

فصل نهم

نیروگاه های انرژی زمین گرمایی (Geothermal Energy Power Plants)

بخش اول

انواع و مشخصه های منبع های زمین گرمایی

عمده ترین منبع سیستم های زمین گرمایی در اعماق زمین قرار دارد. ضخامت لایه Lithosphere یا پوسته بیرونی (Crust) و قشر خارجی زمین که شامل قاره ها می شود تقریباً ۱۰۰ کیلومتر (۶۲ مایل) می باشد. در زیر لایه فوق الذکر پوشش نیمه پلاستیکی و نیمه الاستیکی وجود دارد که دمای آن به بیش از ۹۲۵ درجه سانتیگراد (۱۷۰۰ درجه فارنهایت) می رسد. این ناحیه منبع و سرچشمه خمیر مواد معدنی مذاب است که بصورت پریودیک به محلهایی مشخص از لایه Lithosphere تزریق شده و باعث می شود از آتشفشانها و کوههای آتشفشانی بیرون بریزند. این فوران بصورت ترکیبی از گدازه و سنگهای آتشفشانی بزرگ و عظیم جریان می یابد و زمینهایی با ارتفاع غیر عادی بوجود می آورد که زیر سطح آنها گرم است. لایه Lithosphere شامل حداقل ۱۲ صفحه یا منطقه جداگانه است که نسبت به یکدیگر حرکت کرده و جابجا می شوند.

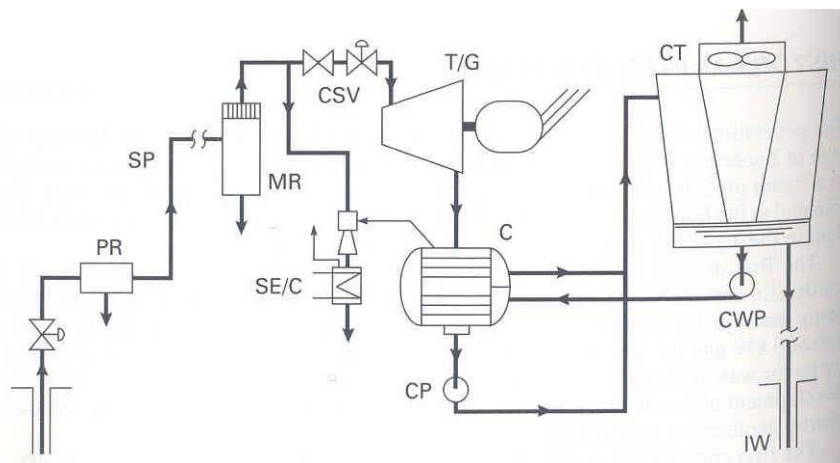
منابع حرارت آبهای گرم در پوسته زمین در مناطقی یافت می شوند که پوسته بیرونی زمین از هم جدا شده باشد که لبه میانی اقیانوس اطلس و قسمت شرقی اقیانوس آرام نمونه هایی از آن می باشد. مناطقی از قبیل ساحل غربی آمریکای جنوبی و ساحل شمال غربی ایالات متحده نمونه هایی از محدوده های موجود هستند که در آن لایه های زمین شامل صفحاتی در حال رخنه کردن به همدیگر و نیرو وارد کردن به هم هستند. در منابع نقطه ای مانند جزیره هاوایی بصورت مجرای دائم و کانال همیشگی بوده و بصورت پریودیک گدازه یا مواد معدنی خمیری شکل را به سطح می آورند که این فرآیند در طی مدت زمان زیاد را در دوره زمین

شناسی شامل می شوند. مهمترین منابع زمین گرمایی قابل توجه از نظر تجاری در سایر نقاط جهان نیز یافت شده اند. در ایران نیز مناطق سبلان، دماوند، تفتان و ... دارای چنین ویژگی می باشد که واحدهای نیروگاه زمین گرمایی در آن احداث شده است.

انواع نیروگاههای زمین گرمایی

اصولاً سه نوع طرح برای نیروگاههای زمین گرمایی وجود دارد. همچنین ترکیبهای مختلفی از این نیروگاهها برای افزایش بازده طراحی و ساخته شده است. انواع طرحهای نیروگاههای زمین گرمایی عبارتند از:

۱- **طرح بخار مستقیم (Direct Steam):** این طرح بیشتر در مخازن زمینی که نسبت بخار به آب در آنها خیلی زیاد بوده و به صورت بخار خشک است بکار می رود. در چاههای این منابع زمینی، بخار فوق گرم (Super Heat) تولید می شود. بخار خشک از چندین چاه بوسیله خطوط لوله هایی به نیروگاه انتقال می یابد که مستقیماً در توربینهای نوع از نوع واکنشی استفاده می شود. بین هر منبع و نیروگاه، سیستمهای جدا کننده جامد از مایع سانتریفوژ یافت می شود. سیستمهای جدا کننده در نزدیک مخزن زمینی قرار دارد و مانع از ورود ذراتی مثل گرد و غبار و ذرات کوچک سنگریزه به نیروگاه بوده و آنها را برگشت می دهد. در ورودی نیروگاه نیز یک رطوبت گیر برای خشک نمودن کامل بخار موجود است. شکل ۱ دیاگرام ساده شده ای از طرح بخار مستقیم نشان می دهد.



شکل ۱ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمایی از نوع طرح بخار مستقیم

در اکثر کشورها، عملیات خروج گاز به اتمسفر با استانداردهای محلی مطابقت دارد. سطوح بالایی گاز غیر قابل چگالش (Non Condensable Gas (NCG) در بخار زمین گرمایی یافت می شود که معمولاً تا ۵٪ وزن بخار خواهد بود. این گاز در سیستم استخراجی به عنوان یک جزء ضروری طرح فوق است که معمولاً

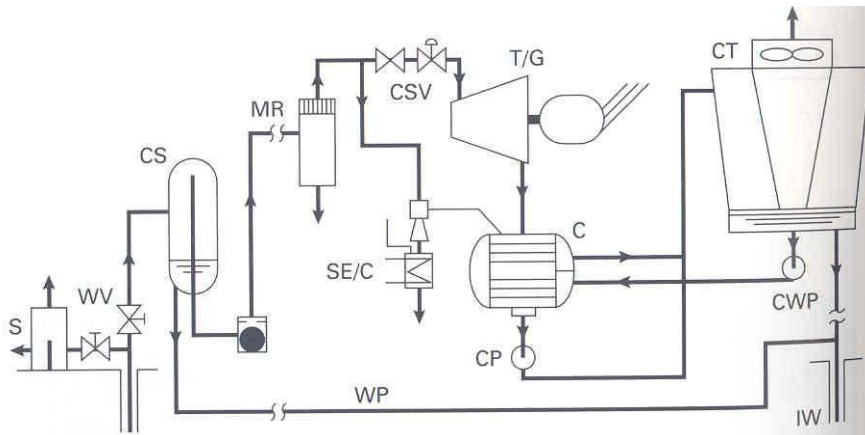
دو خارج کننده بخار دو مرحله ای قبل و بعد از سیستم خنک کننده استفاده می شود. اما در بعضی موارد توربوکمپرسور هم لازم خواهد بود. یک کندانسور (چگالنده) نوع سطحی در شکل فوق نشان داده شده است. در چنین نیروگاههایی معمولاً کندانسورهای تماس مستقیم اغلب استفاده می شوند.

در سیستم جدا کننده گاز غیر قابل چگالش، قبل از آزاد شدن گازها به اتمسفر و در صورتی که گاز مورد نظر مثل سولفید هیدروژن (H₂S) از حد مشخصی تجاوز کرد، می بایست یک طرح شیمیایی دیگری هم برای جداسازی آن بکار گرفته شود. بعضی واحدهای تولید برق از سیستمهای Stretford برای این منظور استفاده می کنند که در آن سولفور بعنوان محصول بازیافتی خواهد بود. از آنجایی که در این طرح بخار چگالیده بوسیله بویلر همانند یک نیروگاه معمولی بچرخه در نمی آید، لذا ساخت برجهای خنک کن ضروری بنظر می رسد. نرخ توان این واحدها از اندازه های کوچک بین ۱۰ تا ۱۵ مگاوات تا اندازه های متوسطی حدود ۵۵ تا ۶۰ مگاوات و بالاتر حدود ۱۳۵ مگاوات ساخته شده است، اما اخیراً در عمل استفاده از مقادیر اسمی ۲۰ تا ۶۰ مگاوات در هر واحد دیده می شود.

۲- طرح Flash Steam: اصولاً مخازن بخار خشک محدودند. در اکثر مخازن زمین گرمایی نسبت آب به بخار بیشتر می باشد که در آن محصول مخزن یک مخلوط دو فاز مایع و بخار است. کیفیت مخلوط (بعنوان مثال درصد وزن بخار) تابعی از حالت سیال مخزن است و در آن ابعاد مخزن و فشار دهانه مخزن با یک سوپاپ دهانه مخزن و یا یک صفحه آبکاری می توان روزه را کنترل می شود. معمولاً کیفیت بخار چنین منابعی از رنج ۱۰% تا ۵۰% می باشد. روش قراردادی جداسازی فازها و استفاده کردن از بخار برای به حرکت درآوردن توربین بخار، در مواقعی که فشار منبع کم باشد، معمولاً ۰,۵ تا ۱ مگا پاسکال در فازهای مایع و بخار تفاوت می کند. عمل جداسازی فازها در غلظت ۱۷۵ تا ۳۵۰ بوسیله عمل سانتریفوژ انجام می پذیرد و جداکننده های Cyclone با کارایی بالا، کیفیت بخار منطقه را به بیشتر از ۹۹,۹۹% می رسانند. مایع حاصل از جداسازی بوسیله چاههای تزریق به بیرون دفع می شود. طرح فوق الذکر به دو طرح زیر تقسیم می شود که به شرح زیر است:

۱-۲ طرح Single Flash: یک نمونه از دیاگرام ساده شده ای از این طرح در شکل ۲ نشان داده شده است. سیال دو فاز بدست آمده از چاهها بطور افقی و مماسی به داخل یک لوله فشار عمودی استوانه ای به نام جدا کننده های Cyclone هدایت می شود. مایع جدا شده به طرف چاه خروجی جریان می یابد. در این مجرای استوانه ای یک لوله ایستاده عمودی وجود دارد که در آن بخاری که در مجرا به طرف بالا حرکت می کند از آن لوله ایستاده خارج می شود. این چنین طراحی را بنام "جداکننده خروجی تحتانی" نامیده می شود و بسیار ساده است. بدلیل نداشتن قسمتهای متحرک بعضی اوقات برای جدایی بهتر دو فاز مایع و بخار از هم از پره های موجود در جدا کننده Cyclone استفاده می شود. بخار خروجی از جدا کننده Cyclone به یک شیر اطمینان یک طرفه ساچمه ای وارد می شود که شیر مزبور از ورود مایعی که وارد خط لوله بخار در طی برگشتن می

شود جلوگیری می کند. طرح فوق بسیار نزدیک به طرح بخار خشک است ولی تفاوت اصلی آن از حجم زیاد مایعی که جابجا می شود ناشی می شود. برای طرحهای نیروگاهی ۵۵ مگاوات از نوع Single Flash نوعاً حدود ۶۳۰ کیلوگرم بر ثانیه مایع اضافی تولید می شود در حالی که در طرح بخار مستقیم این رقم به حدود ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه می رسد که نسبت حدود ۳۰/۱ را خواهد داشت. طرح فوق الذکر احتیاج دارد به یک سیستم تزریق خارجی با طراحی خوب و وسیع که شامل چاهها و لوله هایی است که با توجه به شناختی که از مخازن خواهیم داشت، آن طراحی می شود.



شکل ۲ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح Single Flash

برای سیستم های مرتب شده و جمع آوری شده از سیال زمینی چندین انتخاب در دسترس است تا سیالهای زمینی در طرحهای مربوط به Flash Steam، جمع آوری، پردازش، پخش و مرتب شوند. پردازش های مورد نیاز با توجه به طرحهای Single Flash عبارتند از:

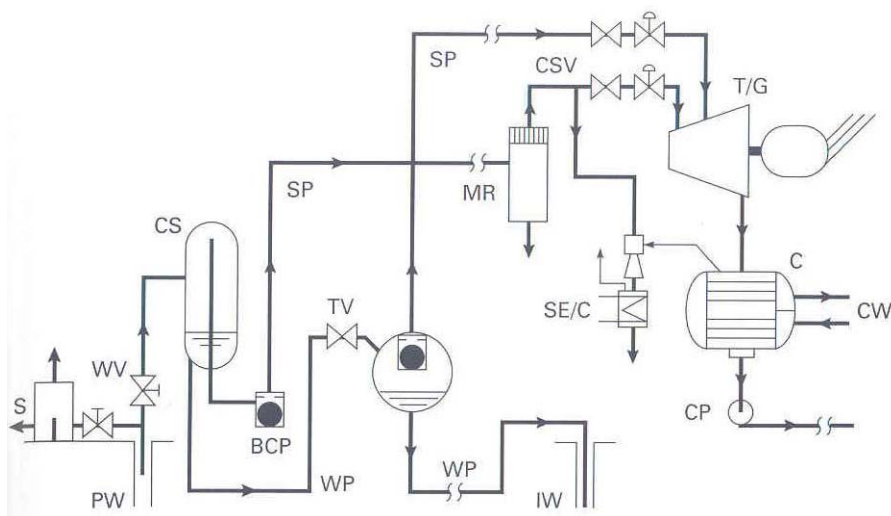
الف- جداکننده ها در هر سرچشمه، لوله های بخار به طرف موتورخانه و لوله های آب گرم از هر چاه تولیدی به چاههای خروجی.

ب- لوله های دو فاز از هر چاه به نیروگاه، جداکننده ها در نیروگاه، لوله های کوتاه بخار به طرف توربین و لوله های آب گرم از نیروگاه به چاههای خروجی.

پ- لوله های دو فاز از چاهها به جداکننده های مصنوعی در هر منطقه، لوله های بخار از همان منطقه به نیروگاه و لوله های آب گرم از منطقه به چاههای خروجی.

۲-۲ طرح Double Flash: این طرح تقریباً شبیه به طرح Single Flash است، با این تفاوت که مایع جدا شده در جداکننده Cyclone دوباره به یک حباب با فشار بالا رفته و بخار خارج شده از حباب به یک توربین فشار پایین جداگانه و یا به یک طبقه مشخصی از توربین اصلی فرستاده می شود. طرح Double Flash گران بوده و

علت آن بدلیل لوله کشی اضافی برای بخار فشار پایین و همچنین کنترل اضافی دریچه ها و توربین بزرگتر و یا توربین اضافی دیگر می باشد. شکل ۳ دیاگرام یک نیروگاه از نوع Double Flash را نشان می دهد.



شکل ۳ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح Double Flash

برای طرحهای Double Flash دو پردازش اضافی نیز افزوده می شود که عبارتند از:

الف- جداکننده ها و تبخیرکننده های سریع در سرچشمه، خطوط بخار فشار بالا و فشار پایین به نیروگاه و لوله های آب گرم از هر چاه تولیدی به چاه خروجی.

ب- لوله های دو فاز از هر چاه به نیروگاه، جداکننده ها و تبخیرکننده های سریع در نیروگاه، خطوط کوتاه بخار فشار بالا و پایین به توربین ها و لوله های آب گرم از نیروگاه به چاههای خروجی.

پ- لوله های دوفازی از چندین چاه با ایستگاههای جدا کننده مصنوعی در هر منطقه، لوله های بخار فشار بالا و فشار پایین از هر منطقه به نیروگاه و لوله های آبگرم از منطقه به چاههای خروجی .

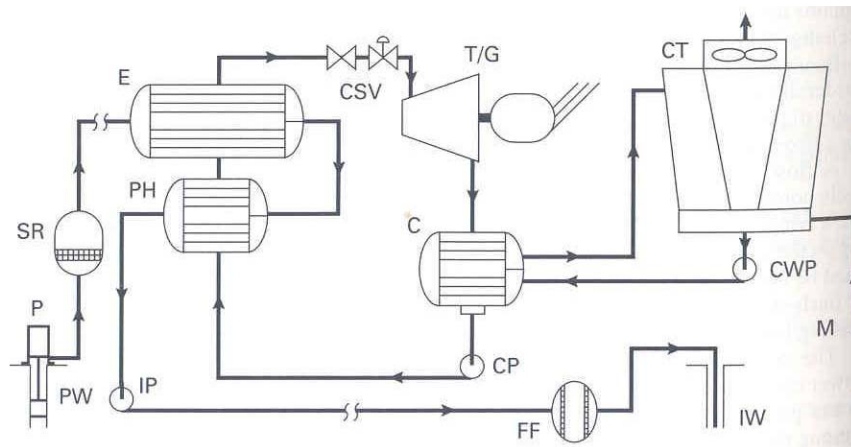
ت- لوله های دوفاز از چندین چاه به جداکننده های مصنوعی در هر منطقه، لوله های بخار فشار بالا و لوله های آب گرم به طرف موتورخانه، تبخیرکننده های سریع در نیروگاه، خطوط بخار فشار پایین کوتاه به توربین و لوله های آب گرم از نیروگاه به چاههای خروجی.

بهترین انتخاب از نظر اقتصادی و بحساب آوردن شرایط محلی ویژه شامل دما، فشار و کیفیت سیال زمینی خواهد بود. همچنین باید به مکان و موقعیت مکانی نیروگاه و شرایط بهره برداری دقت نمود بطوری که در موقع ضرورت تغییرات مورد نیاز برای توسعه طرح امکان جاسازی واحدهای اضافی را امکان پذیر نماید.

۳- طرح Binary: در یک طرح باینری انرژی حرارتی سیال زمینی از طریق یک مبدل حرارتی به سیال کاری دوم به منظور کار در یک چرخه رانکین انتقال می یابد. در این حالت سیال زمینی با قسمتهای متحرک

نیروگاه تماس نداشته و طرح با نیروی مفید خواهد بود. چنین حالتی در شرایطی که سیال زمینی دمایی کمی دارد، یعنی کمتر از 300°F (150°C) یا اینکه سیال زمینی با عدم چگالش بالا یا خوردگی و میزان انرژی پتانسیل بالا اتفاق می افتد. مشکلی که وجود دارد این است که ممکن است سیال زمینی سریع تبخیر شود. این مساله در پمپی که در زیر چاه قرار دارد پیش می آید. در این حالت بازای هر دمایی سیال داده شده فشار به بالایی سطح فشار اشباع افزایش می یابد. اکثر نیروگاههای باینری با استفاده از پمپهای چاه عمل می نمایند که در آن سیال زمینی از چاه تولیدی پس از خروج از مبدل گرمائی و ورود به چاه تزریق نیروگاه در فاز مایع باقی می ماند.

در اولین نیروگاههای زمین گرمایی بصورت اقتصادی در Larderello از نوع باینری، از بخار زمین گرمایی استفاده شده بود تا آب تمیز را برای توربین های نیروگاه بصورت بخار تبدیل نماید. بخاطر محدودیت مواد موجود در آن زمان، از بخار خورنده در توربین ها بطور مستقیم استفاده نشد. یک دیاگرام برای طرح Binary اساسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



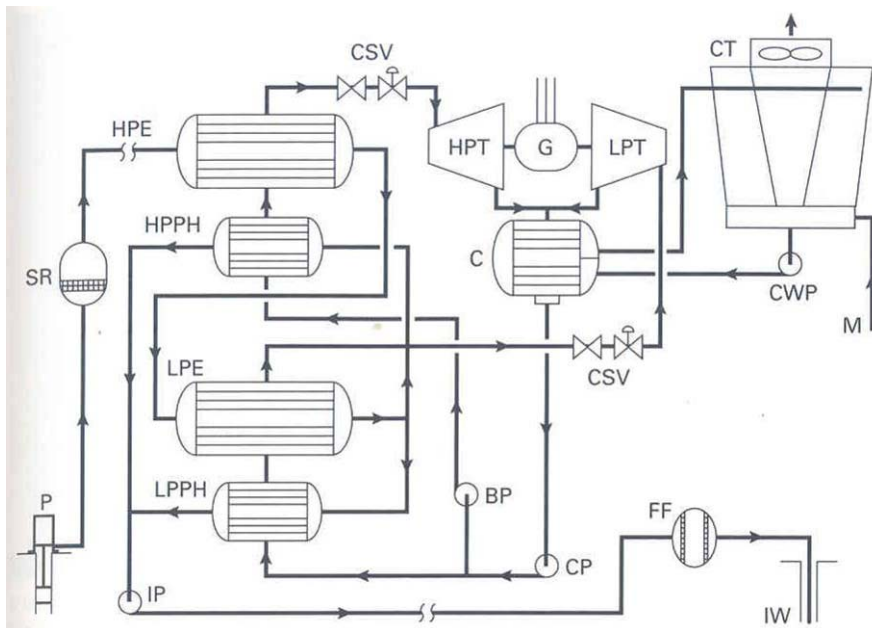
شکل ۴ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح Binary

چرخه توان شامل یک پیش گرم کن، یک تبخیر کن و یک مجموعه از دریچه های کنترل، یک توربین ژنراتور، یک چگالنده و یک پمپ تغذیه است. همچنین بسته به شرایط مکانی از هوا یا آب برای خنک کاری استفاده می شود. اگر خنک کاری بصورت مرطوب باشد می بایست یک منبع مستقل از آب وجود داشته باشد، زیرا که بخار زمینی چگالنده همانند طرحهای Direct Steam و Flash Steam در دسترس نیست. بدلیل آلودگیهای شیمیایی، آب نمک برای خنک کاری مناسب نیست. در اینصورت ممکن است طراح محدوده وسیعی از سیالهای کاری مناسب برای سیکل توان در اختیار داشته باشد. برای انتخاب سیال بایستی تطابق ترمودینامیکی خوب با مشخصات ویژه سیال زمینی مخصوصاً در دمایی سیال زمینی را دارا باشد. مشخصات سیالهای کاری مهم عبارتند از:

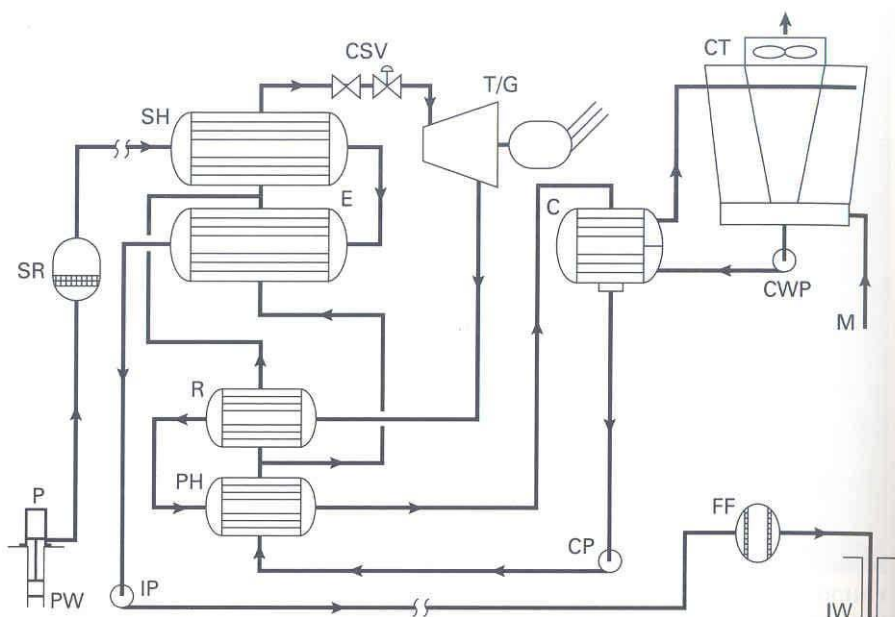
- دما و فشار بحراني
- مشخصات اشباع (شامل اینکه آیا قابلیت برگشت از حالت چگالیده را دارد یا نه؟)
- پایداری دمایی
- قابلیت اشتغال
- سمی بودن
- مضر بودن برای آزن
- ضریب انتقال حرارتی
- سرعت صورت در شرایط خروجی توربین
- هزینه

هیدروکربنهایی مثل ایزوبوتان، ایزوپنتان و پروپان سیالهایی کاری مناسبی هستند، در عین حال که منجمد کننده های خوبی نیز می باشند. سیال بهینه روی هم رفته يك ضریب کارکرد بالا با ایمنی و عمل اقتصادی خوب را دارد. طرح نشان داده شده در شکل ۴ يك طرح پایه برای سیکل رانکین است. طرحهای پیشرفته تر در بازده های بالاتر نیز وجود دارد. برای مثال در يك نوع چرخه Cascade، بیش از يك سطح فشار تبخیرکن استفاده می شود. لذا توان خروجی زیادتری را برای همان شرایط سیال زمینی دارد، اگر چه هزینه و در ضمن پیچیدگی بالاتری را هم خواهد داشت شکل ۵ يك طرح باینری Cascade با فشار دوگانه (فشار بالا و پایین) را نشان می دهد.

واحد توان نیز يك توربین فشار بالا و يك توربین فشار پایین که به يك ژنراتور وصل اند را شامل خواهد بود. سیال زمینی به خوبی از میان يك تبخیرکن فشار بالا (دمای بالا) و فشار پایین (دمای پایین) و پیش گرم کن های فشار و دمای بالا و همچنین پیش گرم کن های فشار و دمای پایین عبور می کند. اگر مخلوطی از سیال های مختلف برای سیال عامل مثل ایزوبوتان و ایزوپنتان یا آب و آمونیاک انتخاب شود در آنصورت در دماهای متغیر، عمل چگالش و تبخیر با فشار ثابت صورت می گیرد. این مشخصات يك تبخیر نزدیک مابین آب نمک و سیال عامل تبخیر شونده می شود. علاوه بر این اگر يك Heat Recuperator استفاده شود تا سیال کاری را از قبل گرم کند در اینصورت آب خنک کن و سیال عامل (چگالش) بازده های بالایی مبدل حرارتی و بازده های بهتر کلی را موجب می شود. هر دو حالت اساس نمونه Kalina از طرح باینری نیروگاه زمین گرمایی می باشد که دیاگرام ساده شده آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح باینری Cascade با فشار دوگانه



شکل ۶ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح باینری از نوع Kalina

۴- بررسی اقتصادی نیروگاههای زمین گرمایی:

هزینه مربوط به ساخت و راه اندازی يك نیروگاه زمین گرمایی در حد وسیعی می تواند تغییر کند و به

ضرایب زیر مربوط می شود:

• نوع منبع (بخار یا آب گرم)

• اندازه نامی نیروگاه

• دمای منبع

• نوع نیروگاه (Single/Double Flash، باینری و ...)

• محصول از نظر حجمی مخزن

• تغییرات آب و هوایی

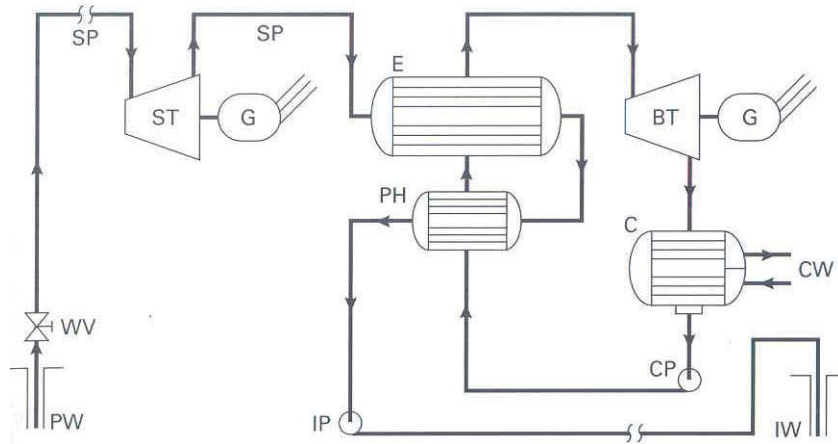
• هزینه سرمایه گذاری

• هزینه کار

سه ضریب اول از تعداد چاههایی که باید حفر شود متاثر می شوند. با استفاده از هزینه نوعی و پتانسیل توان برای تولید چاهها، یک چاه واحد می تواند قیمتی حدود ۱۰۰ تا ۴۰۰ دلار برای هر کیلووات داشته باشد. سه مورد دیگر، هزینه سرمایه گذاری سیستم مبدل انرژی را تعیین می کند. دو مورد آخر به هزینه بهره برداری طرح مثل قیمت و هزینه سرویس، بهره برداری و نگهداری (O&M) مربوط می شوند. هزینه های سرمایه گذاری بر حسب کیلو وات تغییر می کند و این تغییر به صورت معکوس نسبت به دما و مقادیر نامی خواهد بود. هزینه های نگهداری و تعمیرات سالانه با مقادیر نامی افزایش می یابد، اما وابسته به دمای سیال زمینی و اندازه طرح است. این هزینه ها در مواقعی که با منابع انرژی تجدیدناپذیر و بطور مستقل برای مکانهایی که الکتریسیته بوسیله موتورهای دیزلی کنترل می شود مقایسه شوند مناسب می باشند.

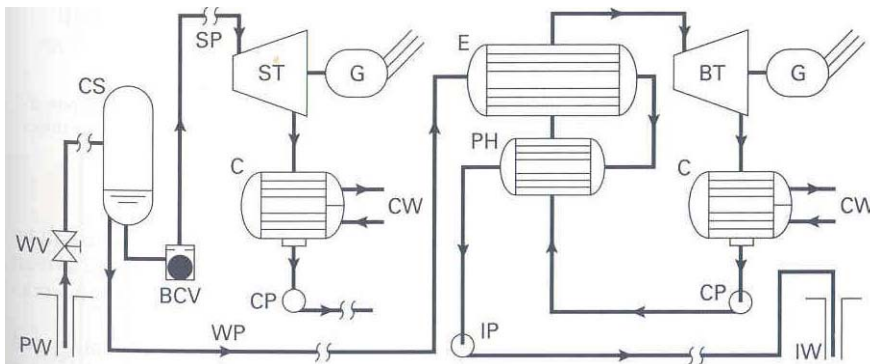
۴- طرح های ترکیبی نیروگاههای زمین گرمائی

نیروگاه ترکیبی باینری و بخار مستقیم

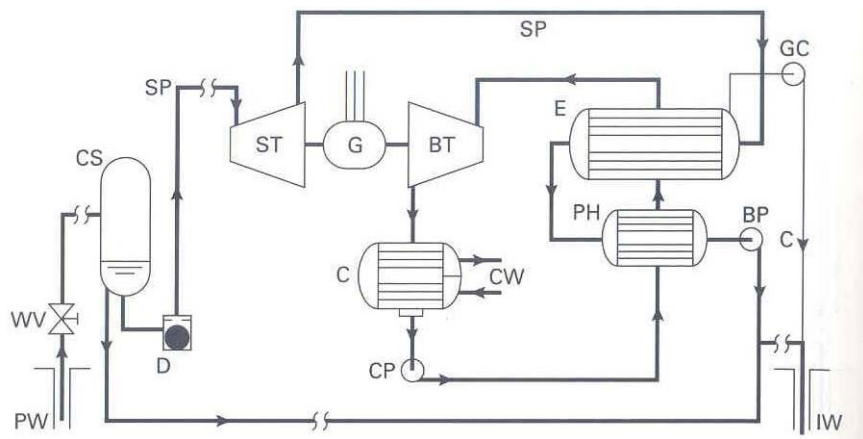


شکل ۷ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح باینری و بخار مستقیم

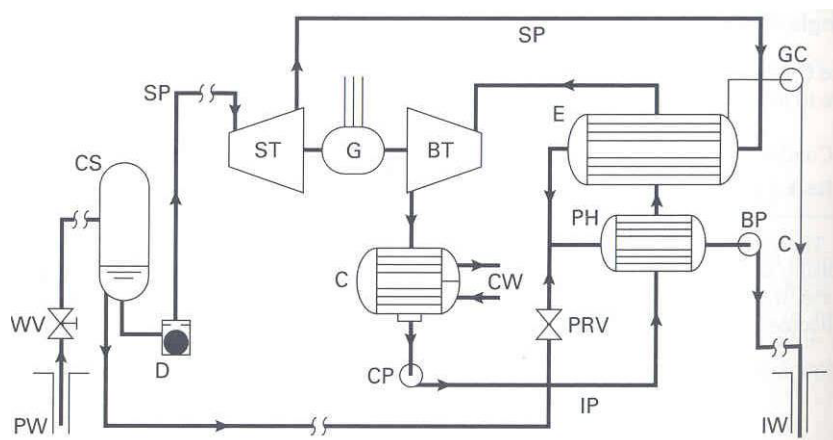
نیروگاه ترکیبی باینری و Single Flash



شکل ۸ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح باینری و Single Flash



الف



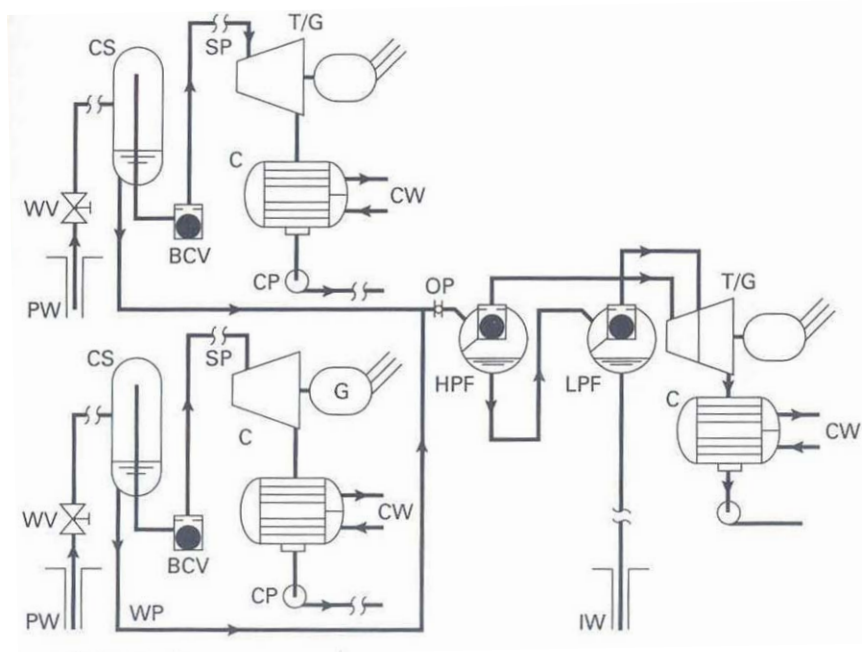
ب

شکل ۹ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمائی طرح باینری و Single Flash

الف- همراه با سیال آب نمک مجزا که فقط برای تزریق استفاده شده است

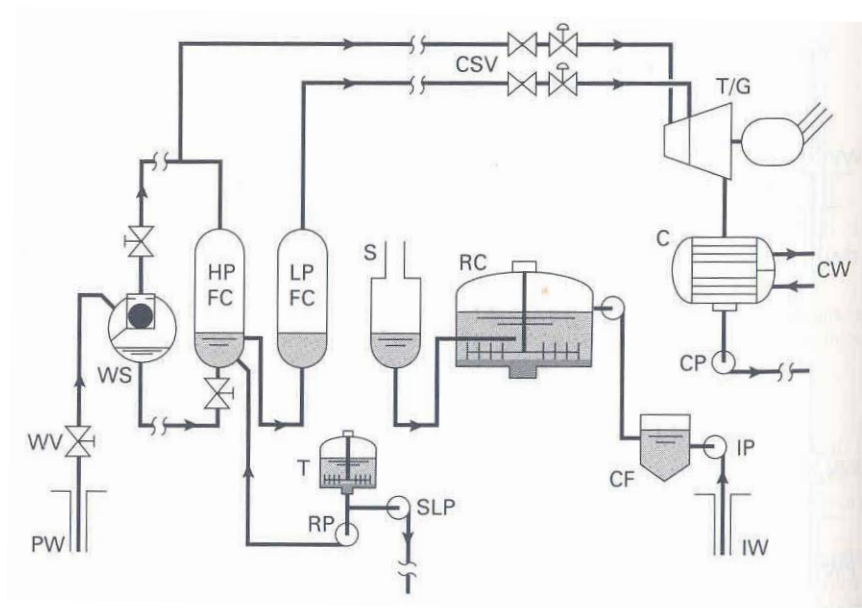
ب- همراه با سیال آب نمک مجزا که برای پیش گرمایش قبل از تزریق استفاده شده است

نیروگاه ترکیبی Single Flash و Double Flash



شکل ۱۰ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمایی طرح Single Flash و Double Flash

نیروگاه ترکیبی Flash Crystalizer and Reactor Clarifier



شکل ۱۱ دیاگرام ساده شده نیروگاه زمین گرمایی نوع Flash Steam با فناوری کنترل کننده Flash Crystalizer and Reactor Clarifier

نیروگاه ترکیبی فسیلی و زمین گرمایی

۵- نحوه عملکرد نیروگاه زمین گرمایی

۶- بررسی اقتصادی نیروگاه زمین گرمایی

۷- علائم اختصاری بکار رفته در دیاگرام نیروگاهها

BCV	Ball-Check Valve	LPPH	Low-Pressure Preheater
BP	Booster Pump	LPT	Low-Pressure Turbine
BT	Binary Turbine	M	Makeup water
C	Condenser	MR	Moisture Remover
CF	Clarifier Filter	OP	Orifice Plate
CP	Condensate Pump	P	(Well) Pump
CS	Cyclone Separator	PH	Preheater
CSV	Control and Stop Valve	PR	Particulate Remover
CT	Cooling Tower	PRV	Pressure-Reducing Valve
CW	Cooling Water	PW	Production Well
CWP	Cooling Water Pump	R	Recuperator
E	Evaporator	RC	Reactor Clarifier
F	Flasher	RP	Recirculating Pump
FF	Final Filter	S	Silencer
G	Generator	SE/C	Steam Ejector/Condenser
GC	Gas Compressor	SH	Superheater
HPE	High-Pressure Evaporator	SLP	Sludge Pump
HPF	High-Pressure Flasher	SP	Steam Piping
HPFC	High-Pressure Flash Crystallizer	SR	Sand Remover
HPPH	High-Pressure Preheater	ST	Steam Turbine
HPT	High-Pressure Turbine	T	Tichener
IP	Injection Pump	T/G	Turbine Generator
IW	Injection Well	TV	Throttle Valve
LPE	Low-Pressure Evaporator	WP	Water Piping
LPF	Low-Pressure Flasher	WS	Wellhead Separator
LPFC	Low-Pressure Flash Crystallizer	WV	Wellhead Valve