب را از مخازنی همچون سد به توربین‌های نیروگاه هدایت می‌کند (لطف الهی یقین و کاردان، ۱۳۹۲). تحقیقات مختلفی برای طراحی این بخش شامل طراحی بهینه قطر، وزن، و مسیر آن انجام شده است که می‌توان به (Singhal and Kumar (2015) اشاره کرد. اکثر نتایج در حالی بر روی قطر لوله بحث می‌کنند که طول این مسیر مخزن تا توربین کوتاه و منحصر به لوله پنستاک می‌شود. درن‌آئینجه، برای شرایطی که نیروگاه‌های برق-آبی با فواصل بسیار طولانی و عموماً بر روی خطوط انتقال آب احداث می‌شوند، این نوع نتایج خیلی کاربردی نخواهد بود. نیروگاه‌های برق-آبی کوچک که در مسیر خطوط طولانی انتقال آب احداث می‌شوند، با محدودیت‌های بیشتری در طراحی و بهره‌برداری روبرو هستند. با توجه به

<sup>1</sup> Penstock



طول زیاد این خطوط، گزینه‌های طراحی بهینه در بخش پنستاک را نمی‌توان مد نظر قرار داد. به عنوان مثال، در برخی تحقیقات، قطر بهینه لوله پنستاک را بر مبنای تولید انرژی الکتریکی بیشتر، با صرفه معرفی می‌کنند، هرچند اگر این مساله برای سرتاسر یک خط انتقال بلند لحاظ گردد، احتمالاً افزایش هزینه‌های قطر لوله منجر به عدم اقتصادی بودن طرح خواهد شد. از طرفی به علت کوتاه بودن طول پنستاک، در مطالعات مربوطه، کمتر به اهمیت ویژه پوشش داخلی توجه شده است و قاعدتاً تغییرات قطر لوله نتایج محسوس‌تری را نشان می‌دهد.

پوشش داخلی لوله‌های آبرسانی از دیدگاه‌های مختلف از جمله اثرات بهداشتی، طول عمر مفید تأسیسات مربوطه و ابعاد مهندسی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در این راستا تحقیقات گسترده‌ای انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعات شاه‌منصوری و همکاران (۱۳۸۲)، Wang et al., (2005) روی جنبه‌های بهداشتی اشاره کرد. همچنین ابعاد مهندسی مساله از جمله اهمیت پوشش داخلی بر رژیم جریان، اثر ضخامت پوشش و شکل هندسی لوله بر تنش ایجاد شده در آن به ترتیب توسط Walker et al., (2016)، Joliff et al., (2013) و Tchoquessi Diodjo et al., (2013) مورد مطالعه قرار گرفت. اما پوشش‌های داخلی نقش مستقیمی بر روی افت هد دینامیکی حاکم بر مساله نیز دارند، به‌گونه‌ای که مقدار هد خالص سیال به‌طور مستقیم با مقدار انرژی جنبشی آن در ارتباط می‌باشد. این ابعاد مساله که امروزه با توجه به رویکرد استفاده از پتانسیل انرژی برق-آبی می‌توانند به عنوان یک معیار بسیار تعیین کننده باشد، کمتر به صورت شفاف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در کنار این مساله، با توجه به بحران انرژی در دنیا که در اثر کاهش منابع فسیلی و آلودگی محیط زیست به وجود آمده است و همچنین کاهش شدید منابع آب در مناطق کویری، توجه به انرژی‌های تجدیدپذیری همچون برق-آبی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که قوانین حمایتی برای سرمایه‌گذاران این بخش در اکثر کشورهای دنیا تصویب شده و در حال اجرا می‌باشند. به علاوه، از آنجا که ۸۰٪ مصرف آب در صنعت ایران، صرف تولید برق می‌شود، استفاده از انرژی‌های نو

در کشوری که با بحران آب نیز روبرو است، اهمیت دوچندان پیدا خواهد کرد. بنابراین در این مقاله با محوریت اقتصاد منابع آبی، و مدیریت مصرف آب بر اساس پتانسیل انرژی برق-آبی، نقش پوشش داخلی در افت هد و اثرات اقتصادی و بهره‌وری آبی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی به صورت عملیاتی در طرح کلان انتقال آب از صفارود به کرمان انجام شد. این طرح شامل احداث سد شهیدان امیرتیموری (صفارود)، حفر تونل ۳۸ کیلومتری، خط انتقال آب و همچنین تصفیه‌خانه آب شرب شهر کرمان می‌باشد. به منظور هرچه اقتصادی‌تر شدن این طرح در قسمت خط انتقال که به صورت ثقیلی آب را منتقل می‌کند واحدهای تولیدی برق-آبی نیز پیشنهاد می‌شود. در این راستا سه حالت پوشش داخلی شامل ملات ماسه سیمان با اجرای استاندارد و اجرای غیر استاندارد و پوشش اپوکسی پودری در خط انتقال صفارود به کرمان مورد مقایسه فنی و اقتصادی قرار گرفته‌اند.

در بخش دوم مقاله، معرفی و مقایسه فنی پوشش‌های مزبور ارائه می‌شود. در بخش سوم معادلات انرژی حاکم بر مساله و مقایسه استفاده از هر یک از این پوشش‌ها بر اساس معیار تولید انرژی و تشریح ابعاد اقتصادی آنها، انجام می‌گیرد. نهایتاً بخش نتیجه‌گیری به جمع‌بندی نتایج مشروح قسمت سوم می‌پردازد و نتیجه‌گیری نهایی را به اهمیت دادن به ابعاد کیفی مربوط به ضریب زبری پوشش‌های داخلی، به عنوان یکی از پارامترهای طراحی در پروژه‌های انتقال خلاصه می‌نماید.

## مواد و روش‌ها

### معرفی و مقایسه پوشش‌های ملات ماسه سیمان و اپوکسی

#### پوشش ملات ماسه سیمان<sup>۱</sup>

پوشش ملات سیمانی، یک پوشش یکپارچه داخلی لوله با سطح صاف بر پایه ملات سیمان پرتلند است. این محصول به عنوان گزینه‌ای اقتصادی و کم هزینه جهت

<sup>۱</sup> Cement lining

پوشش داخلی خطوط لوله انتقال آب مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی استفاده از آن برای محیط‌های پرتنش و خورنده و یا PH کمتر از ۶ (محیط اسیدی) مناسب نیست. همچنین مقاومت کمی نسبت به فشارهای مکانیکی و شوک‌های حرارتی دارد.

اندود سیمانی به جهت کاربرد وسیع، مدت مدیدی است که مورد توجه پوشش جدار داخلی لوله‌های فولادی انتقال آب و فاضلاب می‌باشد. این اندود به منظور جلوگیری از زنگ‌زدایی و خوردگی سطح داخل لوله‌های انتقال آب، اجرا می‌شود. اما کیفیت اجرای این پوشش بسیار اهمیت دارد و اجرای ضعیف می‌تواند ضریب زبری جدار داخلی لوله را افزایش دهد. همچنین باید توجه نمود که پوشش ملات ماسه سیمان در مدت گیرش مرطوب باقی بماند، بنابراین در محیط‌های گرم و خشک ضروری است که برای جلوگیری از خشک شدن سریع ملات، آب بر روی آن پاشیده شود. پس از خشک شدن ملات ماسه سیمانی ترک‌های جم شدگی موبین پدیدار می‌شود که پس از خیس شدن و اشباع ملات دوباره بسته می‌شوند. ترک‌های بزرگتر که موجب جدا شدن ملات از سطح لوله می‌گردد، باید تعمیر شوند. علاوه بر این طبق نشریه ۱۷۳ در لوله‌های با قطر بزرگتر از ۶۱۰ میلیمتر باید مسلح سازی با شبکه‌های سیمی یا توری سیمی انجام شود که باید هزینه‌های آن در نظر گرفته شود. اگر پوشش بر اساس استاندارد انجام شده باشد مقاومت ۷ و ۲۸ روزه آن به ترتیب ۱۸ و ۳۱ مگاپاسکال خواهد بود (سازمان برنامه و بودجه وزارت نیرو، نشریه ۱۷۳).

### پوشش اپوکسی

#### اپوکسی مایع<sup>۱</sup>

پوشش‌های اپوکسی مایع، در گروه پوشش‌های داخلی دو جزئی لوله طبقه‌بندی می‌شوند که به صورت افشانه بر روی سطح داخلی خطوط لوله آب آشامیدنی اجرا می‌شوند. اجرای این پوشش‌ها به صورت کارگاهی بر روی طیف وسیعی از اقطار لوله امکان‌پذیر است.

پوشش‌دهی لوله‌های فولادی شبکه آبرسانی طبق استانداردهای BS 6920 و AWWA C210 انجام می‌شود. پوشش داخلی اپوکسی ۱۰۰٪ جامد<sup>۲</sup> در خطوط انتقال آب، گاز، نفت و پتروشیمی باعث افزایش بازدهی جریان سیال و ظرفیت انتقال، افزایش طول عمر و کاهش آلودگی سیال، کاهش تعداد دفعات تعمیرات، کاهش هزینه های تعمیرات و نگهداری، کاهش چشمگیر پدیده خوردگی و افزایش طول عمر لوله می‌گردد. به طور کلی مزایای پوشش اپوکسی شامل رعایت الزامات بهداشتی در لوله‌های انتقال آب آشامیدنی، مقاومت بسیار خوب در مقابل سایش، میزان سختی بالا (به عنوان مثال اگر سختی شیشه را ۱۰۰ فرض کنیم، سختی این رنگ‌ها ۷۰-۵۰ است)، چسبندگی خوب به سطح، دوام خوب، زمان کوتاه خشک شدن (یک تا هشت ساعت) و مقاومت بالا در مقابل ضربه می‌باشد.

#### اپوکسی پودری<sup>۳</sup> (FBE)

این پوشش به طور ایده‌آلی الزامات و نیازمندی‌های بهداشتی، ایمنی و زیست محیطی خطوط انتقال آب آشامیدنی را تأمین می‌نماید. از ویژگی‌های این پوشش، فرمولاسیون خاص آن است که یک لایه شبکه‌ای درهم تنیده مستحکم را ما بین سطح داخلی لوله و آب آشامیدنی در سراسر خط لوله ایجاد و جریان پذیری آب را بهبود می‌بخشد. این پوشش داخلی لوله به دلیل ساختار شیمیایی و فناوری اجرای آن فاقد هر گونه آلاینده‌ی بالقوه مانند حلال‌ها و یا مواد پخت نشده می‌باشد، که سلامت آب آشامیدنی را تهدید می‌کنند. مقایسه نوعی از پوشش اپوکسی مایع و پوشش اپوکسی پودری در جدول شماره (۱) آمده است. آن‌گونه که دیده می‌شود، اپوکسی پودری می‌تواند گزینه‌ای مناسب‌تر حتی نسبت به اپوکسی مایع باشد.

در ادامه نتایج مربوط به مقایسه استفاده از این سه نوع پوشش در طرح انتقال آب از سد صفا رود به کرمان پرداخته می‌شود. این طرح از دو بخش کلی تونل و خط

<sup>۱</sup> Solvent-free liquid Epoxy lining

<sup>۲</sup> Solvent free

<sup>۳</sup> Fusion Bonded Epoxy



### نتایج: مقایسه استفاده از پوشش ملات ماسه سیمان و اپوکسی در طرح انتقال آب از سد صفارود به کرمان

در بخش قبل مزایا و معایب پوشش‌های ملات ماسه سیمان و اپوکسی به طور کلی مورد بحث قرار گرفت. در این بخش به مقایسه این دو نوع پوشش به طور خاص در طرح انتقال آب از سد صفارود به شهر کرمان پرداخته شده است از آنجایی که موضوع تولید نیروی برق-آبی در طرح مزبور مطرح است، قبل از مقایسه دو نوع پوشش، ابتدا اهمیت پوشش‌ها در تولید نیروی برق-آبی مورد بحث قرار می‌گیرد.

انتقال تشکیل شده است. قسمت خط انتقال نیز از دو بخش شامل خط انتقال از سد تا ابتدای تونل و بخش دوم از انتهای تونل تا تصفیه خانه کرمان تشکیل می‌شود. در بخش دوم خط انتقال، آب به صورت ثقلی حرکت می‌کند و از لوله‌های فولادی ST37 و ST52 با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر و با طول ۴۳/۱ کیلومتر استفاده می‌شود که اختلاف ارتفاع از ابتدا تا انتهای این بخش به ۴۴۵ متر می‌رسد.

جدول ۱- مقایسه فنی پوشش‌های داخلی اپوکسی مایع و اپوکسی پودری

مقیاس ارزیابی	پوشش مایع دوجزیبی	پوشش پودری (FBE)
ضخامت	بین ۴۰۶ تا ۶۰۰ میکرون	بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ میکرون
مقاومت در برابر خوردگی	متوسط تا خوب	عالی
چسبندگی	متوسط	عالی
(بر اساس استاندارد AWWA C213)	(حدود ۱۰ MPa)	( $\leq 21$ MPa)

خواهد بود. همان‌طور که اشاره شد اصطکاک ناشی از حرکت آب در لوله بستگی به پوشش داخلی و به عبارت دیگر ضریب زبری مربوط به آن دارد. هرچه ضریب زبری کمتر باشد، اصطکاک بین آب و جدار لوله و در نتیجه افت هد کمتر خواهد بود. ضریب زبری اهمیت زیادی دارد به طوری که افزایش ضریب زبری به اندازه ۰/۷ میلیمتر در دبی ۳ متر مکعب در ثانیه به اندازه ۲۰ درصد در کاهش توان یا تولید نیروی برق-آبی مؤثر است. از آنجا که جریان آب در بخش پنستاک‌ها نزدیک به جریان متلاطم می‌باشد، روابط توسعه داده شده هیزن-ویلیامز، و بلاسیوس برای محاسبات افت هد کاربردی نمی‌باشند (Singhal, 2015). برای انجام این محاسبات از بین فرمول‌های داری-ویسباخ<sup>۱</sup>، و مانینگ، فرمول داری-ویسباخ و

در خطوط انتقال آب دو پارامتر هد و دبی میزان تولید نیروی برق-آبی را تعیین می‌کنند. به عبارت دیگر هرچه هد و دبی بیشتر باشند نیروی برق-آبی تولید شده نیز بیشتر خواهد بود. دبی، سرعت حرکت آب در لوله را تحت تأثیر قرار می‌دهد به این ترتیب که در دبی بالاتر در یک لوله با قطر ثابت، سرعت بیشتر خواهد و هرچه سرعت بیشتر باشد، اصطکاک آب با جدار لوله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که این اصطکاک به قطر لوله، پوشش داخلی لوله و ضریب زبری آن بستگی خواهد داشت. در مورد پارامتر بعدی یعنی هد، پوشش داخلی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به این ترتیب که هد موجود در یک سیستم انتقال از دو بخش تشکیل می‌شود، یکی اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای سیستم انتقال آب و دیگری افت هد ناشی از حرکت آب به واسطه اصطکاک بین آب و جدار لوله که از هد ارتفاعی کم می‌شود. بنابراین هرچه افت هد و یا به عبارت دیگر اصطکاک ناشی از حرکت آب در لوله کمتر باشد، مقدار هد خالص برای تولید انرژی برق-آبی بیشتر

<sup>1</sup> Darcy-Weisbach

برای محاسبه زبری از فرمول کلبروک-وایت<sup>۱</sup> و دیاگرام مودی<sup>۲</sup> استفاده شده است.

$$h_{L_f} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left( \frac{k_s/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۱)  $h_{L_f}$  افت ناشی از اصطکاک داخلی لوله،  $f$  ضریب اصطکاک بدون بعد،  $L$  طول لوله،  $D$  قطر داخلی لوله،  $V$  سرعت متوسط جریان و  $g$  شتاب گرانش است و در رابطه (۲)  $k_s$  زبری متوسط داخلی لوله و  $Re$  عدد رینولدز می‌باشد.

مقایسه داده‌های فرمول کلبروک وایت و داده‌های حاصل از مدل‌های تجربی و میدانی نشان دهنده دقت مناسب این فرمول در برآورد زبری است (Yang et al., 2005). همچنین Farshad et al., (2001) در مطالعات جامعی برای اندازه‌گیری ضریب زبری جهت محاسبه افت فشار، از فرمول داریسی در محاسبه افت فشار استفاده نمودند. پس از محاسبه افت توان تولیدی با استفاده از فرمول (۳) محاسبه شد و درآمد سالانه تولید نیروی برقابی با توجه به خرید تضمینی ۳۷۰ تومان به ازای هر کیلووات توسط دولت، به دست آمد.

$$P = \rho g H Q \eta / 1000 \quad (3)$$

در فرمول (۳)  $P$  توان تولیدی KW،  $\rho$  وزن مخصوص آب بر حسب  $kg/m^3$ ،  $g$  شتاب ثقل زمین  $m/s^2$ ،  $Q$  مقدار دبی  $m^3/s$  و  $\eta$  راندمان کل ژنراتور و توربین است. جدول شماره (۲) افت هد، توان تولیدی و درآمد سالانه نیروی برق آبی در سه حالت پوشش ملات ماسه سیمان با اجرای استاندارد، پوشش ملات ماسه سیمان با اجرای غیر استاندارد و پوشش اپوکسی پودری را مورد مقایسه قرار می‌دهد.

<sup>1</sup> Colebrook-White

<sup>2</sup> Moody

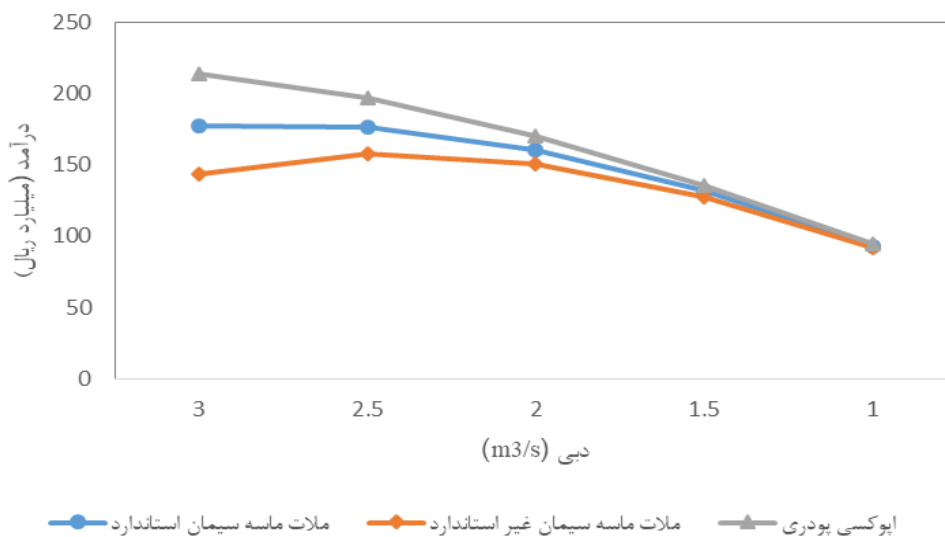


جدول ۲- مقایسه پوشش های ملات ماسه سیمان با اجرای استاندارد و غیر استاندارد و اپوکسی پودری

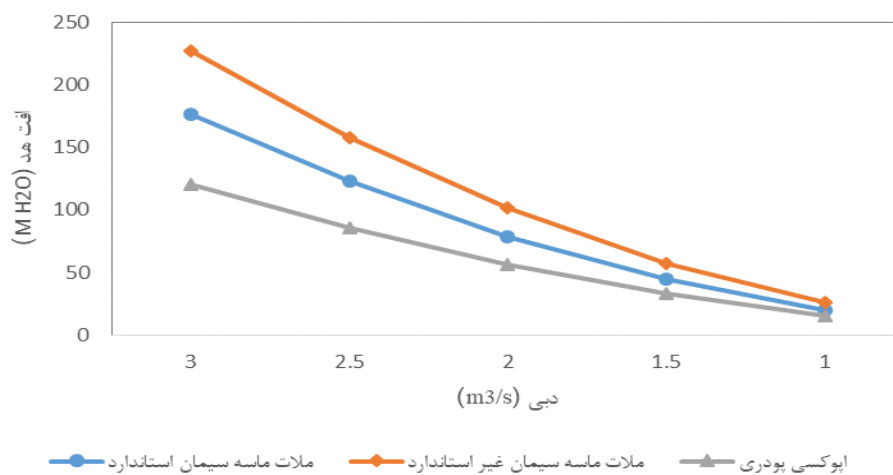
۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	دبی (m <sup>3</sup> /s) سرعت (m/s)
۰/۸۸۴	۱/۳۲۶	۱/۷۶۸	۲/۲۱	۲/۶۵۳	
<b>پوشش داخلی ملات ماسه سیمان استاندارد</b>					
۲۰/۲۳۸	۴۴/۸۰۵	۷۸/۹۷	۱۲۲/۷۳۱	۱۷۶/۰۸۷	مجموع افت (m H <sub>2</sub> O)
۴۲۴/۷۶۲	۴۰۰/۱۹۵	۳۶۶/۰۳	۳۲۲/۲۶۹	۲۶۸/۹۱۳	هد خالص (m H <sub>2</sub> O)
۲۹۱۳/۸۶۷	۴۱۱۸/۰۰۶	۵۰۲۱/۹۳۲	۵۵۲۶/۹۱۳	۵۵۳۴/۲۳	توان تولیدی (KW)
۹۳/۱۵۰۵	۱۳۱/۶۴۴۴	۱۶۰/۵۴۱۱	۱۷۶/۶۸۴	۱۷۶/۹۱۸۲	درآمد سالانه (میلیارد ریال)
<b>پوشش داخلی ملات ماسه سیمان غیر استاندارد</b>					
۲۵/۸۲۸	۵۷/۱۱۱	۱۰۱/۲۳۴	۱۵۷/۸۹۹	۲۲۷/۱۰۴	مجموع افت (m H <sub>2</sub> O)
۴۱۹/۱۷۲	۳۸۷/۸۸۹	۳۴۳/۷۶۶	۲۸۷/۱۰۱	۲۱۷/۸۹۶	هد خالص (m H <sub>2</sub> O)
۲۸۷۵/۵۲	۳۹۹۱/۳۸	۴۷۱۶/۴۷	۴۹۲۳/۷۸	۴۴۸۴/۳	توان تولیدی (KW)
۹۱/۹۲۴۶	۱۲۷/۵۹۶۳	۱۵۰/۷۷۶۱	۱۵۷/۴۰۳۵	۱۴۳/۳۵۴۱	درآمد سالانه (میلیارد ریال)
<b>پوشش داخلی اپوکسی پودری</b>					
۱۵/۶۷۲	۳۳/۱۵۱	۵۶/۵۵۶	۸۵/۷۲۸	۱۲۰/۵۶۲	مجموع افت (m H <sub>2</sub> O)
۴۲۹/۳۲۸	۴۱۱/۸۴۹	۳۸۸/۴۴۴	۳۵۹/۲۷۲	۳۲۴/۴۳۸	هد خالص (m H <sub>2</sub> O)
۲۹۴۵/۱۹۰۱	۴۲۳۷/۹۲۶	۵۳۲۹/۴۵۲	۶۱۶۱/۵۱۵	۶۶۷۶/۹۳۴	توان تولیدی (KW)
۹۴/۱۵۱۸	۱۳۵/۴۷۸۰	۱۷۰/۳۷۱۹	۱۹۶/۹۷۱۳	۲۱۳/۴۴۸۲	درآمد سالانه (میلیارد ریال)

همچنین در صورت عدم امکان عملیاتی بودن استفاده از پوشش اپوکسی در وضعیت موجود باید به این نکته صحیح و استاندارد پوشش داخلی ملات ماسه سیمان در دبی ۳ متر مکعب باعث کاهش بالغ بر ۳ میلیارد تومان درآمد سالانه حاصل از نیروی برق آبی می شود. در شکل ۲ نیز مشاهده می شود که اجرای غیر استاندارد پوشش ملات ماسه سیمان تا دو برابر باعث افزایش افت هد نسبت به پوشش اپوکسی در دبی ۳ مترمکعب بر ثانیه می شود. همچنین نکته مهم دیگر در نرخ تغییرات هد نسبت به دبی برای هر یک از شرایط مزبور می باشد. با توجه به شکل ۲، تغییر دبی از ۳ به ۲ مترمکعب باعث تغییر هد ۶۴ متر برای اپوکسی و برای ملات ماسه سیمان

دقت شود که نحوه اجرای پوشش ملات ماسه سیمان نیز بسیار اهمیت دارد. شکل ۱ نشان می دهد که عدم اجرای استاندارد و غیر استاندارد به ترتیب برابر ۹۷ و ۱۲۵ متر خواهد شد. این مساله به خوبی مشخصه یکنواختی این تغییرات را برای هر یک از پوشش های مزبور نشان می دهد. این مساله در هزینه ساخت توربین و همچنین حفظ راندمان آن بسیار مهم می باشد. هرچه نرخ تغییرات هد به دبی یکنواخت تر باشد، توربین طراحی شده راندمان بالاتر و هزینه طراحی نیز کمتر می شود. به عبارتی نقاط کارکرد توربین در ناحیه مشخص تری از تغییرات قرار خواهند گرفت

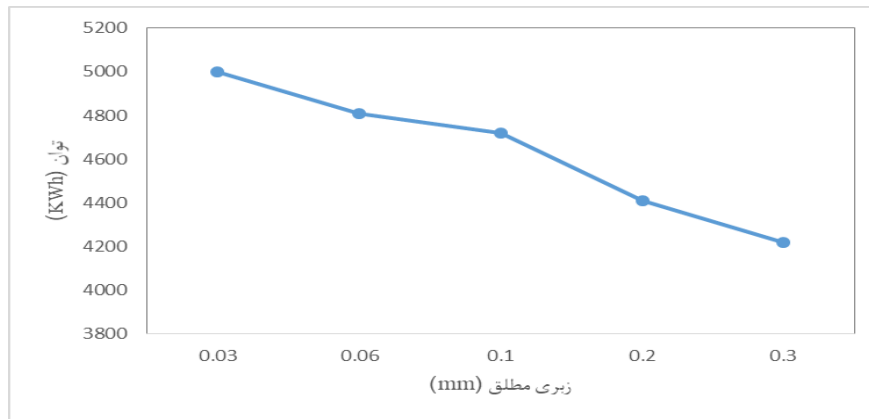


شکل ۱. مقایسه درآمد سالانه انرژی برق آبی در دبی‌های مختلف و با پوشش‌های داخلی ملات ماسه سیمان با اجرای استاندارد و غیر استاندارد و اپوکسی پودری (برای لوله انتقال با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر)



شکل ۲- مقایسه افت هد در دبی‌های مختلف و با پوشش‌های داخلی ملات ماسه سیمان با اجرای استاندارد و غیر استاندارد و اپوکسی پودری (برای لوله انتقال با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر)





شکل ۳- تغییرات ضریب زبری و توان تولیدی برای پوشش ملات ماسه سیمان (برای لوله انتقال با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر و دبی ۲ مترمکعب در ثانیه)

شایان ذکر است در قسمت جنوبی طرح یعنی آبیاری از سد تا ورودی تونل که آب به وسیله پمپاژ در لوله منتقل می‌شود نیز استفاده از پوشش اپوکسی باعث کاهش هزینه‌های پمپاژ می‌شود. به طوری که افت هد در این مسیر ۱۱ کیلومتری با قطر طراحی شده ۱۴۰۰ میلیمتر در دبی ۳ مترمکعب بر ثانیه افت هد در صورت استفاده از ملات ماسه سیمان استاندارد ۲۲ متر و در صورت استفاده از اپوکسی ۱۵/۵ متر خواهد بود. بنابراین استفاده از اپوکسی باعث کاهش حدوداً ۲۴۰ کیلو وات توان مصرفی برای پمپاژ خواهد بود. با توجه به هزینه‌های بالای انرژی، شواهد تجربی نشان داده‌اند که کاهش در هزینه‌های انرژی به واسطه استفاده از پوشش‌های اپوکسی باعث جبران هزینه سرمایه‌گذاری برای پوشش ظرف ۳ تا ۵ سال می‌شود. جهت بررسی اهمیت دقت محاسبات مربوط به افت هد، نمودار شکل ۳، تغییرات ضریب زبری و توان تولیدی را برای پوشش ملات ماسه سیمان و دبی ۲ متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. آن‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات ضریب زبری چه در اثر اشتباه محاسبات و چه در اثر تغییرات واقعی آن در طول بهره‌برداری، می‌تواند پتانسیل آبی قابل استحصال را تغییر دهد. این مساله به خصوص برای سایزینگ واحدهای نیروگاهی اهمیت پیدا می‌کند، و باتوجه به اختصاص بیش از ۵۰٪ هزینه‌ها به تجهیزات نیروگاهی، اشتباه در این مورد می‌تواند کل سرمایه‌گذاری را متاثر سازد. همچنین انتخاب نامناسب

ژنراتور می‌تواند باعث کاهش راندمان تولید نیز شود که این مساله نیز در درآمد حاصله نقش مهمی خواهد داشت.

### نتیجه‌گیری و بحث

با توجه به آنچه در این مقاله ارائه شد، مساله افت فشار در لوله‌های انتقال آب با انرژی تولیدی (برق-آبی)/مصرفی (پمپاژ) به‌طور مستقیم به یکدیگر مرتبط می‌باشند. آن‌گونه که مشاهده شد، استفاده از پوشش اپوکسی می‌تواند سالانه بیش از ۳ میلیارد تومان افزایش درآمد ایجاد نماید. همچنین باید به این نکته اشاره نمود که استفاده از ملات ماسه سیمان به شدت به کیفیت اجرای آن نیز بستگی خواهد داشت. به طوری که می‌تواند یک اجرای ضعیف، افت هد را تا دو برابر افزایش دهد. مطابق مطالعات انجام شده، این افت هد می‌تواند با یک اجرای نسبتاً ضعیف از ملات ماسه سیمان، به ۲۲۷ متر نیز برسد.

بنابراین با مطالعات انجام شده بر روی مسیر انتقال آب پروژه مزبور، قویاً توصیه می‌گردد اگر امکان تغییر قطر لوله‌ها نمی‌باشد، در انتخاب پوشش داخلی و نیز کیفیت اجرای آن توجه مضاعف گردد. به‌گونه‌ای که می‌توان گزینه‌های پیشنهادی را با توجه به وضعیت فعلی پروژه به‌صورت زیر ارائه نمود:

۱- استفاده از پوشش داخلی اپوکسی پودری (اجرا در کارخانه می‌باشد) برای تمامی خطوط جدید، قبل از حمل و نصب لوله‌ها در محل



۲- در صورت عدم امکان جابجایی لوله‌های حمل شده در مکان پروژه، استفاده از دستگاه‌های دقیق‌تر جهت اجرای پوشش داخلی "ملات ماسه سیمان" و همچنین رعایت کامل تمامی استانداردهای مربوطه به آن (دستورالعمل اجرای آن می‌بایست رسماً و با تمامی جزئیات فنی مربوط به چگونگی اجرای آن به کارفرما ارائه گردد)

دقت در کیفیت اجرای این بخش از پروژه مستقیماً بر روی ظرفیت انرژی برق-آبی تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین

منطقی خواهد بود اگر در اجرای این پروژه و یا موارد مشابه، موارد مزبور رعایت گردد. در نهایت آنچه به طور کلی می‌تواند نتیجه شود، لزوم توجه به ضریب زبری انواع پوشش‌های داخلی در این نوع پروژه‌ها می‌باشد که می‌بایست توسط مجریان و ارائه دهندگان خدمات به کارفرما و ناظرین ارائه شود، که این موضوع می‌تواند به عنوان یکی از فاکتور مهم در تصمیم‌گیری بر روی تهیه نوع پوشش داخلی و حتی تشخیص کیفیت اجرای کار مدنظر و مطالبه کارفرمایان قرار گیرد.

### منابع

- سازمان برنامه بودجه وزارت نیرو. ۱۳۷۷. پوشش جدار لوله‌های فولادی با ملات ماسه سیمان، نشریه شماره ۱۷۳، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها.
- شاه‌منصوری، م. ر.، پور مقدس، ح.، شمس خرم آبادی، ق. ۱۳۸۲. بررسی نشت ریزآلاینده‌های ناشی از خوردگی داخلی لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری مجله پژوهش در علوم پزشکی. ۸. ۳۰:۳-۳۴.
- لطف الهی یقین، م. ع.، کاردان، ن. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی لوله انتقال آب فشار قوی سد بتنی شهریار با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳. ۱: ۵۷-۶۹.

AWWA (American Water Work Association) C210, Standard for Liquid-Epoxy Coatings and Linings for Steel Water Pipe and Fittings.

Bracken, L.J., Bulkeley, H.A., Maynard, C.M. 2014. Micro-hydro power in the UK: The role of communities in an emerging energy resource. *Energy Policy*. 68: 92-101.

BS) British Standard) 6920. Suitability of non-metallic materials and products for use in contact with water intended for human consumption with regard to their effect on the quality of the water.

Griffin, R. C. 2006. *Water resource economics: the analysis of scarcity, policies, and projects*, The MIT Press. Cambridge. Massachusetts.

Farshad, F., Rieke, H., Garber, J. 2001. New developments in surface roughness measurements, characterization, and modeling fluid flow in pipe. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 29: 139-150.

Joliff, Y., Belec, L., Aragon, E. 2013. Influence of the thickness of pipeline coating on internal stresses during the manufacturing process by finite element analysis. *Computational Materials Science*. 68: 342-349.

Karjalainen, T. P., Järviokski, T. 2010. Negotiating river ecosystems: Impact assessment and conflict mediation in the cases of hydro-power construction. *Environmental Impact Assessment Review*. 30.5: 319-327.

Paish, O. 2002. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6.6: 537-556.

Singhal, M. K., Kumar A. 2015. Optimum Design of Penstock for Hydro Projects. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 4.4: 216-226.

Tchoquessi Diodjo, M.R., Belec, L., Aragon, E., Perrin, F.X., Bonnaudet, M., Lanarde, L., Meyer, M., Joliff, Y. 2013. Numerical modelling of pipe internal stresses induced during the coating process – Influence of pipe geometric characteristics on stress state, *Materials and Design* 52, 429-440.

Walker, G.M., Albadarin, A.B., McGlue, A., Brennan, S., Bell, S.E.J. 2016. Analysis of friction factor reduction in turbulent water flow using a super hydrophobic coating, *Progress in Organic Coatings*. 90: 472-476.



Wang, D., Cullimore, R., Hu Y., Chowdhury, R. 2005. Biodeterioration of asbestos cement (AC) pipe in drinking water distribution systems. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 65. 810-817.

Yang, X-H., Zhu, W-L., Lin Z, Huo, J-J. 2005. Aerodynamic evaluation of an internal epoxy coating in nature gas pipeline, *Progress in Organic Coatings*. 54. 73-77.

Yang, W., Norrlund, P., Saarinen, L., Yang, J., Guo, W., Zeng, W. 2016. Wear and tear on hydro power turbines – Influence from primary frequency control. *Renewable Energy*. 87.1: 88-95.



## Economical and Technical Effects of Pipe Internal Coating on Hydro Power Generation and the Importance of Head Loss Calculation

Marzie Samare Hashemi<sup>1</sup>

### Abstract

Considering the vital role of water all over the world particularly in arid areas and the non-uniform distribution of resources and water users, inter basin water transmission projects are becoming more and more important. To economize water transmission projects, using the potential of hydropower energy could be considered an effective option. Gross head and discharge play important roles in potential of power generation. In this paper the importance of gross head considering its effective factors, pipe size, internal coating, are evaluated. The water transmission project from Safaroud dam to Kerman is considered as a case study in which internal coating as the main component of head issue is particularly evaluated as the important criteria to make decision for economic aspects of the projects. Also, using both cement lining (standard and non-standard) and epoxy as internal coating are compared technically and economically. The results show an increase of about 1.2 MW in power generation capacity in case of using epoxy which is caused by decreasing friction factor and head loss. As a result, pipe internal coating and even how implementing has to be considered an important criterion in design and implementation of projects. In addition, considering the long paths in water transmission projects, accuracy of head loss calculation can significantly affect the economic justification of such a projects.

**Key words:** Epoxy, head loss, hydro power, pipe internal coating, cement lining.

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran  
samare@uk.ac.ir