دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده برق و کنترل

پایان‌نامه کارشناسی ارشد(مهندسی برق- کنترل)

شناسایی و کنترل نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک (تولید پراکنده) و مطالعه موردی نیروگاه ناو گیلان

تحقیق وتدوین:
مهدی عباس‌زاده ناصری

استاد راهنما:
دکتر علیرضا یزدی‌زاده

استاد مشاور:
دکتر عباس علی‌آبادی

ماه و سال دفاعیه
بهمن ۱۳۸۷

تقدیم به مادر و همسر مهربانم

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول مقدمه ۲

۱-۱- مقدمه ۳

۱-۲- مطالعات مرتبط پیشین ۴

۱-۳- اهداف پایان‌نامه ۵

۱-۴- ساختار فصول پایان‌نامه ۵

فصل دوم تاریخچه و ساختار نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۸

۲-۳- پتانسیل منابع نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در جهان ۱۰

۲-۴- وضعیت نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در نقاط مختلف دنیا ۱۳

۲-۵- تعاریف اولیه در نیروگاه برق‌آبی کوچک ۱۶

۲-۶- دسته‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۱۸

۲-۶-۱- طرح‌های جریان رودخانه‌ای ۱۹

۲-۶-۲- طرح‌هایی با نیروگاه در پی سد ۲۰

۲-۶-۳- طرح‌های کانال آبیاری ۲۲

۲-۶-۴- طرح‌های سیستم آبرسانی ۲۳

۲-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۳

فصل سوم مدلسازی بخش هیدرولیک نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- پنستاک ۲۸

۳-۲-۱- مدلسازی پنستاک ۲۹

۳-۳- مدلسازی توربین آبی ۳۱

۳-۳-۱- مدل توربین آبی براساس معادله برنولی برای نیروگاه‌های با هد متوسط و بالا ۳۵

۳-۳-۲- مدلسازی توربین آبی با درنظر گرفتن اثرات ضربه قوچ، افت هد اصطکاک و غیرالاستیکی پنستاک ۳۹
۳-۳-۳- مدلسازی توربین آبی برای نیروگاه‌های با ارتفاع کم ۴۰
۳-۳-۴- مدلسازی توربین آبی با وجود افت اصطکاک حاصل از پردازش منحنی راندمان توربین ۴۴
۳-۳-۵- مدلسازی توربین آبی کاپلان ۴۴
۳-۳-۶- مدلسازی دریچه راهنما و موتور الکتریکی به عنوان محرک آن ۵۰
۳-۴- ضربه قوچ و مدلسازی مخزن فشارشکن ۵۱
۳-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۵۶

فصل چهارم مدلسازی بخش الکتریکی نیروگاه برق‌آبی کوچک ۵۷
۴-۱- مقدمه ۵۸
۴-۲- مدلسازی عمومی بارها ۵۸
۴-۳- مدلسازی بارهای استاتیک و دینامیک ۵۹
۴-۳-۱- مدلسازی بارهای استاتیک ۶۰
۴-۳-۲- مدلسازی بارهای موتوری ۶۱
۴-۳-۳- مدلسازی بارهای دینامیکی ۶۳
۴-۴- ژنراتورها ۶۴
۴-۴-۱- تنظیم ولتاژ و سنکرون کردن ژنراتورها ۶۵
۴-۴-۲- مدلسازی ژنراتور سنکرون ۶۶
۴-۴-۳- مدل ژنراتور سنکرون متصل به سیستم قدرت ۶۸
۴-۴-۴- مدلسازی ژنراتور آسنکرون ۷۰
۴-۵- مدلسازی سیستم تحریک ژنراتورها ۷۵
۴-۵-۱- سیستم تحریک DC ۷۵
۴-۵-۲- سیستم تحریک AC ۷۶
۴-۵-۳- سیستم تحریک استاتیک ۷۶
۴-۶- مدل خط ارتباطی ۷۸
۴-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۹
فصل پنجم مدلسازی گاورنرهای نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۸۰

۵-۱- مقدمه ۸۱
۵-۲- تشریح عمومی گاورنرها و انواع آنها در نیروگاه‌های برق‌آبی ۸۱
۵-۲-۱- قسمت الکترونیکی گاورنر ۸۲
۵-۲-۲- قسمت هیدرولیکی گاورنر ۸۲
۵-۳- بکارگیری گاورنرها در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۸۳
۵-۴- دینامیک گاورنر ۸۴
۵-۵- مدلسازی گاورنرهای سرعت ۸۶
۵-۶- مدل گاورنر سرعت IEEEG2 ۸۹
۵-۷- مدلسازی سروموتور به عنوان گاورنر نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۸۹
۵-۷-۱- ضرایب ثابت سروموتور ۹۰
۵-۷- ۲- دیاگرام گشتاور ـ سرعت ۹۱
۵-۷-۳- دیاگرام جریان سروموتور ۹۲
۵-۷-۴- منحنی توان خروجی سروموتور ۹۲
۵-۷-۵- منحنی راندمان ۹۲
۵-۷-۶- شتاب ۹۳
۵-۷-۶-۱- راه اندازی سروموتور با ولتاژ ثابت ۹۳
۵-۷-۶-۲- راه اندازی سروموتور با جریان ثابت ۹۴
۵-۷-۷- تابع تبدیل مرتبه دو سروموتور ۹۵
۵-۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۶

فصل ششم کنترل فرکانس در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک ۹۷
۶-۱- مقدمه ۹۸
۶-۲- استخراج مدل نیروگاه برق‌آبی میکرو پروژه ناو ۹۸
۶-۳- طراحی کنترل‌کننده فرکانس نیروگاه برق‌آبی میکرو توسط شبکه‌های عصبی ۱۰۴
۶-۳-۱- طراحی کنترل‌کننده PI ۱۰۵
۶-۳-۲- طراحی کنترل‌کننده عصبی ۱۰۶
۶-۳-۲-۱- شبکه شناسایی‌کننده ۱۰۷
۶-۳-۲-۲- شبکه کنترل‌کننده ۱۰۸
۶-۳-۳- روند آموزش شبکه‌ها ۱۰۸

۶-۳-۳-۱- فاز آموزش اولیه ۱۰۸
۶-۳-۳-۱-۱- آموزش شبکه شناسایی‌کننده ۱۰۸
۶-۳-۳-۱-۲- آموزش شبکه کنترل‌کننده ۱۱۰
۶-۳-۳-۲- آموزش نهایی شبکه‌ها ۱۱۱
۶-۳-۳-۲-۱- آموزش شبکه شناسایی‌کننده ۱۱۱
۶-۳-۳-۲-۲- آموزش شبکه کنترل‌کننده ۱۱۲
۶-۳-۴- شبیه‌سازی ۱۱۳
۶-۴- طراحی کنترل‌کننده فرکانس نیروگاه برق‌آبی کوچک توسط کنترل پیش‌بین مدل ۱۱۷
۶-۴-۱- مدل خطی نیروگاه برق‌آبی ناو ۱۱۸
۶-۴-۲- کنترل نیروگاه برق‌آبی میکرو ۱۱۹
۶-۴-۲-۱- کنترل‌کننده کلاسیک PI ۱۱۹
۶-۴-۲-۲- کنترل پیش‌بین بر اساس مدل (MPC) ۱۲۰
۶-۴-۳- شبیه‌سازی ۱۲۱
۶-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۲۶

فصل هفتم بررسی اثر نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بر روی شبکه سراسری برق ۱۲۸
۷-۱- مقدمه ۱۲۹
۷-۲- اتصال نیروگاه برق‌آبی کوچک به شبکه سراسری برق ۱۲۹
۷-۲-۱- روند سنکرون شدن نیروگاه برق‌آبی کوچک با شبکه ۱۳۰
۷-۲-۱-۱- جریان درون یورش ۱۳۲
۷-۲-۱- ۲- نقل و انتقال بار ۱۳۲
۷-۲-۱-۳- امنیت اتصال ۱۳۲
۷-۲-۲- محدودیت‌های عملکردی خط انتقال ۱۳۳
۷-۲-۲-۱- رگولاسیون ولتاژ ۱۳۳
۷-۲-۲-۲- محدودیت پایداری ۱۳۴
۷-۳- مدیریت نیروگاه برق‌آبی کوچک بین حالات مختلف ۱۳۶
۷-۳-۱- حالت ایزوله یا مجزا ۱۳۶
۷-۳-۲- حالت متصل به شبکه ۱۳۷
۷-۳-۳- گذر از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره ۱۳۸

۷-۳-۴- گذر از حالت ایزوله به حالت اتصال به شبکه ۱۳۸
۷-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۴۰

فصل هشتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۴۱
۸-۱- نتیجه‌گیری ۱۴۲
۸-۲- پیشنهادات ۱۴۴

پیوست‌ها ۱۴۵

مراجع ۱۵۹

چکیده

استحصال انرژی موجود در آب روان رودخانه‌ها به خصوص رودخانه‌های کوچک و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، توسط نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک محقق می‌شود. با توجه به پتانسیل بزرگ و استفاده نشده‌ی نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در بسیاری از نقاط جهان، این نیروگاه‌ها می‌توانند مشارکت مهمی در تامین انرژی مورد نیاز کشورها در آینده داشته باشند.

نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک نیز همانند تمام سیستم‌های صنعتی و طبیعی دیگر، دارای بخش‌های مختلفی با دینامیک‌های غیرخطی می‌باشند. طراحی کنترل‌کننده، بررسی اثرات ناشی از تغییرات شرایط کار آنها و ... از مواردی می‌باشند که برای انجام آنها، به مدلی دقیق و مناسب از بخش‌های مختلف هیدرولیکی و الکتریکی نیروگاه برق‌آبی کوچک نیاز می‌باشد. بدست آوردن مدل دینامیکی معتبر برای نیروگاه برق‌آبی کوچک، یکی از مهمترین پیش‌نیازهای طراحی کنترل‌کننده برای توربین نیروگاه می‌باشد.

در این پایان‌نامه کلیاتی درباره تاریخچه و ساختار نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، پتانسیل منابع نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک جهان به خصوص کشور ایران و تعاریف اولیه این دسته از نیروگاه‌ها ارائه خواهد شد. معادلات دینامیکی بخش‌های مختلف هیدرولیکی نیروگاه از قبیل پنستاک، انواع توربین‌های آبی، مخزن فشارشکن و ... و بخش‌های مختلف الکتریکی نیروگاه از قبیل انواع ژنراتورها و همچنین بارها توسط معادلات خطی و غیرخطی ارائه خواهند شد. در این مدلسازی‌ها مشخصات نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بصورت خاص مورد توجه قرار خواهند گرفت. استفاده از معادلات دینامیکی غیرخطی، دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد ولی از طرف دیگر استفاده از الگوریتم‌های طراحی کنترل‌کننده بر اساس اصول کنترل خطی امکان‌پذیر نمی‌باشد لذا در راستای تحقق این امر، معادلات غیرخطی، خطی‌سازی شده و دقت آنها نیز بررسی می‌گردد.

با توجه به اهمیت و تفاوت گاورنرها در نیروگاه برق‌آبی کوچک نسبت به نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ، مدلسازی گاورنرها با رویکرد کنترل فرکانس ارائه خواهد گردید. استفاده از سروموتورها به عنوان گاورنر نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، به صورت خاص مورد توجه قرار خواهد گرفت و مدلسازی سروموتورهای DC ارائه خواهد شد.

مبحث ابقاء پارامترهای حیاتی سیستم از قبیل ولتاژ و فرکانس در محدوده قابل قبول، امری ضروری برای عملکرد صحیح و موثر آن می‌باشد لذا در ادامه از طریق مدل‌های بدست آمده، طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده فرکانس نیروگاه برق‌آبی کوچک با دو روش کنترل‌کننده عصبی تطبیقی و کنترل‌کننده پیش‌بین براساس مدل ارائه خواهد شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با کنترل‌کننده کلاسیک PI مقایسه خواهد شد. بکارگیری دو شبکه عصبی با عنوان شبکه شناسایی‌کننده و شبکه کنترل‌کننده، نگرانی غیرخطی بودن معادلات دینامیکی نیروگاه برق‌آبی کوچک را از بین می‌برد و از طرف دیگر استفاده از کنترل پیش‌بین براساس مدل نیز با تخمین مدل در هر سیکل نمونه‌برداری، نگرانی تغییر شرایط کار و به دنبال آن تغییر پارامترهای نیروگاه برق‌آبی کوچک را مرتفع می‌سازد. در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مدل‌های بدست آمده، از پارامترهای و داده‌های نیروگاه برق‌آبی میکرو پروژه ناو در استان گیلان استفاده خواهد شد. در انتها نحوه اتصال و انفصال نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به شبکه سراسری برق و اثرات ناشی از اتصال یا انفصال از شبکه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

تولید انرژی الکتریکی توسط انرژی نهفته در آب روان، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید انرژی به صور مختلف می‌باشد. انرژی نهفته در آب روان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌گردد چراکه آب موجود بر روی زمین بوسیله بارش، پیوسته در گردش می‌باشد و تا زمانیکه سیکل پیوسته گردش آب در زمین وجود دارد، این منبع انرژی به آخر نخواهد رسید. یونانیان باستان از انرژی آب برای آسیاب کردن گندم استفاده می‌کردند. در اوایل قرن نوزدهم، آمریکایی‌ها و اروپایی‌ها از چرخهای آبی جهت تامین توان موردنیاز ماشین‌های خود استفاده می‌کردند. در اواخر قرن نوزدهم، انرژی آب در حال ریزش جهت تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. اولین نیروگاه برق‌آبی دنیا در سال ۱۸۷۹ در آبشار نیاگارا ساخته شد.

در این بین با بروز بحران انرژی در سالهای دهه ۱۹۷۰ تمایل و توجه به نیروگاه‌های برق‌آبی از سر گرفته شد و استفاده از انرژی موجود در آب رودخانه‌های کوچک همانند بسیاری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و نو از قبیل انرژی خورشیدی، انرژی باد و ... مورد توجه قرار گرفت. این دسته از نیروگاه‌های برق‌آبی که با حجم تولید محدود و نسبتاً کوچک پا به عرصه ظهور گذاشتند، یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و نو محسوب می‌شوند.

نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک دارای پتانسیل بسیار بزرگ و استفاده نشده‌ای در بسیاری از نقاط جهان می‌باشند و می‌توانند مشارکت مهمی در تامین انرژی مورد نیاز کشورها در آینده داشته باشند. کشورهایی همانند چین و کانادا جزء پیشگامان بهره‌برداری و استفاده از این منبع انرژی نو می‌باشند. توان تولیدی نیروگاه‌های برق‌آبی در جهان حدود ۶۸۰GW می‌باشد که از این مقدار ۴۷GW از طریق نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک تامین می‌شود. کشور چین به تنهایی حدود ۲۸GW یعنی ۵۹/۶٪ از کل توان تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک جهان را به خود اختصاص داده است.

اصلی‌ترین بخش تبدیل انرژی آب به انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، توربین آبی آن می‌باشد. توربین آبی یک محرک اولیه است که انرژی پتانسیلی آب را به انرژی مکانیکی دورانی تبدیل کرده و از چرخش توربین آبی، ژنراتور هم محور آن نیز به گردش درآمده و انرژی الکتریکی تولید می‌گردد.

مدلسازی سیستم‌های مختلف صنعتی و طبیعی برای مقاصد متعددی نظیر طراحی کنترل‌کننده مناسب، آموزش رفتار دینامیکی، فعالیت‌های تحقیقاتی و ارتقاء کیفیت نظارت بر عملکرد سیستم و دینامیک حاکم بر آن، مفید می‌باشند. مدلسازی و شبیه‌سازی نیروگاه برق‌آبی کوچک می‌تواند در راستای شناسایی رفتار استاتیکی و دینامیکی اجزاء نیروگاه، شناخت مشخصه‌های نیروگاه و درک پدیده‌های فیزیکی مربوط به آن،

۱-۲- مطالعات مرتبط پیشین

در راستای مدلسازی بخش‌های مختلف هیدرولیکی و الکتریکی نیروگاه‌های برق‌آبی، مطالعات وسیعی انجام شده است که در برخی اثر مخزن فشار شکن، در برخی دیگر اثر الاستیک یا غیرالاستیک بودن ستون آب و برخی هم اثر حرکت موج ناشی از تغییر موقعیت شیر ورودی توربین در نظر گرفته شده است. اولین مدل‌های تحلیلی غیرخطی، سال‌ها پیش توسط Oldenburger and Donelson (1962) ارائه شد [۷۹]. فقدان تجهیزات مناسب جهت مطالعه و آنالیز معادلات غیرخطی بدست آمده و عدم دسترسی به تجهیزات مناسب جهت طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های دقیق برای مدل‌های غیرخطی موجود، از جمله مشکلات آن زمان محسوب می‌شدند. در سالهای بعد، گزارش کارگروه موسسه مهندسین الکتریسیته و الکترونیک (IEEE) در سال ۱۹۹۲ و کتاب Kundur (1994) به صورت دقیق‌تر به مدلسازی بخش‌های مختلف نیروگاه‌های برق‌آبی پرداختند [۳۰]. در این زمان با استفاده از کامپیوترهای موجود امکان شبیه‌سازی و بررسی عملکرد مدل‌های موجود و برطرف‌سازی معایب آنها به مراتب بیشتر بود.

در بین مطالعات داخل کشور، کتاب چاپ شده توسط آقای عباسپور (عباسپور،۱۳۶۶) با عنوان "نیروگاه‌های برق‌آبی" به بررسی ساختار و انواع نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ و ارائه مدل برخی از قسمتهای نیروگاه برق‌آبی پرداخته است [۱]. آقای علوی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود با هدف مدلسازی دو نیروگاه بزرگ کارون۳ و دز، مدلسازی دینامیک بخش‌های مختلف هیدرولیکی و الکتریکی نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ را انجام داد و بررسی‌های اولیه در خصوص کنترل مشترک فرکانس توسط دو نیروگاه مذکور را ارائه کردند [۳].

در هیچ‌یک از موارد فوق رویکرد مدلسازی و تحقیقات، نیروگاه‌های برق آب کوچک نبوده‌اند. هرچند نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ و کوچک در بسیاری از قسمت‌ها، مشترک‌اند ولی تفاوت در وجود و عدم وجود برخی قسمت‌ها، تفاوت در اجزاء تشکیل‌دهنده برخی قسمت‌ها و از طرف دیگر مبحث اتصال و یا عدم اتصال آنها به شبکه سراسری برق، سه عاملی هستند که مدلسازی نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ و کوچک را از هم متمایز می‌کنند.

۱-۳- اهداف پایان‌نامه

نیروگاه‌های برق‌آبی نیز همانند تمام سیستم‌های طبیعی دیگر، رفتاری غیرخطی دارند. طراحی کنترل‌کننده برای توربین این نیروگاه‌ها، یکی از مواردی است که طی انجام آن، دسترسی به مدلی مناسب از نیروگاه

برق‌آبی لازم و ضروری است.

اصلی‌ترین انگیزه نگارش این پایان‌نامه، ضرورت مدلسازی دینامیک نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک و بهینه‌سازی مدلسازی‌های انجام گرفته از طریق درنظر گرفتن رفتار غیرخطی آنهاست. بدین ترتیب مدل‌های دینامیکی واقعی‌تری نسبت به مدل‌های خطی از نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در دسترس خواهد بود؛ لذا طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌هایی با راندمان بالاتر نیز محقق خواهد شد. در ضمن از مدل‌های دینامیکی دقیق می‌توان برای ساخت سیمولاتورهای نیروگاه نیز استفاده کرد که بهبود مدلسازی و درنظر گرفتن عوامل غیرخطی سیستم در راستای مرتفع کردن این امر مهم نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مدلسازی دقیق بخش‌های مختلف نیروگاه برق‌آبی کوچک، هدف اصلی این پایان‌نامه می‌باشد و در این راستا، مدلسازی بخش‌های مختلف نیروگاه برق‌آبی کوچک ارائه خواهند شد. بدست آوردن مدل دینامیکی معتبر برای نیروگاه برق‌آبی کوچک، یکی از مهمترین پیش‌نیازهای طراحی کنترل‌کننده برای آن می‌باشد. در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مدل‌های بدست آمده از پارامترهای واقعی نیروگاه برق‌آبی میکرو پروژه ناو در استان گیلان استفاده خواهد شد.

نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک عموماً برای مناطق دور از شبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی در برخی موارد، قابلیت اتصال به شبکه نیز برای آنها درنظر گرفته می‌شود. در راستای این امر، روال و اثرات ناشی از اتصال این دسته از نیروگاه‌ها به شبکه برق سراسری باید مورد بررسی قرار گیرد. نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به سیستم‌های کنترلی نیاز دارند تا در برابر تغییرات بسیار زیاد و سریع منبع تامین‌کننده انرژی اولیه این نیروگاه‌ها که همانا رودخانه‌های کوچک می‌باشند، پایدار باقی مانده و توان ثابتی را ارائه نمایند. از طرف دیگر این دسته از نیروگاه‌ها عموماً بصورت ایزوله از شبکه برق سراسری کار می‌کنند؛ لذا پایداری فرکانس این نیروگاه‌ها باید بصورت محلی انجام گیرد. بدین ترتیب مبحث ابقاء پارامترهای حیاتی سیستم از قبیل ولتاژ و فرکانس در محدوده قابل قبول، امری ضروری برای عملکرد صحیح و موثر آن می‌باشد. بدین ترتیب روال و اثرات ناشی از اتصال نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به شبکه سراسری و پایداری فرکانس آنها نیز در بخشی از پایان‌نامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-٤- ساختار فصول پایان‌نامه

فصل دوم پایان‌نامه به بیان کلیاتی درباره تاریخچه و ساختار نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک می‌پردازد و تعاریف اولیه این دسته از نیروگاه‌ها ارائه می‌گردد. در فصل سوم معادلات دینامیکی بخش‌های مختلف هیدرولیکی نیروگاه با درنظر گرفتن عوامل غیرخطی ارائه می‌گردد. در فصل چهارم مدلسازی بخش‌های قدرت نیروگاه مورد توجه قرار می‌گیرد و با توجه به انواع ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، مدل آنها بعلاوه مدل انواع بارها ارائه می‌گردد. با توجه به اهمیت و تفاوت گاورنرها در نیروگاه

فصل دوم

تاریخچه و ساختار نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک

۲-۱- مقدمه

نیروی برق‌آبی[1] انرژی است که از نیروی آب روان بوجود می‌آید. ریزش از ارتفاع و جریان آب عبوری، دو کمیتی هستند که انرژی آب در حال حرکت را مشخص می‌کنند. انرژی خورشید با برخورد به آب اقیانوس‌ها و رودخانه‌های موجود بر روی کره زمین، آنها را تبخیر می‌کند. وقتیکه این بخارات آب به مناطق سرد در اتمسفر می‌رسند، ابرها را تشکیل می‌دهند و در نهایت این ابرها بصورت برف و باران بر سطح زمین می‌بارند. جاذبه زمین آبهای حاصل از باران را از نقاط بلند سطح زمین به سمت نقاط پست‌تر زمین هدایت می‌کند. نیروی این آب روان می‌تواند بسیار زیاد باشد. نیروی برق‌آبی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌گردد چراکه آب موجود بر روی زمین بوسیله بارش بصورت پیوسته در گردش می‌باشد و تا زمانیکه سیکل پیوسته گردش آب در زمین وجود دارد، این منبع انرژی به آخر نخواهد رسید[۴].

نیروی برق‌آبی اولین منبع تولید انرژی در جهان بوده است. یونانیان ۲۰۰۰ سال پیش، از انرژی آب برای آسیاب کردن گندم استفاده می‌کردند. در اوایل قرن نوزدهم، آمریکایی‌ها و اروپایی‌ها از چرخهای آبی جهت تامین توان مورد نیاز ماشین‌های خود استفاده می‌کردند. در اواخر قرن نوزدهم، انرژی آب در حال ریزش جهت تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. اولین نیروگاه برق‌آبی دنیا در سال ۱۸۷۹ در آبشار نیاگارا ساخته شد. در اواخر سالهای دهه ۱۹۴۰ نیروگاه‌های فسیلی پا به عرصه ظهور نهادند و با استفاده از سوخت ارزان قیمت زغال سنگ و نفت به تولید برق پرداختند. اما با بروز بحران انرژی در سالهای دهه ۱۹۷۰ تمایل و توجه به نیروگاه‌های برق‌آبی از سر گرفته شد[۵]. امروزه نیز حدود ۱۰٪ از انرژی مصرفی دنیا از طریق نیروگاه‌های برق‌آبی تامین می‌شود و این رقم در برخی از کشورها مانند نروژ (با اینکه دارای منابع نفت و گاز است)، اتریش و کنیا به ۹۰٪ می‌رسد[۶]. این نوع انرژی نه تنها آسیب چندانی به طبیعت نمی‌رساند بلکه مقرون به صرفه نیز می‌باشد وهمچنین نیروگاه‌های برق‌آبی نقش مهمی را در طراحی منابع آب، جلوگیری از سیل، هدایت رودخانه‌ها، حل مسائل آبیاری، بهبود کیفیت آب شرب از طریق افزایش اکسیژن حل شده در آنها و ایجاد مناطق تفریحی دارند.

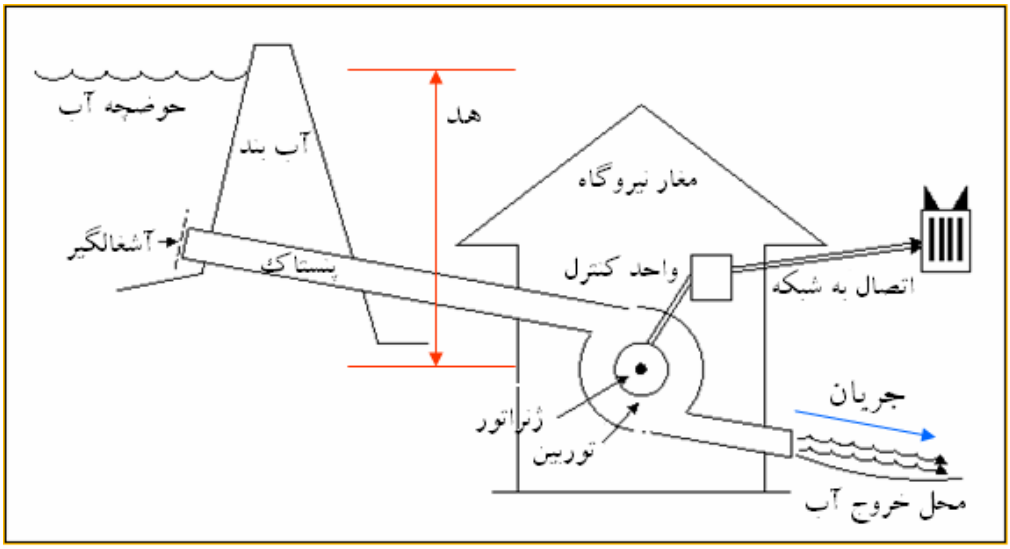
۲-۲- نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک

نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک نیز همانند نیروگاه‌های مقیاس بزرگ، انرژی جنبشی آب را به خدمت می‌گیرند تا انرژی الکتریکی تولید کنند. تفاوتهایی که بین این دسته از نیروگاه‌ها با موارد مقیاس بزرگ آنها وجود دارند عبارتند از[۷]:

- ✓ در این نیروگاه‌ها اکثراً نیازی به احداث سد نمی‌باشد و یا فقط آب‌بند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1] Hydro Power

- ✓ این نیروگاه‌ها در مواردی که ارتفاع آب نیز کم باشد مثلاً در مسیر رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- ✓ اندازه توان تولیدی توسط این نیروگاه‌ها در مقایسه با انواع بزرگ بسیار کمتر می‌باشد.
- ✓ این نیروگاه‌ها فضای زیادی را اشغال نمی‌کنند.
- ✓ بندرت نیاز به تغییر مسیر یا انحراف بستر رودخانه می‌باشد.



شکل ۲-۱: نیروگاه برق‌آبی نمونه [۸]

تا ابتدای قرن بیستم میلادی همه انرژی ناشی از نیروی برق‌آبی از طریق نیروگاه‌های کوچک تامین می‌گردید و در واقع همه نیروگاه‌های برق‌آبی تا اواخر قرن نوزدهم در اندازه‌های میکرو و یا مینی بوده‌اند. در اواخر نیمه اول قرن بیستم، نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به دلیل افزایش جمعیت جوامع انسانی و ارزان قیمت بودن سوختهای فسیلی، تا حد زیادی بلا استفاده شدند. تا آنکه از حدود سال ۱۹۸۹ تحول بزرگی در زمینه نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در اروپا روی داد و تا به امروز نیروگاه‌های برق‌آبی بسیاری در سراسر جهان نوسازی و یا ساخته شده‌اند و هم اکنون حرکت جهانی به طرف ایجاد این نیروگاه‌ها شکل گرفته است و بسیاری از کشورها در حال ساخت این نوع نیروگاه‌ها می‌باشند.

نیروگاه‌های برق آبی کوچک معمولاً به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که کمترین مقدار عملیات نصب در سایت را به همراه داشته باشند. در این نوع نیروگاه‌ها سعی برآن است که از کارهای زمان‌بر و با پیشرفت کند، مثل واحدهای با قطر زیاد که استاتورهای دو یا چند تکه دارند و نیاز به مونتاژ نهایی در سایت دارند، پرهیز شود.

۲-۳- پتانسیل منابع نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در جهان

توان تولیدی نیروگاه‌های برق‌آبی در جهان حدود ۶۸۰GW می‌باشد که از این مقدار ۴۷GW از طریق نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک تامین می‌شود. پتانسیل استفاده نشده‌ی انرژی برق‌آبی کل جهان حدود ۳۰۰۰GW تخمین زده شده است که ۱۸۰GW آن مربوط به نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک می‌باشد. نکته قابل توجه این است که از ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، ۷۰٪ یعنی چیزی در حدود ۱۲۶GW در کشورهای در حال توسعه قرار دارد و به نظر می‌رسد که در آینده بیشترین افزایش مربوط به توسعه و راه‌اندازی این نیروگاه‌ها در کشورهای در حال توسعه خواهد بود و در کشورهای پیشرفته رشد کمتری وجود خواهد داشت [۹].

معمولاً نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک را بر حسب ظرفیتشان به دسته‌های میکرو[1]، مینی[2] و کوچک[3] تقسیم‌بندی می‌کنند. هر چند در این زمینه توافق کلی وجود ندارد اما محدوده‌های ذکر شده در این مورد به یکدیگر نزدیک می‌باشند که چند نمونه به اختصار ذکر عبارتند از:

۱- بر اساس استاندارد کانادا که یکی از بزرگترین کشورهای بکارگیرنده نیروگاه‌های برق‌آبی می‌باشد، نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بصورت زیر دسته بندی می‌شوند:

- ✓ میکرو کمتر از ۱۰۰ کیلووات
- ✓ مینی بین ۱۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات
- ✓ کوچک بین ۱ مگاوات تا ۱۰ مگاوات

لازم بذکر است در ایالت انتاریوی کانادا "نیروگاه کوچک" به ظرفیت‌های زیر ۲۰ مگاوات گفته می‌شود، در ایالت کبک کانادا، ۲۵ مگاوات را به عنوان حد بالای نیروگاه کوچک در نظر می‌گیرند و ظرفیت ۱۰ مگاوات، ظرفیت متداول این محدوده است. تقسیم‌بندی انجام گرفته توسط شرکت RETScreen که یکی از شرکتهای بزرگ کانادایی در زمینه نیروگاه‌های برق‌آبی محسوب می‌گردد، در جدول (۲-۱) ارائه شده است [۱۰]:

جدول ۲-۱: برخی اطلاعات مربوط به نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک شرکت ®RETScreen

	توان نمونه	جریان	قطر رانر
میکرو	< 100 kW	< 0.4 m3/s	< 0.3 m
مینی	100 to 1,000 kW	0.4 to 12.8 m3/s	0.3 to 0.8 m
کوچک	1 to 50 MW	> 12.8 m3/s	> 0.8 m

[1] micro
[2] mini
[3] small

۲- طبق استاندارد هندوستان، نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بصورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۱۱]:

- ✓ میکرو کمتر از ۱۰۰ کیلووات
- ✓ مینی بین ۱۰۰ کیلووات تا ۲ مگاوات
- ✓ کوچک بین ۲ مگاوات تا ۱۵ مگاوات

۳- بر اساس استاندارد IEEE [۱۲]:

- ✓ نیروگاه‌های برق آبی مینی یا میکرو[1]:

واحدهای مینی یا میکرو به واحدهای با خروجی توان کمتر از ۱۰۰ KW گفته می‌شوند.

- ✓ نیروگاه‌های برق آبی کوچک[2]:

حدهای کوچک به واحدهای با خروجی کمتر از 5MW گفته می‌شوند.

همچنین در ملاحظات ارائه شده از طرف این شرکت، قطر توربین هم به عنوان یک عامل در دسته‌بندی نیروگاه‌های برق آبی درنظر گرفته شده است.

نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک انواع مختلفی دارند که از یک جنبه می‌توان آنها را به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- جریان رودخانه‌ای[3]

مشخصات کلی این دسته عبارتند از:

- ✓ هیچگونه ذخیره آبی وجود ندارد.
- ✓ توان تولیدی در این نیروگاه‌ها با مقدار جریان عبوری آب در دسترس در حال تغییر و تحول است.

شکل ۲-۲: نیروگاه برق‌آبی جریان رودخانه‌ای 17.6MW – Massachusetts [۱۰]

[1] Mini / Micro hydro electric power plant
[2] Small hydro electric power plant
[3] Run of River

شکل ۲-۳: نیروگاه برق‌آبی جریان رودخانه‌ای 4.3MW - Oregon [۱۰]

۲- مخزنی[1]

مشخصات کلی این نوع عبارتند از:

- ✓ برخورداری از ظرفیت ثابت در طول دوره سالانه
- ✓ استفاده بالاجبار از سد یا آب‌بند

در جدول (۲-۲) مقایسه‌ای بین راندمان برخی از انواع پرکاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر و نو ارائه شده است.

جدول۲-۲: مقایسه راندمان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و نو [۱۳]

انرژی تجدیدپذیر نو	راندمان (درصد)
برق‌آبی کوچک	۸۵ – ۹۰
انرژی باد	۴۰
بیوماس	۳۵
انرژی خورشیدی	۱۵

جدول۲-۳: مقایسه طول مدت کارکرد انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و نو [۱۳]

انرژی تجدیدپذیر نو	مدت کارکرد (سال)
برق‌آبی کوچک	۶۰
بیوماس	۳۰
انرژی باد	۲۰
انرژی خورشیدی	۲۰

[1] Reservoir

۲-٤- وضعیت نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در نقاط مختلف دنیا

چین

چینی‌ها در زمینه ساخت و نصب نیروگاه‌های برق‌آبی بسیار فعال و پیشگام می‌باشند بطوریکه مقام اول را در جهان به خود اختصاص داده‌اند. در این کشور بیش از ۴۳۰۰۰ نیروگاه برق‌آبی کوچک وجود دارد و توان تولیدی این تعداد نیروگاه در حدود ۲۸۰۰۰MW می‌باشد. اشتغال‌زایی در زمینه نیروگاه برق‌آبی کوچک هم برای مردم این کشور جالب توجه می‌باشد و بیش از ۱/۲ میلیون نفر از مردمان کشور در زمینه نیروگاه برق‌آبی کوچک فعالیت می‌کنند. با فعالیت این عده در چین، سالانه حدود ۲۳ میلیون کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولید می‌شود و ۳۰۰ میلیون نفر از مردم این کشور که در مناطق کوهستانی زندگی می‌کنند، برق مورد نیاز خود را از این نیروگاه‌ها تامین می‌کنند. پتانسیل انرژی برق‌آبی کوچک کشور چین حدود ۱۰۰۰۰۰ مگاوات برآورد شده است که تاکنون فقط ۲۸٪ از آن مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هم اکنون حدود ۵۰۰۰ مگاوات نیروگاه برق‌آبی کوچک در کشور چین در حال ساخت می‌باشد. در ۶ سال گذشته، هر سال حداقل ۱۰۰۰ مگاوات از این نوع نیروگاه‌ها به شبکه این کشور افزوده شده است و استفاده از این منابع انرژی، از خروج سالانه ۱/۵ بیلیون دلار جلوگیری کرده است. در حال حاضر مصرف برق سالانه هر نفر در این کشور ۲۸۰kwh می‌باشد که دولت چین قصد دارد با بهره‌برداری و بکارگیری چنین نیروگاه‌هایی، این مقدار مصرف را به ۴۰۰kwh تا ۶۰۰kwh در سال ۲۰۱۰ برساند. لازم بذکر است که در حال حاضر ۷۵ میلیون نفر از اهالی مناطق روستایی چین به منابع انرژی الکتریکی دسترسی ندارند و بناچار از سوزاندن چوب و ... استفاده می‌کنند؛ که مقدار مصرف این عده در سال معادل با سوزاندن ۶۰۰ میلیون تن زغال سنگ می‌باشد [۱۴].

هندوستان

هندوستان نیز از کشورهای فعال آسیایی در زمینه نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک می‌باشد و در این کشور ۴۲۰ نیروگاه برق‌آبی کوچک تا ظرفیت ۲۵MW وجود دارد که ظرفیت این تعداد نیروگاه، در مجموع ۱۴۲۳MW می‌باشد. کل ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی این کشور حدود ۱۰۰۰۰MW می‌باشد. در حال حاضر ۱۸۷ پروژه برق‌آبی کوچک با ظرفیت کلی ۵۲۱MW در حال ساخت می‌باشند [۱۴].

روسیه

در کشور روسیه که یک کشور اروپایی ـ آسیایی می‌باشد، ۸۹ نیروگاه برق‌آبی کوچک با ظرفیت کلی ۵۵۰MW وجود دارند و این مقدار ۱/۲٪ از کل انرژی برق‌آبی می‌باشد که بوسیله کل نیروگاه‌های برق‌آبی در این کشور تولید می‌گردد [۱۴].