



موسسه آموزش عالی انرژی  
دانشکده فنی و مهندسی  
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

**عنوان:**

**پیش بینی درجه خلوص و بررسی پارامترهای تاثیرگذار  
در افزایش راندمان تصفیه آب به روش اسمز معکوس  
با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک**

**استاد راهنما:**

**دکتر آرزو غفاری**

**استاد مشاور:**

**دکتر حیدر مداح**

**پژوهشگر:**

**میکائیل علی پور**

مرداد ۹۷



تاریخ:

شماره:

### تعهد نامه ی اصالت پایان نامه

اینجانب میکائیل علی پور دانش آموخته ی مقطع کارشناسی ارشد ناپیوسته ی که در تاریخ  
از پایان نامه خود تحت عنوان:

پیش بینی درجه خلوص و بررسی پارامترهای تاثیرگذار در افزایش راندمان تصفیه آب

به روش اسمز معکوس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

(۱) با کسب نمره به عدد ( ) و به حروف ( ) و درجه ی

دفاع نموده ام بدین وسیله متعهد می شوم:

(۲) این پایان نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده است و در مواردی که از  
دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان نامه - کتاب - مقاله و...) استفاده نموده ام، مطابق  
ضوابط و رویه موجود نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذکر و درج  
کرده کرده ام.

(۳) این پایان نامه / رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح یا پایین تر یا بالاتر) در سایر  
دانشگاه ها و موسسات آموزش عالی ارایه نشده است.

(۴) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل قصد استفاده و هرگونه بهره برداری اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع  
و ... از پایان نامه داشته باشم، از حوزه ی معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم.

(۵) چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام هیچگونه  
ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی: میکائیل علی پور

تاریخ و امضاء:

پاسکزاری

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیان ساخت.

آنان که ناتوان شدند تا مابه توانایی برسیم...

موباشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا کربان بخش وجود ما و روسمگر را همان باشند...

استادانمان

تقدیم بہ:

خانوادہ، ہمسرو و فرزندان عزیز و مہربانم

و تمام کسانی کہ سعی در کمال من داشتند.

## چکیده :

در این مطالعه، عملکرد پلنت‌های شیرین‌سازی اسمز معکوس با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی بصورت عددی مطالعه گردید. سپس عملکرد این واحد به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه شد. دو متغیر فلاکس (PF) و درصد حذف نمک (RE) به عنوان متغیر خروجی و دمای خوراک، غلظت نمک در خوراک ورودی، دبی خوراک، فشار خوراک به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شد. جهت ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی از ۶۲ داده تجربی در ۳ دسته آموزش صحنه سنجی و تست استفاده شد. نتایج نشان داد دقت پیش بینی به کمک شبکه عصبی مطلوب بوده و میزان مربعات خطا (MSE) برای مدل‌سازی شار عبوری و درصد حذف به ترتیب ۱۲/۴ و ۰/۱۹ همچنین ضریب رگرسیون به ترتیب ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۲ بدست آمد. خطای میانگین مدل‌سازی شار عبوری و درصد حذف نمک به ترتیب ۶/۶٪ و ۲/۲٪ بدست آمد. نتایج بهینه‌سازی دو هدفه نشان داد دو تابع هدف مساله (فلاکس خروجی (PF) و درصد حذف نمک (RE)) با یکدیگر در تضاد هستند. جبهه‌ی پارتو برای شار خروجی PF و درصد حذف RE رسم گردید. این جبهه، بهینه ترین حالت ممکن را برای پلنت شیرین‌سازی به روش اسمز معکوس ارائه می‌کند. در وهله بعد مقدار فلاکس شار و درصد حذف در یکدیگر ادغام شد و یک شاخص کارایی برای عملکرد واحد اسمز معکوس تعریف شد  $(PI = PF(\frac{kg}{m^2h}) \times RE(\%))$ . مقادیر حداکثر شاخص کارایی به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آمد  $(PI_{max}=598.1 \times 105)$  که به ازای غلظت نمک ۵ g/L و دمای ۳۷/۵ °C و دبی ۲۱۵/۵ L/h و فشار ۱۲/۵ bar به حداکثر مقدار این شاخص PI رسیدیم.

نتایج بدست آمده نشان داد افزایش دما و فشار خوراک، شاخص عملکرد PI را برای واحد اسمز معکوس افزایش می‌دهد ولیکن اثر فشار در این مورد بسیار بیشتر از اثر دما است. افزایش دما، سبب کاهش ویسکوزیته سیال شده و اندکی نفوذ و خاصیت تراوش را بهبود می‌بخشد بنابراین فلاکس شار با افزایش دما اندکی بهبود می‌یابد و شاخص PI افزایش می‌یابد. لازم بذکر مطابق نتایج بدست آمده اثر دما در فشارهای بالاتر بیشتر است. نتایج نشان داد اثر غلظت نمک موجود در خوراک نزدیک به اثر فشار است و همچنین افزایش غلظت نمک خوراک سبب کاهش شاخص PI می‌شود.

## کلید واژه:

شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک - مدل‌سازی - پلنت اسمز معکوس - بهینه سازی

## فهرست مطالب

۸	فصل ۱: کلیات پژوهش
۱-۱-۱-۱	مقدمه
۳-۱-۱-۲	اهمیت و ضرورت تحقیق
۴-۱-۱-۳	اهداف تحقیق
۵-۱-۱-۴	کاربردهای شبیه‌سازی در طراحی فرآیند نمک زدایی از آب
۵-۱-۱-۵	کاربرد شبیه‌سازی در بهره‌برداری مطلوب از تأسیسات موجود
۶-۱-۱-۶	سوالات اساسی تحقیق
۷-۱-۱-۷	مدل مفهومی پژوهش و شرح کار
۸-۱-۱-۸	بیان مساله
۹-۱-۱-۹	لغات و اصطلاحات تخصصی
۱۱	فصل ۲: مروری بر مقالات
۱۲-۱-۱-۱	کلیات و دامنه پژوهش
۱۲-۱-۱-۲	موقعیت جغرافیایی
۱۴-۱-۱-۲	وضعیت آب و هوایی
۱۵-۱-۱-۲	بارندگی
۱۵-۱-۱-۲	درجه حرارت
۱۵-۱-۱-۲	باد
۱۶-۱-۱-۲	نم نسبی
۱۶-۱-۱-۲	موقعیت کلی گستره طرح در تقسیمات زمین شناسی ایران
۱۷-۱-۱-۲	مقدمه نمک‌زدایی
۱۷-۱-۱-۲	تاریخچه
۲۱-۱-۱-۲	تأثیرات زیست محیطی
۲۴-۱-۱-۲	تعریف فرآیند نمک‌زدایی
۲۵-۱-۱-۲	نمک‌زدایی با استفاده از روش تقطیر
۲۷-۱-۱-۲	تشریح روش‌های نمک‌زدایی حرارتی
۲۸-۱-۱-۲	تقطیر ساده
۲۹-۱-۱-۲	تقطیر ناگهانی (MSF)
۳۰-۱-۱-۲	نحوه عملکرد فرآیند چند مرحله‌ای تبخیر ناگهانی
۳۳-۱-۱-۲	جریان آب شور
۳۴-۱-۱-۲	جریان بخار کندانس
۳۴-۱-۱-۲	جریان آب تقطیر شده
۳۴-۱-۱-۲	سیستم خلاء
۳۵-۱-۱-۲	سیستم تزریق اسید و ضدکف



۳۷.....	پارامترهای طراحی تبخیر ناگهانی	۷-۲-۱-۱-۳-۲-۲
۴۲.....	مزایا و معایب روش MSF	۸-۲-۱-۱-۳-۲-۲
۴۲.....	سیستم تقطیر چند مرحله‌ای (MED)	۳-۱-۱-۳-۲-۲
۴۶.....	فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای (MED)	۱-۳-۱-۱-۳-۲-۲
۴۶.....	پارامترهای طراحی فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای	۲-۳-۱-۱-۳-۲-۲
۴۹.....	مزایا و معایب روش MED	۳-۳-۱-۱-۳-۲-۲
۵۰.....	اختلاف موجود بین سیستم MSF و MED	۴-۳-۱-۱-۳-۲-۲
۵۰.....	سیستم بخار متراکم VC (Vapor Compression Distillatory)	۴-۱-۱-۳-۲-۲
۵۲.....	مزایا و معایب روش VC	۱-۴-۱-۱-۳-۲-۲
۵۲.....	نمزدایی با استفاده از حرارت پایین‌تر از نقطه جوش	۲-۳-۲-۲
۵۳.....	نمزدایی با استفاده از روش یخ زدن	۳-۳-۲-۲
۵۳.....	نمزدایی با استفاده از مواد شیمیایی رسوب دهنده	۴-۳-۲-۲
۵۴.....	نمزدایی با استفاده از فرآیند تبادل یونی	۵-۳-۲-۲
۵۶.....	تبادل یونی در سیکل سدیم	۱-۵-۳-۲-۲
۵۷.....	بادل یونی در سیکل هیدروژن	۲-۵-۳-۲-۲
۵۷.....	تبادل یونی در سیکل هیدروکسیل	۳-۵-۳-۲-۲
۵۷.....	مشخصات دستگاه‌های تبادل یونی	۴-۵-۳-۲-۲
۵۹.....	نمزدایی با استفاده از فرآیند الکترو دیالیز	۶-۳-۲-۲
۶۱.....	نمزدایی با استفاده از فرآیند اسمز معکوس	۷-۳-۲-۲
۶۵.....	۱-غشاء نیمه تراوا	۱-۷-۳-۲-۲
۶۵.....	تشریح نحوه عملکرد فرآیند غشایی اسمز معکوس	۲-۷-۳-۲-۲
۶۶.....	مبانی فرآیند اسمز معکوس	۱-۲-۷-۳-۲-۲
۶۸.....	پارامترهای طراحی فرآیند اسمز معکوس	۲-۲-۷-۳-۲-۲
۶۹.....	تغذیه فرآیند اسمز معکوس	۳-۲-۷-۳-۲-۲
۷۰.....	متغیرهای فرآیند اسمز معکوس	۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۰.....	شدت جریان‌ها	۱-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۰.....	شدت جریان آب تغذیه	۲-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۱.....	کیفیت آب تولیدی	۳-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۱.....	میزان جداسازی نمک	۴-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۱.....	مواد محلول آلی و غیر آلی	۵-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۱.....	نوع غشاء	۶-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۲.....	pH	۷-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۲.....	شدت جریان	۸-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۲.....	دما	۹-۴-۲-۷-۳-۲-۲
۷۴.....	پیش تصفیه فرایندهای اسمز معکوس	۵-۲-۷-۳-۲-۲
۷۴.....	کنترل جامدات معلق	۱-۵-۲-۷-۳-۲-۲
۷۷.....	کنترل رسوب گذاری	۲-۵-۲-۷-۳-۲-۲

۷۷.....	۳-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل کربنات کلسیم.....
۷۸.....	۴-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل سولفات‌ها.....
۷۹.....	۵-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل سیلیکات.....
۸۰.....	۶-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل سولفید هیدروژن.....
۸۱.....	۷-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل آهن و منگنز.....
۸۲.....	۸-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل مواد آلی.....
۸۳.....	۹-۵-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل گرفتگی بیولوژیکی.....
۸۵.....	۶-۲-۷-۳-۲-۲-پس تصفیه.....
۸۵.....	۱-۶-۵-۷-۳-۲-۲-ضد عفونی.....
۸۵.....	۲-۶-۵-۷-۳-۲-۲-کتترل خوردگی.....
۸۶.....	۳-۶-۵-۷-۳-۲-۲-جداسازی گازها.....
۸۷.....	۷-۲-۷-۳-۲-۲-دفع پسماند.....
۸۷.....	۸-۲-۷-۳-۲-۲-کتترل و ابزار دقیق.....
۸۸.....	۹-۲-۷-۳-۲-۲-تجهیزات سیستم اسمز معکوس.....
۸۸.....	۱-۹-۲-۷-۳-۲-۲-غشاءها.....
۹۴.....	۲-۹-۲-۷-۳-۲-۲-مخازن تحت فشار.....
۹۴.....	۳-۹-۲-۷-۳-۲-۲-پمپ فشار و قوی.....
۹۵.....	۴-۹-۲-۷-۳-۲-۲-واحد بازیافت انرژی.....
۹۶.....	۵-۹-۲-۷-۳-۲-۲-مخازن تهیه محلول‌ها و تزریق کننده‌های مواد شیمیایی.....
۹۶.....	۶-۹-۲-۷-۳-۲-۲-فیلتر.....
۹۶.....	۷-۹-۲-۷-۳-۲-۲-سیستم شستشوی شیمیایی.....
۹۷.....	۱۰-۲-۷-۳-۲-۲-مزایا و معایب روش RO.....
۹۹.....	۴-۲-۲-فرآیند نمک زدایی در مقایسه با سایر منابع تامین آب.....
۱۰۲.....	۵-۲-۲-انتخاب گزینه‌های پیشنهادی فرآیند نمک زدایی.....
۱۰۳.....	۳-۲-۲-مروری بر مقالات گذشته.....

### ۱۰۶ فصل ۳: الگوریتم های هوش مصنوعی

۱۰۷.....	۱-۳-مقدمه.....
۱۰۷.....	۲-۳-شبکه عصبی.....
۱۰۹.....	۱-۲-۳-الهام از طبیعت.....
۱۱۱.....	۲-۲-۳-کاربردهای شبکه‌های عصبی.....
۱۱۵.....	۳-۳-نحوه کار و مدل‌سازی شبکه عصبی.....
۱۱۹.....	۱-۳-۳-توابع انتقال.....
۱۲۰.....	۲-۳-۳-نحوه آموزش شبکه عصبی.....
۱۲۱.....	۴-۳-۳-لگوریتم آموزش شبکه عصبی.....
۱۲۲.....	۴-۳-الگوریتم ژنتیک و تاریخچه آن.....
۱۲۳.....	۱-۴-۳-تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن.....

۱۲۴.....	۳-۴-۲- روند اجرا در الگوریتم ژنتیک.....
۱۲۶.....	۳-۴-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک.....
۱۲۷.....	۳-۴-۳-۱- تابع هدف (تابع شایستگی).....
۱۲۷.....	۳-۴-۳-۲- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک.....
۱۲۸.....	۳-۴-۳- جمعیت و نسلها.....
۱۲۹.....	۳-۴-۴- والدین و فرزندان.....
۱۳۰.....	۳-۴-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک.....
۱۳۱.....	۳-۴-۴-۱- عملگر ترکیب (تلفیق).....
۱۳۲.....	۳-۴-۴-۲- جهش.....
۱۳۴.....	۳-۴-۵- توابع عملیاتی الگوریتمهای ژنتیک.....
۱۳۷.....	۳-۴-۶- مزایای الگوریتم ژنتیک.....
۱۳۹.....	۳-۴-۷- محدودیتهای الگوریتم ژنتیک.....

#### فصل ۴: مدلسازی ۱۴۰

۱۴۱.....	۴-۱- مقدمه.....
۱۴۲.....	۴-۲- بانک اطلاعاتی.....
۱۴۴.....	۴-۳- روش کار.....
۱۴۶.....	۴-۳-۲- مدلسازی فلاکس به کمک شبکه عصبی.....
۱۴۸.....	۴-۴- نتایج مدلسازی فلاکس خروجی به کمک شبکه عصبی.....
۱۵۰.....	۴-۴-۲- نتایج پیش بینی مدل برای کل داده ها(شارعبوری).....
۱۵۱.....	۴-۴-۳- نمودار رگرسیون برای فلاکس عبوری PF.....
۱۵۲.....	۴-۴-۴- نمودار مقایسه ای و هیستوگرام خطا.....
۱۵۴.....	۴-۴-۵- نمودار همگرایی در روند آموزش.....
۱۵۶.....	۴-۴-۶- مدلسازی درصد حذف به کمک شبکه عصبی.....
۱۵۷.....	۴-۵- نتایج مدلسازی مربوط به درصد حذف.....
۱۶۰.....	۴-۶- بهینه سازی دو هدفه.....
۱۶۳.....	۴-۷- پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک.....
۱۶۳.....	۴-۸- نتایج مساله بهینه سازی دو هدفه بصورت جبهه پارتو.....
۱۶۵.....	۴-۹- تعریف شاخص عملکرد برای یک واحد اسمز معکوس.....

#### فصل ۵: جمع بندی و ارائه پیشنهادات ۱۶۹

۱۷۰.....	۵-۱- جمع بندی.....
۱۷۰.....	۵-۲- جمع بندی.....
۱۷۳.....	۵-۳- پیشنهادات برای آیند.....

#### مراجع ۱۷۵

#### پیوست ها ۱۷۸

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) دیاگرام تصفیه آب به روش اسمز معکوس یک مرحله ای..... ۷
- شکل (۱-۲) نمایش موقعیت طرح..... ۱۳
- شکل (۲-۲) واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران، م.ح.نبوی(۱۳۵۵) و موقعیت گستره طرح بر روی آن ..... ۱۶
- شکل (۳-۲) نمایی از یک کارخانه نمکزدایی از آب دریا در شهر پرت استرالیا..... ۲۱
- شکل (۴-۲) فلودیاگرام شماتیک MSF..... ۳۵
- شکل (۵-۲) دیاگرام شماتیک سیستم MED..... ۴۴
- شکل (۶-۲) نمایی از یک کارخانه MED..... ۴۵
- شکل (۷-۲) شمای کلی از یک دستگاه تبادل یونی با رزین کاتیونی و سیستم احیاء به وسیله آب نمک اشباع شده..... ۵۸
- شکل (۸-۲) شمای کلی یک دستگاه الکترودیالیز..... ۶۰
- شکل (۹-۲) نمایش پدیده اسمزی و فشار اسمزی..... ۶۱
- شکل (۱۰-۲) دیاگرام تاسیسات تصفیه آب به روش اسمز معکوس یک مرحله ای..... ۶۲
- شکل (۱۱-۲) مدول هالوفایبر (Hollow Fiber Module)..... ۸۹
- شکل (۱۲-۲) مدول لوله ای (مقطع)..... ۹۰
- شکل (۱۳-۲) مدول حلزونی با جریان محوری..... ۹۰
- شکل (۱۴-۲) مدول حلزونی با جریان آب تصفیه شده خارج از محور..... ۹۱
- شکل (۱۵-۲) دیاگرام شماتیک واحد اسمز معکوس با تغذیه آب دریا..... ۹۸
- شکل (۱۶-۲) شمایی از یک سیستم اسمز معکوس دو مرحله ای برای تصفیه آب..... ۹۹
- شکل (۱-۳) نحوه عملکرد شبکه های عصبی..... ۱۰۷
- شکل (۲-۳) نورو عصبی زیستی..... ۱۱۰
- شکل (۳-۳) لایه ورودی (رنگ سبز) لایه پنهان (رنگ آبی) لایه خروجی (رنگ قرمز) و به همراه یال ها که به هر کدام یک وزن ارتباطی به هر کدام اختصاص داده می شود (ماتریس IW و LW به خوبی نشان داده شده است)..... ۱۱۶
- شکل (۴-۳) ارتباط بین داده ورودی و داده خروجی به کمک ماتریس وزن و بایاس بین لایه ها..... ۱۱۷
- شکل (۵-۳) توابع انتقال پر کاربرد در شبکه عصبی (توابع انتقال  $f_1$  به  $f_2$  بین لایه اول و دوم)..... ۱۱۹
- شکل (۶-۳) نحوه کارکرد شبکه عصبی در یک نگاه به صورت خلاصه..... ۱۲۰
- شکل (۷-۳) فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل مختلف بهینه سازی..... ۱۲۵
- شکل (۸-۳) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک..... ۱۲۶
- شکل (۹-۳) در شکل بالا مفهوم نفر و جمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است..... ۱۲۸
- شکل (۱۰-۳) تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان..... ۱۲۹
- شکل (۱۱-۳) عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته..... ۱۳۱
- شکل (۱۲-۳) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم..... ۱۳۲

- شکل (۳-۱۳) عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته ..... ۱۳۲
- شکل (۳-۱۴) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم ..... ۱۳۳
- شکل (۴-۱) شماتیک سیستم شیرین سازی اسمز معکوس در مقیاس آزمایشگاهی ..... ۱۴۲
- شکل (۴-۲) مراحل مدل سازی و بهینه سازی توابع هدف مورد بررسی در این پژوهش ..... ۱۴۵
- شکل (۴-۳) متغیرهای ورودی و خروجی مدل سازی به کمک شبکه عصبی جهت پیش بینی شار عبوری PF ..... ۱۴۷
- شکل (۴-۴) ساختار شبکه عصبی جهت پیش بینی شار خروجی آب ..... ۱۴۸
- شکل (۴-۵) مقایسه نتایج مدل و شبکه برای شار عبوری ..... ۱۵۰
- شکل (۴-۶) درصد خطای بی بعد شده مدل سازی به کمک شبکه عصبی ..... ۱۵۰
- شکل (۴-۷) نمودار رگرسیون داده مدل و داده واقعی ..... ۱۵۱
- شکل (۴-۸) نمودار مقایسه های داده های مدل و داده تجربی برای دسته ی آموزش ..... ۱۵۲
- شکل (۴-۹) نمودار مقایسه های داده های مدل و داده تجربی برای دسته صحه سنجی ..... ۱۵۳
- شکل (۴-۱۰) نمودار مقایسه های داده های مدل و داده تجربی برای دسته تست ..... ۱۵۳
- شکل (۴-۱۱) نمودار مقایسه های داده های مدل و داده تجربی برای دسته تست ..... ۱۵۴
- شکل (۴-۱۲) متغیرهای ورودی و خروجی مدل سازی شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک RE ..... ۱۵۶
- شکل (۴-۱۳) ساختار شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک خروجی ..... ۱۵۷
- شکل (۴-۱۴) نتایج بدست آمده از مدل سازی و مقایسه آن با نتایج واقعی برای درصد حذف نمک ..... ۱۵۸
- شکل (۴-۱۵) اختلاف نتایج مدل سازی و نتایج (Error=target-output) واقعی بصورت نمودار ساقه ای برای درصد حذف نمک ..... ۱۵۸
- شکل (۴-۱۶) نمودار رگرسیون داده پیش بینی شده برای مدل و داده واقعی برای متغیر درصد حذف نمک ..... ۱۵۹
- شکل (۴-۱۷) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه ..... ۱۶۰
- شکل (۴-۱۸) بهینه سازی به کمک مدل سازی با شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک ..... ۱۶۲
- شکل (۴-۱۹) جبهه بهینه پارتو برای حداکثر سازی فلاکس نفوذ و کمینه سازی درصد حذف نمک ..... ۱۶۴
- شکل (۴-۲۰) اثر دما و فشار خوراک ورودی بر روی شاخص PI واحد اسمز معکوس پیلوت ( $C_{ave}=20 \text{ g/L}$ ) و ( $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$ ) ..... ۱۶۶
- شکل (۴-۲۱) اثر غلظت و فشار خوراک ورودی بر روی شاخص PI واحد اسمز معکوس ( $T_{ave}=29.8$ ) و ( $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$ ) ..... ۱۶۷
- شکل (۴-۲۲) اثر دما و غلظت ورودی بر روی شاخص PI واحد اسمز معکوس پیلوت ( $P_{ave}=10 \text{ bar}$ ) و ( $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$ ) ..... ۱۶۸

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) مقایسه روش‌های موجود نمکزدایی از آب ..... ۱۰۱
- جدول (۲-۲) میزان TDS روش‌های نمکزدایی از آب ..... ۱۰۲
- جدول (۱-۳) جدول داده‌ها مورد استفاده برای مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی ..... ۱۱۶
- جدول (۲-۳) علائم مورد استفاده در بیان مبانی شبکه عصبی مصنوعی ..... ۱۱۸
- جدول (۱-۴) جدول داده‌های ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی به همراه بازه تغییرات آن ..... ۱۴۳
- جدول (۲-۴) تقسیم‌بندی کل داده‌های تجربی جهت استفاده برای ایجاد مدل شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی شار PF و درصد حذف RE ..... ۱۴۳
- جدول (۳-۴) شاخص‌های آماری مورد استفاده در بررسی میزان دقت شبکه عصبی در پیش‌بینی شار و درصد حذف نمک ..... ۱۴۶
- جدول (۴-۴) شاخص‌های آماری بدست آمده از مدل‌سازی فلاکس خروجی به کمک شبکه عصبی مصنوعی (داده نرمال) ..... ۱۴۹
- جدول (۵-۴) ماتریس وزن و بایاس شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش جهت پیش‌بینی راندمان استخراج ..... ۱۵۵
- جدول (۶-۴) ماتریس IW (وزن لایه ورودی) شبکه عصبی جهت پیش‌بینی راندمان استخراج ..... ۱۵۵
- جدول (۷-۴) ماتریس  $b^1$  (بایاس لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش‌بینی راندمان استخراج ..... ۱۵۶
- جدول (۸-۴) ماتریس LW (وزن لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش‌بینی راندمان استخراج ..... ۱۵۶
- جدول (۹-۴) ماتریس  $b^2$  بایاس لایه آخر شبکه عصبی جهت پیش‌بینی راندمان استخراج ..... ۱۵۶
- جدول (۱۰-۴) شاخص‌های آماری بدست آمده از مدل‌سازی درصد حذف نمک به کمک شبکه عصبی مصنوعی ..... ۱۵۹
- جدول (۱۱-۴) توابع هدف درصد حذف و شار عبوری و متغیرهای مستقل ..... ۱۶۱
- جدول (۱۲-۴) قیود مساله بهینه‌سازی (حد بالا و حد پایین متغیرهای مستقل) ..... ۱۶۲
- جدول (۱۳-۴) پارامترهای تنظیمی الگوریتم ازدحام ذرات ..... ۱۶۳
- جدول (۱۴-۴) جدول مقادیر بهینه متغیرهای مستقل به همراه مقدار بهینه شاخص PI ..... ۱۶۵

## **فصل ۱:**

### **کلیات پژوهش**

## ۱-۱- مقدمه

زندگی انسان از بدو پیدایش به آب وابسته بوده است و اصولاً حیات بشر، بدون آب، بی‌معناست. لکن امروزه علیرغم نیاز مبرمی که انسان‌ها به آب دارند، خود باعث آلودگی آن‌اند. علیهذا علیرغم حساسیت‌های سازمان‌های مرتبط همچون محیط زیست، درخصوص عدم آلودگی منابع آب شیرین، سیاست‌های استفاده از آب‌های دریا و لب‌شور برای مصارف صنعتی، کشاورزی و شرب شدت بیشتری گرفته است که لازمه آن استفاده از فناوریهای نمک زدایی می‌باشد. [1,5]

نمک زدایی یا شیرین سازی آب، عبارت است از اعمال چندین مرحله متفاوت بر روی آب شور یا بد مزه جهت زدودن نمک اضافی و بقیه مواد معدنی از آن و یا به عبارتی، نمک‌زدایی شامل زدودن نمک‌ها و مواد معدنی در آب است. در فرآیند نمک‌زدایی آب به گونه‌ای به آب شیرین برگردانده می‌شود که جهت مصرف یا آبیاری مناسب باشد. میتوان گفت شیرین‌سازی، فرآیندی است که مواد معدنی محلول و نامحلول موجود در آب را از آب تغذیه، مانند آب دریا، آب‌های لب‌شور و پساب خارج می‌کنند.

در گذشته اهداف کارخانه نمک‌زدایی آب، کاهش نمک، کاهش مواد معلق و زدودن عوامل بیماری‌زای موجود در آب بود که با روش‌های متداول فیلتراسیون و گندزدایی قابل دستیابی بوده‌اند. اما با افزایش غلظت مواد نیتروژنه، مواد آلی و معدنی و فلزات سنگین به منابع آب، روش‌های متعارف جوابگوی نیاز تصفیه‌خانه‌ها نبوده و لازم شد از فرآیندهای جدیدی در نمک‌زدایی استفاده گردد. [6]



به طور کلی پنج فناوری نمک زدایی در تمام دنیا معمول هستند که مورد استفاده قرار

می گیرند. این فناوری ها عبارتند از: [1,5]

- فرآیند چند مرحله ای تبخیر ناگهانی (MSF)<sup>۱</sup>
- فرآیند تقطیر چند مرحله ای
- فرآیند تراکم بخار
- اسمز معکوس<sup>۲</sup>
- الکترودیالیز معکوس شونده

سه فرآیند اول، تحت عنوان فرآیندهای حرارتی و دو فرآیند اسمز معکوس و الکترودیالیز

معکوس شونده با عنوان فرآیندهای غشایی دسته بندی می شوند.

تصفیه آب به روش اسمز معکوس (RO) از گروه فرآیندهای غشایی، با مدلسازی لازم

توسط شبکه های عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> (ANN) در جهت پیش بینی و بهبود عملکرد فرآیند که در

این پژوهش مد نظر است [7,8]، روشی مدرن و در عین حال مقرون به صرفه برای حذف

آلودگی ها و ناخالصی های محلول در آب و همچنین بهینه سازی در خصوص افزایش

راندمان حذف نمک و افزایش دبی خروجی خالص می باشد.

---

<sup>1</sup> Multi Stage Flash Distillation

<sup>2</sup> Reverse Osmosis(RO)

<sup>3</sup> Artificial Neural Network (ANN)

## ۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

امروزه اکثر کشورها به دلایلی همچون افزایش جمعیت، بالا رفتن استانداردهای زندگی و مصارف بی‌رویه مخصوصاً در بخش کشاورزی و تجاری با کمبود آب آشامیدنی با شاخص کیفی مناسب مواجه هستند. شیرین‌سازی آب به روش اسمز معکوس به عنوان یک منبع تامین آب می‌تواند مشکل فزاینده کمبود آب در منطقه را حل کند. در چند سال آینده، تامین امنیت آب آشامیدنی برای جمعیت رو به رشد به هدفی مهم برای سازمان آب کشور تبدیل خواهد شد. به همین منظور نیاز به مدلی که بتواند این رفتار را پیش بینی نماید ضروری است.

از طرفی نادرست فاضلاب‌های شهری، مصرف بی‌رویه مواد شوینده، استفاده از کودهای شیمیایی و ... از جمله دلایل اصلی آلودگی آب آشامیدنی به موادی مانند نیترات است که اثرات منفی شان حداقل ۱۵ سال بعد از مصرف آشکار خواهد شد [6]. وجود مواد خطرناک در آب خصوصاً برای نوزادان و زنان باردار عوارض جبران ناپذیری را در پی خواهد داشت و سرمنشا بسیاری از سرطان‌ها خواهد بود، بنابراین شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل اینکه محدودیت‌های مدل‌های مبتنی بر معادلات حاکم بر فرایند را دارا نمی‌باشد و قادر به پیش بینی رفتار در شرایط پیچیده هستند در این تحقیق ملاک عمل قرار خواهد گرفت. مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، مبتنی بر داده‌های واقعی ارائه شده در این تحقیق قادر خواهد بود تا بدون صرف هزینه و زمان، عملکرد غشاء را در شرایط مختلف ارزیابی نماید.

### ۱-۳- اهداف تحقیق

- هدف علمی: بررسی پارامترهای متغیر و وابسته اسمز معکوس توسط هوش مصنوعی.
- هدف کاربردی: کمک به مهندسين جهت مدل‌سازی، طراحی و بهینه سازی پلنت‌های شیرین سازی آب با نرم افزارهای هوش مصنوعی.

از اهداف اصلی این پژوهش، میتوان میتوان به بندهای زیر اشاره نمود.

- ۱- ساخت مدل شبکه عصبی جهت پیش بینی شار عبوری ( $PF^1$ )
  - ۲- ساخت مدل شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک ( $RE^2$ )
  - ۳- بهینه کردن هدفه جهت به حداکثر رساندن فلاکس و به حداکثر رساندن درصد حذف نمک.
  - ۴- هدف: استخراج شرایط بهینه بهره برداری از پلنت اسمز معکوس به کمک الگوریتم ژنتیک
- ابتدا به کمک داده تجربی، ۲ مدل شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک و پیش بینی حداکثر شار خروجی آب خالص ساخته می شود سپس به کمک الگوریتم ژنتیک این دو بهینه می شوند.
- بدیهی است بدلیل دو هدفه بودن مساله بهینه سازی جواب بهینه بجای یک نقطه، یک منحنی بنام جبهه پارتو است. در نهایت عملکرد مدل شبکه عصبی و دقت آن در پیش بینی نتایج بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک، به کمک شاخص های آماری محاسبه میگردد.

---

**1** Permeate Flux

**2** Rejection Factor

## ۴-۱- کاربردهای شبیه‌سازی در طراحی فرآیند نمک زدایی از آب

امروز به نحوه گسترده‌ای از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در طراحی فرایند استفاده می‌شود [8]. کاربردهای این نرم‌افزارها در این حوزه از حیث گستردگی کار از محاسبه ساده خصوصیات ترموفیزیکی جریان‌ها یا حتی مواد خالص شروع شده و به طراحی کارخانه‌ها به صورت کامل با در نظر گرفتن تأسیسات جانبی، خطوط لوله تأمین خوراک، یا انتقال محصول و بررسی سیستم‌های کنترل می‌رسد. از آنجا که این روش از محاسبات دستی ساده‌تر، سریع‌تر و دقیق‌تر است، با تکرار آن در شرایط مختلف به سهولت و با صرف زمان بسیار کمتری می‌توان مجموعه کاملی از عملکرد فرآیند در حالت‌های مختلف را پیش‌بینی کرده و از این طریق، ضمن کاهش هزینه‌های اضافی سرمایه‌گذاری ثابت (دستگاه‌های اضافی) و کاستن از هزینه‌های عملیاتی (مصرف آب، انرژی و ...)، قابلیت انعطاف بیشتری را در طرح فرآیند به وجود آورده و نقطه بهینه از لحاظ هزینه‌ها، روانی عملیات، ایمنی، محیط‌زیست و نیرو را به دست آورد.

## ۵-۱- کاربرد شبیه‌سازی در بهره‌برداری مطلوب از تأسیسات موجود

در کارخانه‌های موجود با کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌توان فرایند تولید را مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار داده و از این طریق، به طور کلی عملیات را بهبود بخشید. در صورتی که از نرم‌افزارهای پیشرفته‌تر استفاده شود، امکان بهینه‌سازی درجا بر اساس شرایط تولید (مانند دمای خوراک و شرایط اقلیمی) نیز وجود دارد. یکی از کاربردهای مؤثر رایانه در صنایع، شبیه‌سازی واحدهای تولیدی به وسیله نرم‌افزارهای خاص است. به طور سنتی پژوهش درباره روش‌ها یا سیستم‌های جدید تولید به کمک واحدهای پیش‌تاز انجام گرفت. اما نظر به هزینه زیاد ساخت و نگهداری واحدها، از

چندین سال پیش، فکر استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی برای کاستن از این هزینه ها مطرح شده است. با به کارگیری این نرم افزارها می توان تنها این کاربردها گسترش بیشتری یافته بلکه استفاده از منابع این کار با سرعت بیشتری قورت می گیرد.

## ۱-۶- سوالات اساسی تحقیق

در این پژوهش ما بدنبال پاسخ به سوالات زیر هستیم :

ا- چرا به دنبال استفاده از مدل سازی هستیم؟ استفاده از هوش مصنوعی تا چه اندازه می تواند در تخمین شار خروجی و درصد حذف نمک موفق باشد و میزان خطای مدل سازی بدین روش چقدر است؟

ب- آیا امکان بهینه سازی فرآیند نمزدایی اسمز معکوس فراهم است؟ شرایط بهینه برای کارکرد بهینه پلنت شیرین سازی چگونه است؟ آیا الگوریتم ژنتیک قادر است شرایط را بهینه را استخراج کند؟

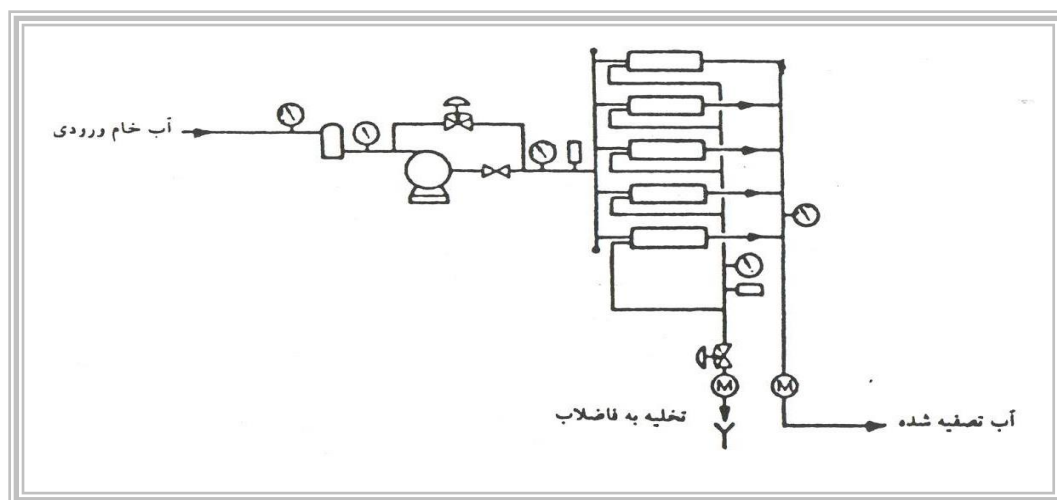
ج- در اسمز معکوس چه عواملی بر روی کیفیت آب خروجی تاثیر (غلظت نمک، فشار، دبی و دما...) دارد؟

د- میزان تاثیر هر کدام از متغیرهای مستقل (غلظت نمک، دما، دبی، فشار) بر روی متغیرهای وابسته (میزان شار و درصد حذف) چگونه است؟

به منظور بررسی سوالات فوق، غلظت خوراک، دمای خوراک، دبی ورودی و فشار آب هر یک به طور جداگانه بررسی شده و تاثیر هر کدام به تنهایی مشخص می گردد. برای بررسی این پارامترها، از داده های واقعی در نرم افزار متلب استفاده شده است.

## ۱-۷- مدل مفهومی پژوهش و شرح کار

بعد از آبیگری از دریا یا چاه‌های ساحلی با آنالیز آب مشخص، واحدهای فیلتراسیون کار تصفیه را انجام می‌دهند و آب خام بدست آمده وارد تانک ذخیره می‌شود. سپس آب خام ذخیره شده در تانک، توسط پمپ حاضر در مدار به واحدهای اسمز معکوس پمپاژ می‌شود [5,6]. (شکل ۱-۱) در این میان تمام مشخصات ورودی و خروجی ثبت می‌گردد.



شکل (۱-۱) دیاگرام تصفیه آب به روش اسمز معکوس یک مرحله ای

پس از ثبت اطلاعات، در جهت داشتن مدل رفتاری فرآیند نمک‌زدایی بر اساس داده‌های واقعی تهیه شده (پیوست ۱-۱)، مدل شبکه عصبی تهیه می‌شود. این مدل به واسطه تغییرات در ۴ پارامتر اندازه‌گیری شده از آب خام ورودی (دبی، فشار، غلظت نمک و دما) و بررسی اثرات آنها در ۲ پارامتر خروجی (دبی خالص و درصد حذف نمک)، مشخص می‌شود. در فصل بعد به تشریح کامل فرآیندهای نمک‌زدایی پرداخته شده است. پس از مدل‌سازی توسط شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی عملکرد و تعیین رفتار پلنت‌های شیرین‌سازی آب، نتایج برای بهینه‌سازی فرآیند به الگوریتم ژنتیک ارسال شده تا بهترین نقطه بهینه مشخص شود.

## ۸-۱- بیان مساله

هدف این پژوهش در وهله اول معرفی و پیش‌بینی عملکرد پلنت‌های شیرین‌سازی اسمز معکوس<sup>۱</sup> با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی است. در این راستا درصد حذف نمک<sup>۲</sup> (RE) و دبی (فلاکس جرمی) آب تصفیه شده<sup>۳</sup> (PF) به کمک شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه<sup>۴</sup> (MLP) پیش‌بینی می‌گردد. از شاخص‌های آماری متداول مانند میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (MSE) و ضریب رگرسیون<sup>۶</sup> ( $R^2$ ) و میزان درصد میانگین خطای مطلق<sup>۷</sup> (MAPE) برای محاسبه خطا و میزان دقت مدل شبکه عصبی استفاده خواهد شد. برای این کار از داده‌های تجربی (پیوست ۱-۱)، بمنظور ساخت و ایجاد مدل ریاضی شبکه عصبی استفاده می‌شود. مدل شبکه عصبی یک مدل داده‌محور است بنابراین بدون داده تجربی قادر به مدل‌سازی نخواهد بود. در واقع از داده تجربی جهت آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. بعد از آموزش شبکه عصبی با ارزیابی میزان خطای مدلسازی به کمک داده‌های تست، می‌توان از عملکرد مدل شبکه عصبی اطمینان خاطر حاصل کرد، سپس در وهله بعد می‌توان به کمک مدل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، پارامتر خروجی شبکه عصبی را بهینه‌سازی نمود و شرایط کارکرد بهینه و مناسب را برای پلنت‌های آب شیرین‌کن اسمز معکوس بدست آورد.

در این پژوهش منظور از بهینه‌سازی، در واقع به حداکثر رساندن درصد حذف نمک

<sup>۱</sup>RO (Reverse Osmosis)

<sup>۲</sup>Rejection Factor

<sup>۳</sup>Permeate Flux

<sup>۴</sup>Multi Layer Perceptron (MLP)

<sup>۵</sup>Mean Square Error

<sup>۶</sup>Correlation Coefficient

<sup>۷</sup>Mean Absoulte Percentage Error

(RE) و به حداکثر رساندن دبی آب تصفیه شده (PF) بطور همزمان است. لازم بذکر است این دو تابع هدف ما با یکدیگر در تضاد هستند و بهبود در مقدار یکی، سبب نامطلوب شدن تابع هدف دیگری، می شود بنابراین لازم است تا یک بهینه سازی دو هدفه انجام گیرد تا بطور همزمان هر دو تابع هدف بهینه گردد.

جهت ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی از ۶۲ داده تجربی در ۳ دسته آموزش صحنه سنجی و تست استفاده خواهد شد.

سپس به کمک ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، متغیر فلاکس جریان (PF) و درصد حذف نمک (RE) بصورت توأمان بهینه می شوند. نتایج بهینه سازی در قالب جبهه پارتو و یک جدول ارائه خواهد شد.

## ۹-۱- لغات و اصطلاحات تخصصی

مدل سازی :

فرایند تلاش در مسیر ایجاد و انتخاب معادله های ریاضی برای پدیده ها را مدل سازی

ریاضی گویند.

شبکه عصبی :

شبکه های عصبی از عناصر عملیاتی ساده ای ساخته می شوند که به صورت موازی در کنار

هم عمل می کنند. این عناصر از سیستم های عصبی زیستی الهام گرفته شده اند. در طبیعت،

عملکرد شبکه های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می شود.



## اسمز:

اسمز پدیده‌ای است که در اکثر فرآیندهای بیولوژیکی رخ می‌دهد، دیواره سلول‌ها به مواد مغذی و پس مانده‌های تولیدی اجازه عبور می‌دهند، در حالی که به برخی از مواد اجازه نمی‌دهند. در این موارد دیواره سلول به عنوان یک غشای نیمه تراوا عمل می‌کند. اسمز، زمانی رخ می‌دهد که دو محلول با غلظت‌های متفاوت توسط یک غشای نیمه تراوا از هم جدا شده باشند.

## اسمز معکوس:

چنانچه تعادل ایجاد شده بین آب خالص و آب نمک با اعمال فشار فیزیکی (پمپ) در سمت آب نمک از میان برود، آب خالص از طرف آب نمک، از غشاء عبور می‌کند و به سمت محفظه آب خالص می‌رود که این جریان آب از سمت آب نمک محفظه به طرف محفظه آب خالص را اسمز معکوس می‌نامند.

اسمز معکوس فرآیندی فیزیکی است که می‌توان از محلولی به کمک یک غشا نیمه تراوا،

حلال تقریباً خالص تهیه کرد.

## فصل ۲:

### مروری بر مقالات

## ۲-۱- کلیات و دامنه پژوهش

این بخش از سه قسمت تشکیل شده که عبارتند از :

قسمت اول : که در آن خلاصه ای از موقعیت جغرافیایی، اقلیمی و توپوگرافی منطقه بیان شده است.

قسمت دوم : که در آن روش‌های متداول فرآیند نمک‌زدایی آب تشریح و سپس گزینه‌های مختلف فرآیندی برای نمک‌زدایی از آب دریای عمان پیشنهاد می‌گردد.

قسمت سوم : مروری بر مقالات و مطالعات پیشین

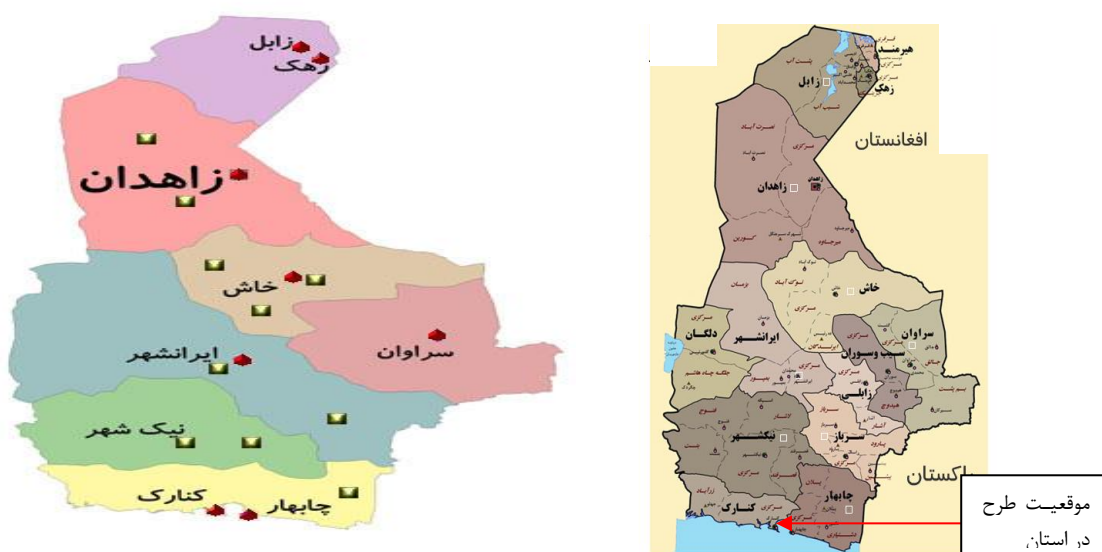
هدف از تهیه این بخش از پایان نامه ارائه گزینه‌های مختلف تامین آب شرب بوده و دامنه آن نیز شهرهای جنوبی کشور منجمله چابهار، کنارک و دریای عمان می‌باشد.

### ۲-۱-۱- موقعیت جغرافیایی

کارخانه فرآیند نمک‌زدایی از آب جنوب در استان سیستان و بلوچستان و در کنار دریای عمان و در منطقه کنارک چابهار است. دریای عمان از شمال به کشور ایران، از شرق به جزیره دکن و از غرب به شبه جزیره عربستان محدود بوده و از جنوب با اقیانوس هند مرتبط است. این دریا نسبتاً عمیق می‌باشد و عمق آن در حوالی بندر چابهار حدود ۳۴۰۰ متر می‌رسد.

استان سیستان و بلوچستان با وسعت حدود ۱۸۷۵۰۲ کیلومتر مربع معادل ۱۱/۵ درصد مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان بین ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است و از شمال به استان خراسان جنوبی، از جنوب به دریای عمان، از شرق به کشورهای

افغانستان و پاکستان و از غرب به استان های هرمزگان و کرمان محدود شده است. براساس تقسیمات کشوری این استان دارای ۱۴ شهرستان، ۳۶ مرکز شهری، ۴۰ بخش، ۱۰۲ دهستان و ۸۹۰۸ آبادی کددار می باشد. شهرستان کنارک با مساحتی بالغ بر ۱۱۵۶۷ کیلومتر و به مرکزیت شهر کنارک می باشد. کل جمعیت آن ۶۷۵۸۲ نفر است که از این تعداد ۴۲۱۳۹ نفر در روستا و ۲۵۴۴۳ نفر در شهر زندگی می کنند. در مورد وجه تسمیه این شهر آنچه که بر سر زبان ها باقی مانده این است که در این مکان درختان کنار زیادی یافت می شده که به همین علت این شهر کوچک بندری به کنارک معروف گشت. کوههای این استان جزء رشته کوههای مرکزی ایران است و شامل ناهمواریهای مشرق چاله لوت و ارتفاعات دیواره شرقی و جنوبی چاله جازموریان می باشد. ارتفاعات مهم این استان عبارتند از کوه تفتان، کوه بزمان، کوه بیرک، ملک سیاه کوه کوههای بم پشت و کوههای خواجه و رودخانه های هیرمند، بمپور، سرباز، باهوکلان، کهیر، ماشکل، فنوج و تهلاب از جمله رودخانه واقع در استان سیستان و بلوچستان می باشند. [5]



شکل (۱-۲) نمایش موقعیت طرح

## ۲-۱-۲- وضعیت آب و هوایی

کنارک دارای آب و هوای گرم و مرطوب است. هوای آن در اوج گرمای تابستان به علت وزش باد های موسمی "مونسون" معتدل می باشد. این منطقه گرمترین نقطه کشور در زمستان می باشد. داشتن چنین اقلیمی باعث شده است که محصولات کشاورزی فراوانی هم چون چیکو، پاپایا، موز، کنار، انبه، زیتون محلی، بادام و هندوانه در آن کشت شود.

عمده سیستم های آب و هوایی که منطقه مطالعاتی طرح را تحت تاثیر قرار می دهند از سمت غرب، جنوب غربی و جنوب شرقی وارد می شوند و اثر سیستم هایی که منشاء آن از سمت دریای سیاه و یا سبیری می باشند بر روی این منطقه کمتر دیده می شود. به طور کلی توده های هوایی که منطقه مطالعاتی را تحت تاثیر قرار می دهند به تفکیک در فصول مختلف سال به شرح زیر خلاصه می شوند:

تابستان: بری تروپیکال (از منشاء فلات مرکزی ایران) و بحری تروپیکال (از اطلس)، مدیترانه و مانسون (از سمت اقیانوس هند) می باشند.

زمستان: مدیترانه ای (از محور غربی)، بری تروپیکال (از سمت جنوب غربی صحرا ی عربستان)، به ندرت بری قطبی (از مبداء سبیری) و بحری قطبی (از شمال غرب و غرب).

بدیهی است توده های هوایی که از قطاع جنوب غربی، غرب و جنوب شرق به منطقه می رسند اکثراً سبب ایجاد بارندگی در محدوده کارخانه می شوند. در این پژوهش با به توجه با محل کارخانه فرآیند نمزدایی در نزدیکی ایستگاه سینوپتیک کنارک و وسعت کم محدوده طرح، از اطلاعات این ایستگاه هواشناسی در مطالعات هواشناسی طرح استفاده شده است. [5]

## ۲-۱-۳- بارندگی

متوسط سالانه بارندگی حدود ۹۷ میلی متر است که بیش از ۶۰ درصد از آن در فصل زمستان اتفاق می افتد. در این میان ماه بهمن بیشترین بارش ماهانه را دارا است.

## ۲-۱-۴- درجه حرارت

این منطقه جزو مناطق گرم کشور محسوب می شود. در این منطقه میانگین حداکثر دما از ۲۶ درجه سانتیگراد در دی ماه تا ۳۸ درجه سانتیگراد در خرداد ماه در نوسان است. همچنین میانگین دمای ماهانه از ۱۹ تا ۳۳ درجه سانتیگراد تغییر می نماید. همچنین میانگین حداقل دمای منطقه از ۱۲ تا ۲۸ درجه سانتیگراد در نوسان است.

## ۲-۱-۵- باد

باد، حاصل گرادیان یا اختلاف فشار بین توده های هوا می باشد. سرعت باد علاوه بر اختلاف در میدان فشار، به شرایط فیزیکی و توپوگرافیک سطح زمین نیز وابسته است. در مطالعات، مورد اصلی استفاده از اطلاعات باد، تعیین مشخصات امواج در محدوده پروژه است. ضمن اینکه مشخصات باد، مبنای اصلی انجام محاسبات خیزاب ناشی از طوفان می باشد. از اطلاعات باد سنجی ایستگاه سینوپتیک نزدیکی کارخانه آب شیرین کن استفاده شده است. سرعت باد ماهانه و سالانه در دو ارتفاع ۲ متری و ۱۰ متری، میانگین سرعت سالانه باد به ترتیب ۳ و ۳/۸۲ متر بر ثانیه می باشد. در یک نگرش کلی می توان گفت باد غالب منطقه باد جنوب غربی و غرب است.

شکل (۲-۲) واحدهای  
ساختمانی-رسوبی ایران،  
م.ح.نبوی (۱۳۵۵) و موقعیت  
گستره طرح بر روی آن

## ۲-۲- مقدمه نمک زدایی

نمک زدایی عبارت است از اعمال چندین مرحله متفاوت بر روی آب شور یا بد مزه جهت زدودن نمک اضافی و بقیه مواد معدنی از آن و یا به طور کلی تر نمک زدایی شامل زدودن نمک ها و مواد معدنی در آب است. در فرآیند نمک زدایی آب به گونه ای به آب شیرین برگردانده می شود که جهت مصرف یا آبیاری مناسب باشد. بعضی از مواقع محصول فرآیند نمک زدایی، فرآوردن نمک خوراکی است که این فرآورده در بسیاری از کشتی ها و زیر دریایی ها مورد استفاده قرار می گیرد. بیشترین توجه در نمک زدایی بر روی راه های موثر تهیه آب شیرین در نواحی دارای محدودیت دسترسی به آب، متمرکز شده است. در این بخش به تفصیل درباره تاریخچه و روش های متداول فرآیند نمک زدایی از آب پرداخته می شود.

## ۲-۲-۱- تاریخچه

در حال حاضر بزرگترین کارخانه نمک زدایی در جهان کارخانه نمک زدایی جبل علی (فاز ۲) در امارات متحده عربی است. این کارخانه یک تسهیل کننده دو منظوره می باشد و از فناوری MSF<sup>۱</sup> استفاده می کند و قادر بر تولید ۳۰۰ میلیون مترمکعب آب در هر سال است. بزرگترین طرح نمک زدایی در ایالات متحده در Tampa-Bay فلوریدا قرار دارد که ۲۵ میلیون گالن آب در هر روز نمک زدایی می کند. این کارخانه ۱۲٪ بازده کارخانه جبل علی را داراست. [1]

بر طبق گزارش شرکت بین المللی نمک زدایی در Wall Street Journal در ۱۷ ژانویه



۲۰۰۸ در کل جهان ۱۳۰۸۰ کارخانه نمک‌زدایی بیش از ۱۲ بیلیون گالن آب در هر روز تولید می‌کنند.[3]

از ماه جولای سال ۲۰۰۴ عمده ترین روش مورد استفاده روش اسمز معکوس بوده که ۸۵٪ تولید کل جهان را به خود اختصاص داده است.

در روش‌های سستی آب در فشار کمتر از اتمسفر به جوش می‌آید و بنابر این در دمای کمتر از دمای جوش قرار می‌گیرد، چون جوش زمانی اتفاق می‌افتد که فشار بخار برابر با فشار اعمال شده باشد و فشار بخار با درجه حرارت افزایش می‌یابد بنابر این چون دما کاهش می‌یابد انرژی ذخیره می‌شود.

فرآیند غشایی از غشاهای نیمه تراوا و فشار استفاده می‌کند تا بتواند نمک را از آب جدا نماید. سیستم‌های غشایی معمولاً از انرژی‌های پایین‌تر از انرژی تقطیر حرارتی استفاده می‌کنند که باعث کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی در ده سال اخیر شده است. نمک‌زدایی انرژی زیادی مصرف می‌کند و قطعاً اقتصاد آینده نمک‌زدایی به قیمت انرژی و تکنولوژی نمک‌زدایی وابسته است.

در ۲۶ دسامبر ۲۰۰۷ یک پروفیسور هسته‌ای و مهندس پرتوشناسی در مجله Atlanta Journal of Constitution نوشت، راکتورهای هسته‌ای می‌توانند جهت تولید مقدار زیادی آب شیرین استفاده شوند. پیش از آن، این فرآیند در نقاط زیادی از جهان همچون، هند، ژاپن و روسیه استفاده شده است. تنها در ژاپن ۸ راکتور هسته‌ای در امر نمک‌زدایی فعالیت می‌کنند. این کارخانه‌ها منبع تولید مقادیر عظیمی از آب شیرین در جزیره ژاپن هستند.

در نواحی نزدیک دریا مانند پکن، بانکوک، زاراگوزا، فونیکس و یک شهر ساحلی نظیر

تریپولی هزینه انتقال حذف می‌شود و فقط هزینه شیرین‌سازی باقی می‌ماند ولی در منطقه جبیل در عربستان سعودی آب پس از نمک‌زدایی دویست مایل (۳۲۰ کیلومتر) پمپ می‌شود تا به ریاض برسد. برای شهرهای ساحلی، به تدریج، نمک‌زدایی به یک منبع لایزال تامین آب تبدیل می‌شود. [2]

در حال حاضر، فلسطین اشغالی آب را با هزینه‌ای معادل ۰/۵۳ دلار آمریکا برای هر متر مکعب شیرین می‌کند. این مبلغ در سنگاپور معادل ۰/۴۳ دلار می‌باشد. در بسیاری از کشورهای پیشرفته هزینه شیرین‌سازی با هزینه تامین و انتقال آب از سایر منابع متعارف مقایسه می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد در سیدنی هزینه شیرین کردن آب شور از جمع‌آوری آب باران و ایجاد زیر ساخت‌های گسترده آن ارزان‌تر تمام می‌شود.

در بندر پرت استرالیا از سال ۲۰۰۶ تولید آب شیرین با استفاده از روش اسمز معکوس با موفقیت انجام شده است و دولت استرالیای غربی اعلام کرده است که فاز دوم این پروژه به زودی برای رفع نیازهای شهر پرت راه‌اندازی خواهد شد. همچنین واحدهای دیگری برای شهرهای بزرگی چون سیدنی، ونتاگی و ویکتوریا در آینده نزدیک ساخته خواهند شد.

بخشی از انرژی مورد نیاز واحد نمک‌زدایی شهر پرت از انرژی باد و از محلی به نام

Emu Downs Wind Farm تامین می‌شود.

در سیدنی تمام انرژی مورد نیاز نمک‌زدایی از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود. بنابر این در این واحدها گازهای گلخانه‌ای در طبیعت آزاد نمی‌شوند ولی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری اولیه و در بعضی موارد هزینه‌های نگهداری را نیز افزایش می‌دهند. هرچند که تجربیات جدید در سیدنی و پرت نشان می‌دهد هزینه‌های اضافی ناشی از تامین

انرژی از منابع تجدیدپذیر از نظر جوامع قابل قبول است. بنابر این یک شهر می‌تواند بدون وارد آوردن صدمه‌ای به محیط زیست ذخایر آبی را افزایش دهد. دولت محلی کوئینزلند جدیداً طرح نمک‌زدایی را در سواحل طلایی اعلام کرده است که انرژی مورد نیاز این طرح کاملاً توسط منابع تجدید پذیر تامین خواهد شد.

در دسامبر ۲۰۰۷ دولت استرالیای جنوبی اعلام کرد که در حال طراحی یک واحد نمک‌زدایی آب دریا برای شهر آدلاید می‌باشد. هزینه این طرح به طور کامل از محل افزایش قیمت آب تامین می‌شود. یک نظر سنجی غیر رسمی نشان می‌دهد که نزدیک به ۶۰٪ افراد بر تولید سریع آب از طریق افزایش هزینه‌های آن اتفاق نظر دارند.

وال استریت ژورنال در مقاله ای در ۱۷ ژانویه ۲۰۰۸ اعلام کرد که شرکت Connecticut Based Poseidon Resources Corp برنده ساخت یک کارخانه نمک‌زدایی آب شده است که ارزش آن ۳۰۰ میلیون دلار آمریکا می‌باشد. محل این واحد در کارلسباد در شمال سان‌دیه‌گو است. این پروژه که بزرگترین پروژه در نیم کره غربی محسوب می‌شود قادر است روزانه ۵۰ میلیون گالن (۱۹۰۰۰۰ مترمکعب) آب آشامیدنی در هر روز جهت فراهم کردن آب مورد نیاز حدود ۱۰۰۰۰۰ خانوار را تامین کند.

مجله فوربس در مقاله‌ای در ۹ مه ۲۰۰۸ عنوان نموده است که شرکت Energy Recovery در سن لیندرو در کالیفرنیا آب را با قیمت ۰/۴۶ دلار آمریکا شیرین می‌کند.

بر طبق مقاله ۵ ژوئن ۲۰۰۸ مجله Globe and mail یک دانشجوی اردنی دانشگاه اوتاوا به نام محمد رسول تکنولوژی جدیدی جهت نمک‌زدایی ابداع کرده است که مدعی است بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ درصد کارآمدتر از تکنولوژی‌های رایج است. بر طبق همین مقاله، شرکت جنرال

الکتریک به دنبال تکنولوژی مشابهی می‌باشد و بنیاد ملی علوم آمریکا اعتباری را برای تحقیق بر روی این موضوع در اختیار دانشگاه میشیگان قرار داده است. در شکل (۲-۳) می‌توان نمایی از یک کارخانه نم‌زدایی از آب دریا در شهر پرت استرالیا را مشاهده نمود.



شکل (۲-۳) نمایی از یک کارخانه نم‌زدایی از آب دریا در شهر پرت استرالیا

## ۲-۲-۲- تأثیرات زیست محیطی

یکی از ملاحظات مهم در مورد آب شیرین‌کن‌ها نحوه تامین آب شور ورودی واحد نم‌زدایی به ویژه در مواردی که آب شیرین‌کن با یک نیروگاه ترکیب شده است، می‌باشد. علیرغم این که نحوه تامین آب شور ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زندگی موجودات دریایی دارد ولی در بسیاری از واحدهای نم‌زدایی این موضوع مورد غفلت واقع شده است. تخمین زده می‌شود که نود درصد جانوران دریایی موجود در آب ورودی، اعم از پلانکتون‌ها، تخم و

لارو ماهی‌ها، در حین فرآیند شیرین‌سازی از بین روند. برای حل این مشکل یک راه حل وجود دارد و آن هم تامین آب مورد نیاز از طریق چاه‌های ساحلی است که فاقد جانوران دریایی هستند. در طرح حاضر برای کاهش اثرات زیست محیطی آبیگری بصورت استفاده از چاه ساحلی است.

مسئله زیست محیطی دیگری که در مورد آب شیرین‌کن‌ها مطرح است مسئله نشر گازهای گلخانه‌ای است. در همه واحدهای نمک‌زدایی صرف نظر از این که از چه فناوری برای شیرین‌سازی استفاده می‌شود، مسئله پساب شور خروجی مسئله دیگر زیست محیطی است. این ماده غلیظ بر اساس تقسیم‌بندی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا به عنوان یک پساب صنعتی شناخته شده است. در نواحی ساحلی می‌توان بدون این که نگران تغییر در غلظت نمک اقیانوس‌ها بود این پساب را به دریا بازگرداند. ولی در مورد روش اسمز معکوس به علت این که غلظت پساب دو برابر آب دریا است ممکن است باعث تغییر در غلظت نمک دریاها شود و به خصوص در مورد گونه‌هایی که در اعماق اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند این تغییرات باعث تهدید حیات آن‌ها شود. در حال حاضر مشکل اصلی در نواحی است که دفع پساب شور باعث وارد آمدن آسیب جدی به محیط زیست به ویژه سفره‌های آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌شود و از سوی دیگر دفع صحیح این پساب باعث افزایش هزینه‌های شیرین‌سازی می‌شود.

برای به حداقل رساندن آثار زیان‌بار زیست محیطی بازگرداندن پساب شور به دریاها آن را با جریان‌های دیگر آب، مثلاً پساب نیروگاه‌ها یا ...، رقیق می‌کنند. اگر نیروگاه متوسط یا بزرگ باشد و واحد نمک‌زدایی کوچک باشد، حجم آب واحد خنک‌کننده نیروگاه چند برابر

پساب شور خواهد بود و به راحتی می‌توان آن را رقیق نمود. روش دیگر برای به حداقل رساندن آسیب‌های زیست محیطی پساب شور رها کردن آن در سطح وسیعی از دریا است به این ترتیب که پساب به چند بخش تقسیم شده و در قسمت‌های مختلف دریا رها می‌شوند.

پساب شور می‌تواند در بعضی از نواحی آسیب‌های جدی به محیط زیست وارد نماید، به عنوان مثال در مناطقی که میزان شفافیت پایین و سرعت تبخیر بالا است. خلیج فارس، دریای احمر، لاگون‌ها و جزایر مرجانی و سایر جزایر گرمسیری مثال‌های از این مناطق هستند. به علت این که پساب شور چگال‌تر از آب دریا است، اکوسیستم بستر دریاها در معرض خطر بیشتری نسبت به سایر مناطق قرار دارد. دقت در رها سازی این پساب می‌تواند آسیب‌ها را به حداقل برساند. به عنوان مثال در یک واحد نمک‌زدایی که در اواخر ۲۰۰۷ در سیدنی استرالیا ایجاد گردید، خروجی پساب در نقطه‌ای از اقیانوس ایجاد گردید که حداکثر پخش پساب در دریا انجام شود به گونه‌ای که در فاصله ۵۰ تا ۷۵ متری از محل خروجی پساب هیچ تفاوتی با آب دریا مشاهده نمی‌شود. شرایط اقیانوس شناختی سیدنی این شانس را به وجود آورده است که رقیق سازی پساب به آسانی و به سرعت انجام می‌شود و در نتیجه آسیب به محیط زیست به حداقل می‌رسد. در پرت استرالیا و در سال ۲۰۰۷ یک واحد نمک‌زدایی ساخته شد که با انرژی باد کار می‌کند و آب را با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه به درون دستگاه می‌مکد. این سرعت پایین به ماهی‌ها اجازه فرار می‌دهد. ظرفیت تولید این واحد ۱۴۰۰۰۰ متر مکعب در روز است.

## ۲-۲-۳- تعریف فرآیند نمک زدایی<sup>۱</sup>

هر فرآیندی که بوسیله آن غلظت املاح آب‌های شور یا لب شور به اندازه‌ای کاهش یابد که برای مصارف مختلف انسانی، حیوانی، صنعتی یا هر مصرف پیش‌بینی شده دیگر مناسب شوند، نمک‌زدایی نامیده می‌شود. به عبارت دیگر نمک‌زدایی فرآیندی است که مواد معدنی محلول و نامحلول موجود در آب را از آب تغذیه، مانند آب دریا، آب‌های لب شور و پساب خارج می‌کند. روش‌های نمک‌زدایی بر اساس قوانین حاکم بر فرآیند، به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: [5]

- ۱- بر اساس تغییرات فیزیکی درحالت‌های آب
- ۲- فرآیندهای حرارتی و منجمدسازی
- ۳- فرآیندهای غشایی همچون اسمز معکوس و الکترودیالیز معکوس شونده

همچنین روش‌های اصلی فرآیند نمک‌زدایی به شرح زیر است:

- نمک‌زدایی با استفاده از روش تقطیر<sup>۲</sup>
- نمک‌زدایی با استفاده از حرارت پایین‌تر از نقطه جوش
- نمک‌زدایی با استفاده از روش یخ زدن
- نمک‌زدایی با استفاده از مواد شیمیایی رسوب دهنده
- نمک‌زدایی با استفاده از فرآیند تبادل یون<sup>۳</sup>
- نمک‌زدایی با استفاده از فرآیند الکترودیالیز
- نمک‌زدایی با استفاده از فرآیند اسمز معکوس

---

<sup>۱</sup> - Desalination or Desalting

<sup>۲</sup> - Distillation

<sup>۳</sup> - Ion Exchange

به طور کلی پنج فناوری نمک زدایی در تمام دنیا معمول هستند و عموماً مورد استفاده

قرار می گیرند. این فناوری ها عبارتند از:

- فرآیند چند مرحله ای تبخیر ناگهانی
  - فرآیند تقطیر چند مرحله ای
  - فرآیند تراکم بخار
  - اسمز معکوس
  - الکترودیالیز معکوس شوونده
- سه فرآیند اول، تحت عنوان فرآیندهای حرارتی و دو فرآیند اسمز معکوس و الکترودیالیز معکوس شوونده با عنوان فرآیندهای غشایی دسته بندی می شوند. [5,6]

## ۲-۲-۳-۱- نمک زدایی با استفاده از روش تقطیر

این روش قدیمی ترین راهی است که از آن آب شور دریاها را به آب شیرین تبدیل می کردند. تهیه آب شیرین به روش تقطیر را می توان به کمک انرژی حرارتی که به صورت مختلف (سوخت های فسیلی، الکتریکی و خورشیدی) قابل تامین است، انجام داد. از این جهت برای شیرین کردن آب هایی که یک تا  $\frac{6}{3}$  درصد نمک دارند و برای مقادیر کم و یا زیاد اجراپذیر می باشد. با توجه به اینکه درجه حرارت تبخیر املاح موجود در آب خیلی بالاست، می توان با حرارت دادن به آب، جزء آب را بخار نمود که در این صورت نمک ها باقی می مانند. به طور کلی در این روش سه مرحله زیر وجود دارد:

- ایجاد بخار با حرارت دادن به آب
  - جدا کردن بخار
  - میعان بخار
- سیستم تقطیر ساده شامل دو محفظه بوده که محفظه اول به عنوان تبخیر کننده است.



بدین معنی که آب درون آن بخار شده و از آن خارج می‌گردد و وارد محفظه دوم شده که کندانسه می‌شود. در این سیستم به ازاء هر کیلوگرم بخار داده شده کمی کمتر از یک کیلوگرم آب تولید خواهد شد. در سیستم تقطیر چند مرحله‌ای راندمان چند برابر سیستم تقطیر یک مرحله‌ای است. در روش تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای بر اثر کم کردن فشار محیط کار مقداری بخار به صورت ناگهانی تولید می‌شود. در این روش راندمان بالا و تعداد مراحل نیز زیاد است (معمولاً ۲۰ تا ۴۰ مرحله) که تغییرات درجه حرارت در آنها مجموعاً حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد یعنی هر مرحله ۲-۴ درجه سانتی گراد است.

در این روش غلظت پساب شور خروجی (Brine) به بیشتر از ۶۰۰۰۰ mg/lit می‌رسد و TDS آب تولیدی حدود ۵ mg/lit خواهد شد. ایجاد رسوب و خوردگی تبخیر کننده‌ها که به علت حرارت زیاد سیستم حاصل می‌شود از اهم مشکلات این روش است. علاوه بر آن هزینه سرمایه گذاری و راهبری سیستم‌های تقطیر زیاد بوده و بدلیل خورنده بودن آب تقطیر شده اضافه نمودن مقداری بیکربنات کلسیم به آن ضروری است.

وجود سوخت‌های مایع و روغن‌ها، خطر بالقوه‌ای است که باید تاسیسات نمک‌زدایی را به نحوی از آن دور داشت و یا اینکه از ورود آنها به محل مورد نظر جلوگیری کرد. در این روش پساب حاصل از دستگاه‌ها را که غلظت نمک آنها نزدیک به دو برابر آب دریا است را باید با آب خنک کننده رقیق کرد و به نحو مطلوب دفع نمود. این پساب چون اصولاً حاوی مس است، بهتر است در یک فاصله مناسب (حدود ۳۰۰ متر) از ساحل تخلیه گردد. دودکش تخلیه گازها که سرعت گاز در آنها نیز زیاد است، باید مرتفع ساخته شوند. سولفور موجود در گاز خروجی از دودکش‌ها اهمیت زیادی دارد که می‌بایست جهت رفع آلودگی پیش بینی‌های

لازم را مد نظر قرار داشت.

## ۲-۲-۳-۱-۱- تشریح روش‌های نم‌زدایی حرارتی

با توجه به بالا بودن دمای تبخیر املاح موجود در آب با حرارت دادن آن جزء آب را بخار نموده و از نمک‌های محلول در آن جدا می‌کنند. جداسازی آب از املاح موجود در آن، به وسیله بخار کردن آب و کندانس مجدد آن را تقطیر می‌گویند. آب شور به دو روش تبخیر می‌گردد، یکی کم کردن فشار (Flashing) و دیگری حرارت دادن و جوشاندن آن (Boiling).

در یک سیستم تقطیر سه مرحله زیر وجود دارد:

الف) تشکیل بخار با حرارت دادن به آب

ب) جمع‌آوری و جداکردن بخار از بقیه قسمت‌ها

ج) میعان بخار و بازیافت حرارت آن

در یک دستگاه تقطیر، آب به جوش آمده و بخار می‌شود و پس از چگالش این بخار، آب خالص تولید می‌شود. هرچند در سطح دریا آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به جوش می‌آید اما در شرایط خلأ، آب می‌تواند در درجه حرارت پایین نیز به جوش آمده و تبخیر شود. اکثر فرآیندهای نمک‌زدایی تقطیری از این پدیده طبیعی استفاده می‌کنند.

عمده‌ترین واحدهای تقطیر عبارتند از:

- تقطیر ساده
- تقطیر ناگهانی<sup>۱</sup> (MSF)

<sup>۱</sup> - Multi Stage Flashing

- تقطیر چند مرحله‌ای<sup>۱</sup> (MED)

- بخار متراکم<sup>۲</sup> (VC)

## ۲-۲-۳-۱-۲- تقطیر ساده

این سیستم از دو محفظه تشکیل شده که هر کدام در داخل یک شل قرار دارند. در محفظه اول که تبخیر کننده نام دارد، در اثر ورود بخار میعان در اطراف لوله های محفظه اوپراتور، مقداری بخار از آب ورودی آب دریا تولید می گردد، بخار تولید شده از محفظه اول اوپراتور خارج شده وارد شل محفظه دوم می شود و در اطراف لوله های این محفظه کندانس می گردد. عمل کندانس شدن در اثر انتقال حرارت بخار به آب که در داخل لوله ها جریان دارد انجام شده و در نتیجه باعث گرم شدن آب می گردد. آب خارج شده از این محفظه (Stage) به دو قسمت تقسیم می شود. یک قسمت به عنوان جریان خنک کننده از سیستم خارج گردیده و مابقی وارد محوطه تبخیر کننده می شود. برای این که در محفظه اول یا تبخیر کننده عمل انتقال حرارت بین بخار خارج از لوله و آب داخل آن انجام پذیر باشد باید درجه حرارت بخاری که خارج لوله کندانس می شود بیشتر از درجه حرارت آب داخل لوله باشد و چون هرچه درجه حرارت بیشتر باشد گرمای نهان تبخیر کمتر است، در نتیجه گرمای نهان تبخیر آب داخل لوله بیش از گرمای نهان تبخیر بخار خارج از لوله بوده و در نهایت برای تولید یک کیلوگرم بخار در درجه حرارت کمتر احتیاج به بیش از یک کیلوگرم بخار می باشد. به عبارت دیگر به ازاء هر کیلوگرم بخار داده شده به سیستم کمی کمتر از یک کیلوگرم آب مقطر به دست می آید.

<sup>۱</sup> - Multi Effect Distillation

<sup>۲</sup> - Vapor Compression Distillatory

## ۲-۲-۳-۱-۱-۱- تقطیر ناگهانی (MSF)

یک فرآیند چند مرحله‌ای تبخیر آب است که با استفاده از جوشش کار می‌کند. روش کار بدین صورت است که آب گرم شده را به مخازنی با فشار کم هدایت می‌کنند، وقتی آب به فضایی رسید که فشار بسیار کمی دارد به این علت که قبلاً از منبع حرارتی مقداری گرما کسب کرده به صورت ناگهانی تبخیر می‌شود.

هر چند مصرف انرژی این دستگاه‌ها بسیار بالا بوده و دمای کارکرد بالا نیز باعث می‌شود ر سوب‌گذاری در این دستگاه‌ها افزایش یابد، اما به دلیل امکان طراحی آن در ظرفیت‌های بالا هنوز سهم قابل توجهی از تولید آب به روش حرارتی را به خود اختصاص داده است. تبخیر به معنای ایجاد حرارت برای تغییر حالت و تولید ذرات جامد معلق بدون بخار در آب تغذیه<sup>۱</sup> است. کندانس کردن بخار، محصولی کاملاً خالص به دست می‌دهد. این تکنیک که به Flash Distillation نیز معروف است، در سطح جهانی در کنار نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جهت تامین آب شیرین استفاده می‌شود. ۸۰٪ از ظرفیت آب دریا را که برای این منظور به کار گرفته می‌شود بهره‌برداری می‌گردد و از مزایای این روش تولید آب شیرین در حجم بالا می‌باشد. از آنجاییکه اوپراتورها در سیستم در دما/فشار پایین کار می‌کنند، لذا برای کارخانه‌های نم‌زدایی از آب این امکان وجود دارد که از حرارت‌های تلف شده نیروگاه استفاده نمایند. لذا بدین جهت هنگامیکه کارخانه نم‌زدایی از آب در منطقه خاورمیانه در اندازه بزرگ ساخته می‌شود معمولاً مدل MSF انتخاب می‌شود.

<sup>۱</sup> - Feed Water

## ۲-۲-۳-۱-۱-۲-۱- نحوه عملکرد فرآیند چند مرحله‌ای تبخیر ناگهانی

در فرآیند MSF، جوشش در توده مایع اتفاق می‌افتد. ساختارهای متفاوتی برای MSF وجود دارد اما در مجموع، یک سیستم MSF شامل سه بخش است: بخش دفع حرارت، بخش بازیافت حرارت، بخش ورودی حرارت. بخش‌های دفع و بازیافت حرارت شامل تعداد مشخصی از محفظه‌های تبخیر ناگهانی است که به هم مرتبط می‌باشند.

آب تغذیه وارد بخش دفع حرارت می‌شود. این بخش (پیش گرم کن مرحله اول) از گرمای آزاد شده در طول مدت فرآیند چگالی برای پیش گرم کردن آب تغذیه استفاده می‌کند. پس‌اب چرخشی که به وسیله اختلاط بخشی از آب جبران و مقدار عظیمی از پس‌اب باقی‌مانده از مرحله قبل به وجود آمده است، به صورت ثقلی به داخل لوله‌های بازیافت حرارت هدایت می‌شود. در بخار بازیافت حرارت، پس‌اب در حین عبور از هر مرحله و ورود به مرحله بعد، توسط گرمای آزاد شده از فرآیند چگالی پیش گرم می‌شود، به بیان دیگر پس از طی آخرین مرحله آب وارد پیش گرم‌کن مرحله سوم می‌شود و در آنجا درجه حرارتش به وسیله بخار حرارت اشباع مایع بالارفته و وارد بخار بازیافت حرارت می‌شود.

در این مرحله، آب تغذیه خروجی از پس پیش گرم کردن مرحله سوم، از طریق یک روزنه به اولین مرحله از بخار بازیافت حرارت وارد می‌شود. در مرحله بازیافت حرارت، آب تغذیه ورودی، بخار می‌شود و می‌توان بخار خالصی با فشار بسیار کم تولید نمود. سپس بخار در امتداد قطره گیر حرکت می‌کند که در آنجا قطرات مایع حاوی نمک باقی مانده در بخار، جدا و بخار روی لوله‌های خنک، چگالیده و سپس جمع‌آوری می‌شود.

سرانجام قسمتی از پس‌اب باقی مانده از مرحله آخر، دوباره بازیافت شده و به همراه آب

جبرانی وارد لوله‌های بخش دفع حرارت می‌شود. جریان پساب نهایی در فرآیندهای MSF می‌تواند یک طرفه (دفع پساب به دریا) و یا چرخشی (بازیافت بخشی از پساب) باشد. توضیحات ارائه شده در بالا مربوط به حالت چرخشی بود.

در این سیستم، تمام پساب باقی مانده در مرحله آخر مجدداً وارد دریا می‌شود. این بدین معنا است که در این سیستم پساب نهایی بازیافت نمی‌شود و مرحله اول دفع حرارت از فرآیند حذف شده است. دفع حرارت در این سیستم‌ها به دلیل اختلاف درجه حرارت آب تغذیه، پساب خروجی و بخارهای نمک‌گیری شده اتفاق می‌افتد.

در این فرآیند، آب دریا در جایی به نام Brine Heater گرم می‌شود. به طور کلی، این فرآیند از طریق کندانس شدن بخار در مجاورت تعداد زیادی لوله که از Brine Heater می‌گذرند و آب دریا را گرم می‌کنند، صورت می‌گیرد. سپس آب دریای گرم شده به درون مجرای دیگری سرازیر می‌شود که به آن مرحله یا Stage می‌گویند. در هر مرحله درجه حرارت طوری است که آب، به محض ورود شروع به جوشیدن می‌کند. وارد شدن ناگهانی و بسیار سریع آب به داخل این محفظه باعث می‌شود به سرعت بجوشد، طوری که تقریباً حالت انفجاری پیدا می‌کند و دفعتاً تبدیل به بخار می‌شود، کلاً در صد بسیار کمی از این آب به بخار تبدیل می‌شود (بخار آب)، و این مساله به فشار موجود در هر مرحله بستگی دارد، زیرا عمل جوشیدن تا مرحله سرد شدن آب تا نقطه اشباع (تامین حرارت لازم برای تبخیر) ادامه می‌یابد. عمل دفعی آب به بخار هنگامی صورت می‌گیرد که آب شور داغ شده در محفظه‌ای که فشار آن پایین‌تر از فشار آب شور ورودی است، به حالت غلیان و انفجاری در بیاید.

بخار حاصله با کندانس شدن روی لوله‌های مبدل حرارتی که از داخل هر مرحله

می‌گذرند، به آب شیرین تبدیل می‌شود. این لوله‌ها به وسیله آب دریایی که به سمت Brine Heater می‌روند، خنک می‌شود. همین مساله، از سوی دیگر، باعث داغ شدن آب دریا می‌شود، طوری که میزان انرژی گرمایی مورد نیاز در Brine Heater برای داغ کردن آب دریا کاهش پیدا می‌کند. نکته بسیار مهم و حائز اهمیت در فرآیند تقطیر به روش MSF این است که فرآیند مذکور از خلاء پایین (Low Vacuum) در مرحله اول آغاز شده و به خلاء بالا (High Vacuum) در مرحله آخر، ختم می‌شود. این تغییر فشار در هر یک از مرحله‌ها اصلی‌ترین نکته روش MSF است.

تقطیر آب با استفاده از ابزاری که با فشار پایین کار می‌کنند، روش تازه‌ای نیست و حداقل بیش از یک قرن است که از آن استفاده می‌شود. در دهه ۵۰ قرن بیستم، یک واحد متشکل از مرحله‌های مختلف که در آنها به ترتیب فشار اتمسفر یک کاهش پیدا می‌کرد، طراحی شد. در این واحد، آب دریا از یک مرحله به مرحله دیگر می‌رود و بدون افزایش دما، مرتباً جوشیده می‌شود. یک واحد MSF می‌تواند شامل ۴ تا ۴۰ مرحله باشد.

ساخت تجاری واحدهای MSF از دهه ۵۰ شروع شده و معمولاً در ظرفیت‌های  $m^3/d$  ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ ( $mgd$  ۸ تا ۱) ساخته می‌شوند. واحدهای MSF معمولاً با حداکثر دمای ورودی ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد (۱۹۴ تا ۲۴۹ درجه فارنهایت) پس از Brine Heater کار می‌کنند. یکی از فاکتورهایی که بر راندمان حرارتی واحد تأثیر می‌گذارد، تفاوت درجه حرارت بین Brine Heater و کندانسور تا قسمت سرد پایانی واحد است. بهره‌برداری از واحد MSF با درجه حرارت ۱۲۰ درجه و نزدیک به آن (۲۴۸ درجه فارنهایت) طبعاً راندمان واحد را افزایش می‌دهد، ولی از طرفی باعث افزایش ایجاد رسوبات و پوسته‌های زیان‌آور و خوردگی

سطوح فلزی واحد خواهد شد. بنابراین به منظور افزایش طول عمر بهره‌برداری از واحد باید ایجاد رسوبات زیان‌آور را در سطوح فلزی کند یا متوقف کرد. این مهم به وسیله یک سیستم تصفیه شیمیایی که در ادامه توضیح آن آورده خواهد شد، انجام می‌شود. [5]

## ۲-۲-۱-۱-۳-۲-۲- جریان آب شور<sup>۱</sup>

آب فیلتر شده دریا به طرف لوله‌های کندانسور مراحل دفع حرارت، پمپاژ شده و خارج می‌شود. آب سرد دریا با گذر از لوله‌های کندانسور، حرارت را در مراحل پایانی توزیع می‌کند. مقداری از آب دریا به عنوان آب جبرانی ذخیره شده و مابقی آن به دریا فرستاده می‌شود سپس آب جبرانی به منظور دفع گازهای غیرقابل کندانس هوازدایی شده و بعد از آن برای کنترل رسوبات با اسید سولفوریک تصفیه می‌شود. آب هوازدایی شده به قسمت Brine (آب شور) مرحله پایانی وارد شده و با جریان آب شور مخلوط می‌شود. مخلوط آب شور مجدداً وارد سیکل شده و آب هوازدایی شده به سمت لوله‌های کندانسور مراحل بازیافت حرارتی و Brine Heater پمپاژ می‌شوند.

به منظور حفظ تعادل و کنترل حداکثر غلظت آب شور، بخشی از آب شور غلیظ در مرحله آخر بلودان<sup>۲</sup> وارد دریا می‌شود. میزان جریان بلودان به وسیله میزان سطح آب شور در مرحله نهایی کنترل می‌شود. همچنان که آب شور از لوله‌های کندانسور هر مرحله عبور می‌کند، گرمتر می‌شود. پس از آن، آب شور از لوله‌های Brine Heater عبور می‌کند تا مراحل نهایی

<sup>۱</sup> -Brine/Circulating Water Flow

<sup>۲</sup> -Blow down



گرم شدن تا حداکثر درجه طراحی را (یعنی ۱۱۰ درجه سانتی گراد) طی کند. آب شور گرم شده سیکل به سمت پوسته مرحله اول برای Flashing وارد می شود. جریان آب شور در هر مرحله بخار شده (به صورت پاششی) و از آخرین مرحله خارج می شود. [5]

### ۲-۲-۳-۱-۱-۳-۲-۲- جریان بخار کندانس

برای گرم کردن جریان آب شوری که از لوله های Brine Heater می گذرد، از بخار کم فشار استفاده می شود. بخار کم فشار به درون پوسته Brine Heater فرستاده می شود و با انتقال حرارتش به جریان آب شور، روی سطح بیرونی لوله ها کندانس می شود. بنابراین، آب شور به همین ترتیب، تا رسیدن به حداکثر درجه حرارت طراحی (یعنی ۱۱۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد) گرم می شود. آب کندانس شده ای که در اثر کندانس شدن بخار تولید می شود، از طریق پمپ های کندانسور به سیستم برگردانده می شود. [5]

### ۲-۲-۳-۱-۱-۴-۲-۲- جریان آب تقطیر شده

در هر مرحله آب مقطر از طریق کندانس شدن بخار آب شور، در لوله های کندانسور تشکیل می شود. آب تقطیر شده در مخزن هر یک از مرحله ها (که در واقع بین تمام مراحل مشترک است) ذخیره شده و از اینجا آب شیرین شده به طرف سیستم ذخیره آب پمپاژ می شود.

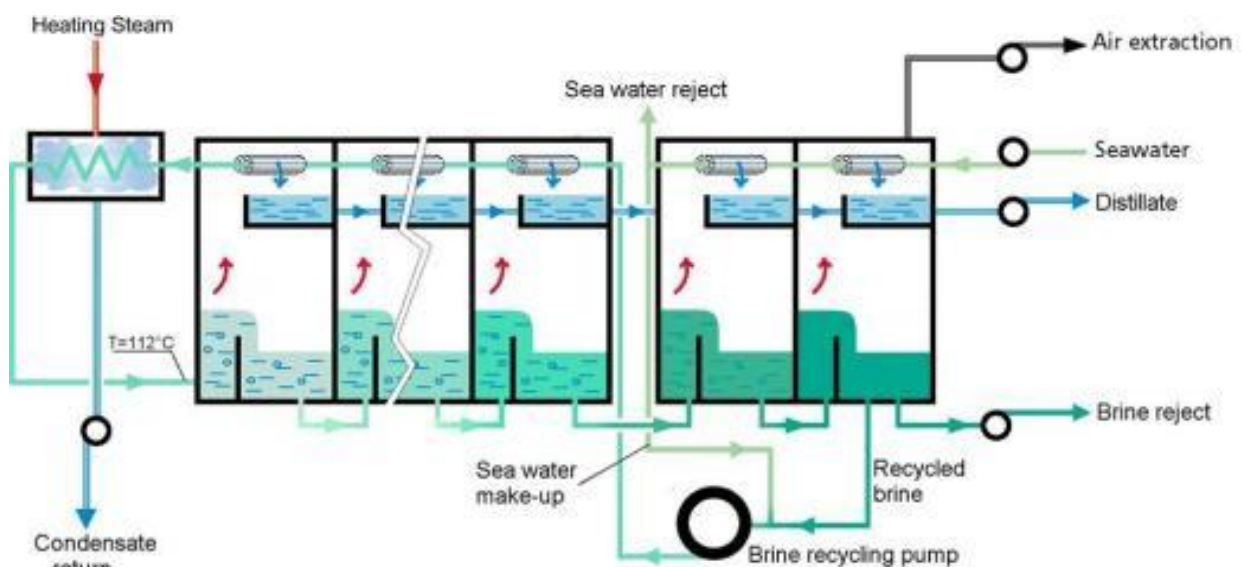
### ۲-۲-۳-۱-۱-۵-۲-۲- سیستم خلاء

بخار فشار بالا برای به کار انداختن اژکتورها و به منظور تولید خلاء ابتدایی مورد نیاز اوپراتور وقتی که واحد در حالت بهره برداری نرمال است، مورد استفاده قرار می گیرد. خلاء مورد نیاز از طریق عمل کندانس در هر مرحله و به کمک اژکتورها صورت می پذیرد. وظیفه

دیگری که ازکتورها برعهده دارند تخلیه مواد غیرقابل کندانس از اوپراتورهاست. بخار فشار بالای مصرفی و مواد غیرقابل کندانس از ازکتورها به درون کندانسورها وارد می شوند. در آنجا بخار کندانس می شود و مواد غیرقابل کندانس نیز به فضای بیرونی فرستاده می شوند. [5]

## ۲-۲-۱-۱-۳-۲-۲-۶- سیستم تزریق اسید و ضدکف

به منظور خنثی کردن عوامل ایجاد رسوب که آب دریا موجود هستند، مقدار مشخصی اسید سولفوریک مرتباً به جریان آب جبرانی تزریق می شود. این کار برای جلوگیری از ایجاد رسوبات مضر در لوله های هر مرحله و همچنین لوله های کندانس Brine Heater انجام می شود. به علاوه می توان میزان مشخصی مواد ضد کف نیز برای کاهش کف ورودی به مخزن اوپراتور به داخل آب دریا تزریق کرد. شکل (۲-۴) فلودیگرام شماتیک از این سیستم را نشان می دهد، که در آن ورود آب دریا، مبدل حرارتی بخار، طبقات مختلف تبخیر و کندانس و موارد دیگر به نمایش درآمده است.



شکل (۲-۴) فلودیگرام شماتیک MSF

در این روش TDS آب دریا با غلظت نمک ۷۰-۶۰ ppm هزار به آب شیرین که دارای ppm بسیار کم می باشد تبدیل و کاهش عظیمی در غلظت نمک ایجاد می کند. مدل MSF بین دو دما دمای بالایی آب نمک (دمای خروجی brine heater) و دمای آخرین مرحله کار می کند.

دمای بالایی به عوامل زیر بستگی دارد:

- کیفیت بخار موجود
  - روش جلوگیری از رسوب
  - غلظت آب نمک و طبیعت نمکهای حل شده
  - دمای مرحله آخر به عوامل زیر بستگی دارد:
  - دمای داخلی آب خنک کاری
  - فشار مطلق، که در آخرین مرحله به وسیله سیستم اژکتور نگه داشته می شود.
- در عمل، واحد MSF برای نسبت های بهره برداری متفاوت طراحی می شود (تناژ آب بر تناژ بخار تغذیه شده برای گرم کردن آب نمک زدایی) حد بالای نسبت بهره برداری ۱۲:۱ برای این مدل آب شیرین کن عملی می باشد. بدیهی است که نسبت تولید یک واحد MSF تابع مستقیمی از جریان تبخیر دفعی آب شور و حدود دمایی تبخیر دفعی (دمای بالای آب شور- دمای آخرین مرحله) می باشد.

هر چند که تعداد مراحل برای فضای مورد نیاز مبدل حرارتی برای بهبود حرارتی محاسبه می شود. تعداد زیاد مراحل باعث کاهش مجموع فضای مورد نیاز مبدل حرارتی می شود. بهمین دلیل تعداد مراحل که در این نوع از تأسیسات وجود دارد انتخاب ما را آنگونه محدود می نماید که تنها یک نوع خاص و یا ویژه را در بر می گیرد. در عمل هر چند می توان گفت که تعداد مراحل با افزایش نسبت بهره برداری افزایش پیدا می کند، اما به ظرفیت نیروگاه بستگی دارد.

## ۲-۲-۳-۱-۱-۲-۷- پارامترهای طراحی تبخیر ناگهانی

هر یک از فرآیندهای حرارتی دارای ملاحظات و پارامترهای متفاوتی در طراحی هستند که بر عملکرد فرآیند واحد اثر می‌گذارند. در فرآیند MSF آب دریا با فشاری کمتر از فشار اشیاع، وارد اولین تبخیر کننده شده و تبخیر می‌شود، سپس بخار حاصل چگالیده شده و تا دمای اشیاع و فشار محفظه خنک می‌شود. این متغیرها و ثابت‌های عملکردی به عنوان پارامترهای موثر بر طراحی یک واحد MSF در ادامه شرح داده خواهند شد.

### ۱- حداکثر درجه حرارت پساب

حداکثر درجه حرارت پساب، نقش بسیار مهمی در تعیین عملکرد یک واحد MSF دارد. کارایی واحد معمولاً به صورت نسبت عملکرد بیان می‌شود که عبارتست از نسبت دبی محصول تولیدی به دبی بخار ورودی به دستگاه. چنانچه حداکثر دمای پساب از یک حد مشخص بالاتر رود سبب بروز مشکلاتی در سیستم می‌شود. حداکثر دمای پساب کاملاً به مواد شیمیایی، غلظت پساب و نوع پیش تصفیه به کار رفته وابسته است. چنانچه در سیستم از پلی فسفات به عنوان ضد رسوب استفاده شود، حد بالای دما ۹۰ درجه سانتیگراد است، در برخی موارد که از افزودنی‌های مقاوم کننده در برابر دما استفاده می‌شود، حداکثر دما می‌تواند تا ۱۲۱ درجه سانتیگراد هم بالارود ولی به طور کلی برای سیستم MSF حداکثر دمای پساب در حدود ۱۱۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود. همچنین اگر حداکثر دمای پساب از مقدار معینی کمتر شود، ممکن است اختلاف فشار مراحل غیر مؤثر شود، این امر باعث استخراج ناقص گازهای غیرقابل چگالش از سیستم شده در نتیجه دوام سیستم کاهش می‌یابد و همچنین منجر به مشکلات ناشی از خوردگی در سمت بخار می‌شود. [5]

## ۲- نرخ جریان پساب بازیافتی

نرخ جریان پساب بازیافتی، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که می‌تواند بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. افزایش نرخ جریان پساب بازیافتی، باعث افزایش تولید پساب می‌شود. اما متقابلاً بر نسبت عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد. همچنین نرخ جریان پساب بازیافتی، میزان سرعت جریان ورودی در داخل لوله‌های کندانسور را تعیین می‌کند. سرعت پساب، نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری و دفع رسوبات دارد. اگر نرخ جریان پساب بازیافتی کم باشد، آب‌بندی بین مراحل کافی نخواهد بود. در این حالت عملیات واحد نامتعادل شده و کارایی بشدت افت می‌کند. بنابراین به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از رسوب و ته‌نشینی که بر اثر سرعت کم پساب در بخش ورود حرارت ممکن است اتفاق بیفتد، از یک حد ثابت پائینی برای نرخ جریان پساب بازیافتی استفاده می‌کنند. اگر نرخ جریان پساب بازیافتی بالا باشد، آب تولیدی ممکن است آلوده شود (به علت اختلاط با آب تغذیه) و این امر به خاطر ایجاد سرریز است. همچنین حد بالایی نرخ جریان پساب بازیافتی به منظور جلوگیری از فرسایش سائیدگی و خوردگی باید تحت کنترل قرار گیرد. معمولاً در عمل واحد با نرخی نزدیک به حد بالای نرخ جریان پساب بازیافتی راه‌اندازی می‌شوند.

## ۳- نرخ جریان آب دریا

آب دریا پس از عبور از فیلتر و حذف ذرات معلق وارد لوله‌های کندانسور آب شیرین‌کن می‌شود. آب ورودی باید عاری از هرگونه موجودات زنده باشد. در صورتی که برای از بین بردن موجودات زنده از کلر استفاده شود بایستی مقدار کلر تزریقی به خروجی پمپ‌های آبگیر به مقدار ۲ الی ۳ میلی‌گرم در لیتر و مقدار کلر باقیمانده موجود در آب دریا در ورود به سیستم

نمک‌زدایی ۰/۱ الی ۰/۲ میلی گرم در لیتر باشد.

#### ۴- نرخ جریان آب جبرانی

زمانی که نرخ جریان آب جبرانی افزایش می‌یابد، غلظت نمک در جریان پساب کاهش یافته، در نتیجه کاهش وزن مخصوص و نقطه جوش پساب را موجب می‌شود. این عمل سبب کم شدن مصرف بخار و کاهش غلظت نمک در جریان خروجی از واحد می‌گردد. همچنین، نسبت عملکرد واحد افزایش یابد. حد پائینی جریان آب جبرانی به غلظت نمک در نرخ پساب در حال گردش بستگی دارد و حد بالایی آن با نرخ جریان آب دریا تغییر می‌کند. به هر حال یک واحد MSF با نرخ بالایی از آب جبرانی کار می‌کند.

#### ۵- دبی و حرارت بخار

بخش ورود حرارت به بخار کم فشار و اژکتور به بخار پر فشار نیاز دارد. بخار کم فشار بر درجه حداکثر حرارت آب شور و آب تولیدی اثر می‌گذارد. در هنگام تشکیل رسوب، برای حفظ درجه حداکثر حرارت پساب و دستیابی به محصول، دمای بخار و همچنین فشار پوسته افزایش داده می‌شود. این امر منجر به بالا رفتن دمای دیواره لوله‌ها و افزایش ضخامت رسوب و در نتیجه باعث خرابی لوله‌های می‌گردد.

#### ۶- نحوه انتقال پساب در بین مراحل

انتقال پساب در بین مراحل و در امتداد روزنه بسیار با اهمیت است.

هدف از این انتقال عبارت است از:

- افزایش اختلاط پساب و ایجاد آشفتگی برای کم کردن افت‌های ناپایدار
- جلوگیری از نشت قطرات پساب به داخل قطره‌گیر و کاهش ورودی مایع داخل بخار

نایپوستگی عملکرد فرآیند ممکن است باعث نامتوازن شدن سطح پساب در حین عبور از روزنه شود. یک روزنه کوچک منجر به بالا رفتن سطح پساب در پایین دست روزنه و در نتیجه ورود قطرات پساب به جریان بخار و طغیان در ناحیه قطره گیر می شود. یک روزنه بزرگ نیز موجب خروج بخار در نواحی بین مراحل می گردد.

### ۷- سطح پساب آخرین مرحله

کنترل سطح آب در هر مرحله برای حفظ پایداری فرآیند بسیار با اهمیت است. سطح پساب در واحد به منظور آب بندی اورفیس بین مراحل و جلوگیری از خروج بخار، باید همیشه به اندازه کافی بالا باشد به همین دلیل، سطح پساب باید به اندازه کافی پایین باشد و با حداکثر کردن افت فشار بین مراحل و یا حداقل کردن دبی جریان پساب در عرض هر واحد می توان به این امر دست یافت. سطح پساب مرحله آخر به سطح پساب در مراحل قبلی دبی جریان های پساب چرخشی و محصول و حداکثر دمای پساب وابسته است.

### ۸- دستگاه ها و تجهیزات مکانیکی فرآیند MSF

دستگاه ها و تجهیزات اصلی مکانیکی شامل مراحل و ملزومات، مبدل پیش گرم کن، الکتروپمپ، محصول، الکتروپمپ آب کندانس، الکتروپمپ پساب، الکتروپمپ چرخش پساب، ازکتور راه انداز، شیرها، سیستم لوله ها و سیستم تزریق مورد شیمیایی است.

### الف) مراحل فرآیند MSF

فرآیند MSF شامل یک سری مراحل است که هر یک در فشار عملیاتی کمتر از فشار مرحله قبل کار می کنند. درون هر مرحله یک مجموعه لوله قرار دارد و جریان آب به صورت برگشتی از مرحله آخر به سمت مرحله اول در داخل این لوله ها حرکت می کند. برخلاف فرآیند MED در آب شیرین کن MSF تولید بخار و کندانس آن در داخل هر مرحله اتفاق

می‌افتد، به همین دلیل این سیستم از مزایای بازیافت حرارتی استفاده می‌کند. برای بالا بردن خلوص آب تولیدی مراحل از قطره‌گیر استفاده می‌شود. این قطره‌گیرها وظیفه جداسازی قطرات آب شور معلق از بخار را به عهده دارند.

### **(ب) مبدل حرارتی**

به منظور پیش گرمایش آب دریای ورودی به مرحله اول بخش بازیافت حرارت، آب دریا از یک مبدل حرارتی عبور می‌کند، منبع حرارتی این مبدل، بخاری است که در اثر تبادل حرارتی کندانس می‌شود.

### **(ج) الکتروپمپ**

الکتروپمپ‌ها شامل الکتروپمپ محصول، الکتروپمپ آب کندانس، الکتروپمپ پساب، الکتروپمپ چرخش پساب و الکتروپمپ تزریق مواد شیمیایی است. جنس الکتروپمپ‌های پساب و چرخش پساب طوری انتخاب می‌شود که در برابر خوردگی مقاوم باشند. معمولاً این پمپ‌ها از نوع سانتریفوژ افقی یا عمودی هستند.

### **(د) اژکتور و راه‌انداز**

اژکتور راه‌انداز یک اژکتور با ظرفیت تخلیه بالاست و در هنگام راه‌اندازی برای تخلیه هوای موجود در آب شریک کن و ایجاد خلاء لازم از آن استفاده می‌شود.

### **(هـ) سیستم لوله‌کشی**

معمولاً جنس لوله کلیه مسیرها فولاد ضد زنگ انتخاب می‌شود.

### **(و) سیستم تزریق مواد شیمیایی**

سیستم تزریق مواد شیمیایی، مخزنی از جنس پلی اتیلن است که به همزن الکتریکی مجهز است. این سیستم به پمپ‌های تزریق مواد شیمیایی ضد رسوب و ضد کف مجهز است.



## ۲-۲-۳-۱-۱-۲-۸- مزایا و معایب روش MSF

### الف) مزایای MSF:

- قابلیت طراحی و نصب در ظرفیت‌های بالا را دارا می‌باشد. با توجه به تاریخچه طولانی استفاده
- غلظت و کیفیت آب ورودی در هزینه و یا روند فرایند تأثیر محسوسی ندارد.
- آب خروجی کیفیت بالایی دارد.
- قابلیت ترکیب با سایر روش‌های شیرین سازی و استفاده از انرژی حرارتی اتلافی نیروگاه‌ها.
- به حداقل سیستم پیش تصفیه نیاز دارد.
- تأثیر حداقل از شوک‌های تعمیرات و بهره‌برداری در سایر قسمت‌ها.

### ب) معایب MSF:

- نیاز به دانش بالا و طراحی و نصب و هزینه بالای آن.
- نیاز به انرژی حرارتی بالا برای تولید بخار در بویلر (در صورتیکه در مجاورت نیروگاه‌های حرارتی احداث نگردد).
- بازیافت آب پایین به طوری که همان مقدار که آب تولید می‌شود به همان مقدار آب تغلیظ شده از سیستم خارج می‌گردد.
- این سیستم حداکثر با ۷۰-۸۰ درصد ظرفیت کار می‌کند.
- وقتی غلظت آب خروجی پایین‌تر از ۵۰ mg/lit باشد، نیاز به مخلوط شدن با آب شور دارد.

## ۲-۲-۳-۱-۱-۲-۲- سیستم تقطیر چند مرحله‌ای (MED)

اساس کار این دستگاه‌ها تبخیر در خلاء است. در این روش با پاشیدن آب شور روی لوله‌هایی که بخار در آن جریان دارد، مقداری از آب حاوی املاح، تبدیل به بخار می‌شود.

چون این عمل در خلاء انجام می‌شود آب در دمای پایین‌تری به بخار تبدیل شده و کارایی دستگاه بالا می‌رود. از بخار تولید شده به عنوان تأمین کننده انرژی حرارتی مرحله بعد استفاده می‌شود. از طرفی این بخار سرد شده و به محصول تبدیل می‌شود. یعنی با افزایش مراحل می‌توان از مقدار بخار اولیه ثابت محصول بیشتری به دست آورد.

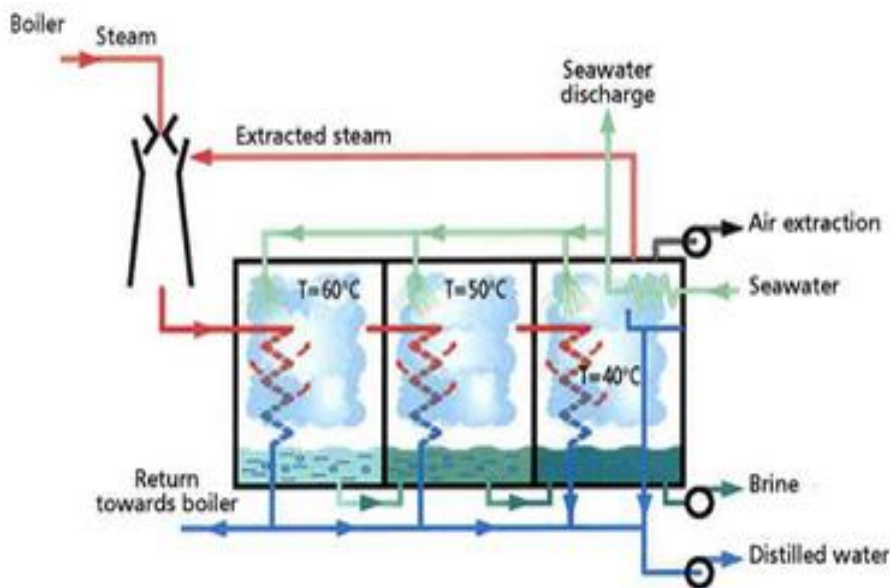
حال اگر این دستگاه مجهز به ترموکمپرسور باشد با مکش کردن مقداری از بخار مرحله آخر و استفاده مجدد از آن بازدهی دستگاه نسبت به روش‌های دیگر افزایش می‌یابد. مزیت دیگر این دستگاه‌ها کارکرد در دمای زیر ۷۰ درجه سانتی‌گراد است که رسوب‌گذاری در دستگاه را بسیار کاهش می‌دهد. در این روش می‌توان از بخار ورودی به دستگاه (که می‌تواند بخار کم فشار یا پرفشار باشد) تا ۸ برابر محصول تولید کرد. آب تولیدی این روش آب مقطر با کیفیت زیر ۵ میلی‌گرم در لیتر نمک محلول است.

این روش که جایگزینی است برای MSF، با کاهش درجه حرارت و فشار در هر افکت، با میزان بسیار کمی از بخار به عنوان منبع حرارت عمل می‌کند. در هر افکت، آب با جذب حرارت موجود از بخار کندانس شده به بخار تبدیل می‌شود. سپس بخار وارد brine separator شده و وارد افکت بعدی می‌شود و در این مرحله با درجه حرارت و فشار کمتری مواجه می‌شود. آب تقطیر شده در هر مرحله جمع‌آوری می‌شود.

آب شور مرحله به مرحله از داغ‌ترین به خنک‌ترین درجه می‌رسد و در هر مرحله نیز به لوله‌ها آب خنک پاشیده شده و در نهایت خارج می‌شود. این فرآیند ترجیحاً برای آب جبرانی بویلر و تولید آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک دیاگرام شماتیک از این سیستم در شکل (۲-۵) آورده شده است. که در آن ورود آب

دریا، مبدل حرارتی بخار، طبقات مختلف تبخیر و کندانس و موارد دیگر مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۲) دیاگرام شماتیک سیستم MED

این فرآیند ترکیبی از یک کمپر سور حرارتی و یک فیلم اپراتور مؤثر متعدد است. MED دارای یک فیلم نازک آب دریا است که بر روی سطح خارجی لوله‌های افقی مبدل‌های حرارتی اسپری می‌شود. تبخیر در MED به وسیله تبدیل گرمای نهان رخ می‌دهد، بواسطه انتقال حرارت بین بخار کندانس و آب شور تبخیر شده که در دو طرف سطوح یک لوله قرار دارند. بخار تولید شده در اولین و گرمترین بخش سیستم در داخل لوله‌ها بتدریج کندانس می‌شود و حرارت آزاد شده باعث می‌شود مقداری بخار که معادل آب تغذیه‌ای که بر روی سطح خارجی لوله‌ها ریخته می‌شود، تولید شود. بخار تولید شده در اولین افکت، در گردش، در مرحله دوم کندانس می‌شود، مجدداً یک قسمت از آب شور تغذیه تبخیر می‌شود. این فرایند تکرار می‌شود تا مرحله آخر، از آنجاییکه یک مقدار از بخار تولید شده به وسیله جت اژکتور بخار (Thermo-Compressor) استخراج می‌شود که بخار ترکیب شده و بخار استخراج شده برای

مرحله اول ورود حرارت، استفاده شود. بخار باقی مانده در مرحله چهارم در یک کندانسور نهایی به وسیله انتقال حرارت به آب دریا کندانس می شود. جریان آب خام ورودی، پی در پی از میان لوله های طبقات تبخیر دفعی و کندانسور نهایی می گذرد. تمام و یا به شتر آب خام گرم شده از لوله های کندانسور نهایی خارج شده و آب تغذیه برای مراحل تبخیری (Evaporating Effects) می باشد. به آب تغذیه مواد افزودنی برای جلوگیری از رسوب گذاری قلیایی بر روی سطوح انتقال حرارت، اضافه می شود. آب تغذیه گرم شده بر روی دسته لوله های اوپراتور افقی در مرحله اول اسپری می شود. همچنانکه آب تغذیه بر روی ردیف های متوالی لوله ها به سمت پایین می چکد، باعث می شود مقداری از آن تبخیر شود. این بخار از قسمت جدا کننده هوا عبور می کند که از تمامی قطرات آب شور تخلیه می شود. سپس بخار ایجاد شده به وسیله کانال به مرحله دوم انتقال می یابد. این مجموعه معمولاً در دمای پایین کار می کند (۷۰۰ C)، تا از مشکلات رسوب گذاری بدون استفاده از مواد اسیدی در موقع بهره برداری و تمیزکاری جلوگیری بعمل آید. این مدل آب شیرین کن در هر ظرفیتی قابل دسترس می باشد. در شکل (۲-۶) نمایی از کارخانه MED در فجیره امارات متحده عربی نشان داده شده است.



شکل (۲-۶) نمایی از یک کارخانه MED

## ۲-۲-۱-۱-۳-۱- فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای (MED)

یک تبخیر کننده یک مرحله‌ای از دو جزء اصلی، تبخیر کننده کندانسور و پیش گرم کن کندانسور تشکیل شده است. بخار ورودی در داخل لوله‌های تبخیر کننده، کندانس شده و حرارت خود را به جریان آب دریا می‌دهد و آن را تبخیر می‌کند. بخار تولیدی پس از عبور از قطره‌گیر وارد کندانسور می‌شود و جریان آب دریای ورودی را پیش گرم می‌کند. قسمتی از آب دریای گرم شده به دریا برگردانده شده و بقیه آن به عنوان خوراک وارد تبخیر کننده می‌شود. جریان پساب خروجی از تبخیر کننده نیز به دریا برگردانده می‌شود.

از آنجایی که در سیستم تک مرحله‌ای انرژی زیادی از طریق پساب و آب دریای برگشتی به محیط پس داده می‌شود، این سیستم به لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه نیست. نسبت بازدهی سیستم تک مرحله‌ای کمتر از یک است. برای غلبه بر این مشکل از سیستم چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. با این کار یکپارچگی و نظم کل فرآیند با کاهش فشار اولیه آب تغذیه در افکت‌های مختلف برقرار می‌شود. [1,5,6]

## ۲-۲-۱-۱-۳-۲- پارامترهای طراحی فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای

هر یک از فرآیندهای حرارتی دارای ملاحظات و پارامترهای متفاوتی در طراحی هستند که بر عملکرد فرآیند واحد اثر می‌گذارند. این پارامترها عبارتند از:

### الف) جریان بخار

فرآیند MED نسبت به تغییرات بخار ورودی انعطاف پذیر است، طوری که امکان استفاده

از بخارهای با فشارهای کم، متوسط و زیاد در آن وجود دارد.

### ب) جریان اصلی

بخار اصلی با پارامترهای ترمودینامیکی معین وارد ترموکمپرسور می‌گردد. طراحی ترموکمپرسور براساس بخار فوق‌اشباع انجام می‌شود. بخار ورودی به ترموکمپرسور، مکش بخشی از بخار تولیدی مرحله آخر را موجب شده که پس از اختلاط با بخار ورودی به محفظه بخار مرحله اول و نهایتاً به داخل مرحله اول وارد می‌شود.

### ج) جریان اژکتور

بخار محرک اژکتور راه‌اندازی و اژکتور گازهای غیرقابل چگالش نیز بخشی از بخار ورودی به واحد آب شیرین‌کن است. اژکتور راه‌انداز باعث ایجاد خلا سریع در واحد و در نتیجه راه‌اندازی سریع می‌شود و اژکتورهای اصلی گازهای غیرقابل چگالش را از سیستم تخلیه می‌کنند که در شرایط عادی بهره‌بردار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### د) جریان آب دریا

آب دریا پس از عبور از فیلتر و حذف ذرات معلق وارد لوله‌های کندانسور آب شیرین‌کن می‌شود. آب ورودی باید عاری از هرگونه موجودات زنده باشد. در صورتی که برای از بین بردن موجودات زنده از کلر استفاده شود بایستی مقدار کلر تزریقی به خروجی پمپ‌های آبگیر به مقدار ۲ الی ۳ میلی‌گرم در لیتر و مقدار کلر باقیمانده موجود در آب دریا در ورود به سیستم نمک‌زدایی ۰/۱ الی ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر باشد.

### هـ) جریان پساب

تنها ۳۳-۳۰ درصد از کل آب دریای پاشیده شده روی لوله‌های مرحله‌ها تبخیر می‌شود و مابقی آن که ۶۷-۷۰ درصد آب پاشیده شده است، به صورت پساب از هر مرحله خارج می‌شود. بهترین حالت عملکرد آب شیرین‌کن برای به حداقل رساندن مقدار رسوب، رعایت در صدهای فوق‌الذکر جهت تبدیل آب شور به بخار و کاهش میزان پساب خروجی است. به

عبارت دیگر در این آب شیرین کن که ضریب تغلیظ که نسبت آب شور پاشیده روی لوله‌ها به پساب خروجی یا به عبارتی نسبت املاح پساب به املاح آب تغذیه است نباید از ۱/۵ تجاوز کند. پساب خارج شده از هر مرحله از طریق لوله‌های U شکل به مرحله بعد می‌رود

### (و) جریان گازهای غیر قابل چگالش

گازهای غیر قابل چگالش که شامل هوا، گاز کربنیک و سایر گازهای محلول در آب دریا هستند. در حین تبخیر آب دریا درون تبخیر کننده‌ها جدا شده و از طریق محفظه هوا و اورفیس مربوط از یک مرحله به مرحله بعد منتقل می‌شود. نهایتاً گازهای غیر قابل چگالش خروجی مرحله آخر به کندانسور وارد شده در برخی سیستم‌های از کندانسور تخلیه می‌شوند و در برخی پس از مکش توسط ترموکمپرسور همراه بخار ورودی وارد مرحله اول شده و سپس از طریق محفظه هوای مرحله اول توسط اژکتورها تخلیه می‌شوند.

### (ز) حداکثر دمای پساب

به دلیل وجود املاح در سطح خارجی و داخلی لوله‌ها رسوب تشکیل می‌شود. این امر به کاهش انتقال حرارت موثر در لوله‌ها افزایش افت فشار و در نتیجه انرژی پمپ کردن، افزایش مقاومت حرارتی، کاهش بازده حرارتی و در نهایت تولید کمتر محصول می‌انجامد. به دلیل بروز مشکلات رسوب در طراحی واحد MED حداکثر دمای پساب معمولاً کمتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۲-۳-۱-۱-۳-۳- مزایا و معایب روش MED

### الف) مزایای MED :

- مصرف پایین انرژی الکتریکی (کمتر از یک کیلوولت ساعت در هر مترمکعب) در مقایسه با روش‌های دیگر مانند MSF, RO.
- بهره‌برداری در دمای پایین (کمتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد) که باعث کاهش رسوبات و خوردگی در سیستم نیز می‌گردد.
- تولید آب با خلوص بالا به طور یکنواخت
- هزینه پایین بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری
- مناسب برای استفاده ترکیبی در مجاورت نیروگاه‌های حرارتی
- قابلیت تطبیق با هر نوع منبع حرارتی برای تولید بخار
- بازده حرارتی بالا
- قابلیت ترکیب شدن با روش‌های دیگر آب شیرین کن

### ب) معایب MED :

- نیاز به دانش بالا و برای طراحی و نصب و هزینه بالای آن
- نیاز به انرژی حرارتی بالا برای تولید بخار در بویلر بازیافت آب پایین به طوری که همان مقدار که آب تولید می‌شود به همان مقدار آب تغلیظ شده از سیستم خارج می‌گردد.
- این سیستم حداکثر با ۷۰-۸۰ درصد ظرفیت کار می‌کند.
- وقتی غلظت آب خروجی پایین‌تر از mg/lit باشد، نیاز به مخلوط شدن با آب شور دارد.
- رسوب گرفتگی روی لوله‌ها و یتغه‌های بین افکت‌ها



## ۲-۲-۳-۱-۱-۴- اختلاف موجود بین سیستم MSF و MED

به طور کلی این دو سیستم دو اختلاف کلی دارند، یکی از نقطه نظر مقدار آب در گردش دستگاه و دیگر از نظر راندمان حرارتی.

### الف) آب گردش در دستگاه های MSF و MED

در سیستم MSF مقدار آب گردش خیلی زیاد بوده و چندین برابر محصول است، در این سیستم ها برای تولید یک کیلوگرم آب تصفیه شده باید ۸-۹ کیلوگرم آب خام در دستگاه گردش کند در صورتی که در سیستم MED آب خام گردش مورد نیاز جهت تولید یک کیلوگرم آب تصفیه شده ۴-۵ کیلوگرم می باشد. بنابراین از این نظر سیستم MED به MSF ترجیح دارند.

### ب) راندمان حرارتی

از نظر راندمان حرارتی دستگاه های MED نسبت به MSF ضریب کلی انتقال حرارت بالاتری دارند و هزینه های پمپاژ نیز حدود ۵۰-۴۰ درصد هزینه پمپاژ در MSF است. تعویض لوله ها در واحدها MSF ساده تر از واحدهای MED می باشد.

## ۲-۲-۳-۱-۱-۳- سیستم بخار متراکم VC (Vapor Compression Distillatory)

سیستم VC به منبع گرمایش خارجی احتیاج ندارد و بوسیله انرژی الکتریکی تغذیه می شود در نتیجه برای نواحی کم جمعیت تر که به نیروی برق دسترسی دارند مناسب است. همچنین این سیستم برای واحدهای دریایی مانند سکوها های نفتی و کشتی ها بسیار کارآمد و مناسب است. مزیت دیگر این سیستم این است که به کندانسور نیاز ندارند زیرا همانطور که از

نام آن پیداست بخار به صورت مکانیکی چگالش می‌شود. در سیستم VC بخارات تولید شده کمپرس می‌شوند و با کمپرس شدن بخار، دما نیز افزایش می‌یابد چنانچه فشار و دما افزایش یابد بخار کمپرس شده می‌تواند به عنوان منبع حرارتی برای تبخیر آب بکار رود. در این دستگاه‌ها بخار ایجاد شده تا فشار به حد کافی متراکم می‌شود تا تقطیر آن بتواند حرارت کافی جهت تولید مجدد بخار از همان منبع را داشته باشد. سه خصلت اصلی یک سیستم تقطیر در اینجا هم وجود دارد (تبخیر، جدا نمودن سیال از بخار، کندانس بخار).

علاوه بر آن در این سیستم‌ها یک کمپرسور و دو مبدل حرارتی آب به آب هم وجود دارد که آب خام را به وسیله دو جریان محصول و پساب گرم می‌کند. انرژی الکتریکی لازم برای این سیستم در حدود  $20 \text{ KWh/m}^3$  است. استفاده از سیستم VC در جاهائیکه انرژی حرارتی (بخار) بسادگی در دسترس نباشد از سایر پروسه‌های تقطیر مؤثرتر است. برای اینکه این نوع دستگاه‌ها در فشاری حدود یک اتمسفر کار می‌کنند باید آب ورودی روی دستگاه تا دمای جوش گرم شده و بعد وارد محفظه اصلی دستگاه شود بدین منظور از دو مبدل آب به آب که یکی به وسیله پساب و دیگری به وسیله محصول تغذیه می‌شود استفاده می‌گردد. همچنین کمپرسور این سیستم‌ها دارای پره‌هایی از جنس تیتانیوم است و بسیار گران قیمت می‌باشد. به طور کلی انرژی مورد نیاز این نوع دستگاه‌ها نسبت به فرآیندهایی از قبیل اسمز معکوس و الکترودیالیز بالاتر است و بدلیل هزینه بالای آن، این نوع فرآیند برای طرح حاضر غیر اقتصادی بوده و توصیه نمی‌گردد.

## ۲-۲-۳-۱-۱-۴-۱- مزایا و معایب روش VC

مزایا و معایب این روش به شکل ذیل معرفی می شود.

### الف) مزایای VC:

- این سیستم بسیار فشرده می باشد و قابلیت طراحی به صورت قابل حمل را نیز دارا می باشد.
- حداقل نیاز به سیستم تصفیه
- بازیافت مناسب آب
- درجه خلوص بالای آب تولیدی

### ب) معایب VC:

- استارت کار مشکل است زیرا یک گرمکن کمکی برای رساندن دمای آب به مرز بخار در ابتدا لازم می باشد، اگر چه بعد از راه اندازی کمپرسور این وظفه را انجام می دهد.
- نیاز به کمپرسور بزرگ بخار

## ۲-۲-۳-۲- نمزدایی با استفاده از حرارت پایین تر از نقطه جوش

مهمترین فرآیندی که در این زمینه به کار میرود، بالا بردن حرارت آب توام با کاهش فشار وارد به سطح آب است. حتی برای تامین انرژی حرارتی مورد نیاز از انرژی خورشیدی می توان استفاده نمود که در آن، آب در محیط مسدود با دیواره شفاف در معرض تابش خورشید قرار می گیرد و برای بالا بردن اثر تامین خورشید نیز کف اطاقک گرمایش را سیاه انتخاب می کنند. بخار آب تولید شده در این اطاقک که فشار آن کمتر از فشار اتمسفر است، در معرض لوله هایی که آب سرد وارد اطاقک می نمایند میعان شده و سپس در ناودانهایی جمع آوری می شود. جریان آب مقطر نیز به پایین آوردن فشار داخل اطاقک کمک خواهد کرد.

## ۲-۳-۳- نمزدایی با استفاده از روش یخ زدن

در این روش، زودتر یخ بستن آبهای کم نمک استفاده می‌شود و پس از جدا نمودن بلورهای یخ زده از بقیه مایع و با تکرار این کار مقدار نمک آب را کاهش می‌دهند. بدلیل هزینه بالای ساختمان اینگونه تا سیسات، این روش کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به بررسی‌های زیادی که در جهان در مورد اقتصادی کردن این روش انجام گرفته، شاید این فرآیند در آینده‌ای نه چندان دور در مناطق سردسیر ارزان‌ترین و مناسبترین روش برای شیرین کردن آب شود. [1,6,5]

## ۲-۳-۴- نمزدایی با استفاده از مواد شیمیایی رسوب دهنده

در این روش مواد محلول آب و یا بخشی از مواد محلول که برای استفاده در مصارف مورد نظر نامطلوب تشخیص داده شده است، تحت تاثیر مواد شیمیایی که به آب اضافه می‌شود، به صورت نامحلول در می‌آید و با گذراندن از صافی از آب جدا می‌شوند، بدین ترتیب آب با کیفیت مطلوب تولید خواهد شد. ته نشینی مواد محلول ممکن است در شرایط طبیعی محیط و یا در حرارت نزدیک به حرارت جوش بسته به نوع ماده شیمیایی که باید حذف شود و ماده شیمیایی یا مواد شیمیایی که به کار گرفته می‌شود انجام گیرد، در هر حال مجاورت و اختلاط کامل آب با مواد شیمیایی افزوده شده به وسیله دستگاه‌های مکانیکی تکمیل می‌گردد. این فرآیند در سختی‌زدایی آبها بیشتر کاربرد دارد.

## ۲-۳-۵- نمزدایی با استفاده از فرآیند تبادل یونی

آب به عنوان یک محلول الکترولیت دارای یون‌های مثبت و منفی و از نظر بار الکتریکی خنثی است، یعنی مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها از نظر بار الکتریکی با هم برابرند. اساس روش تبادل یونی جایگزین کردن یون‌های نامطلوب با یون‌های مطلوب است. به همین منظور از ذرات جامدی در این روش استفاده می‌شود که رزین نام دارد. بیشتر این رزین‌ها که در تصفیه آب به کار می‌روند مواد سنتزی هستند که با پلیمری‌زاسیون ترکیبات آلی حاصل شده‌اند.

رزین‌های تعویض یونی شامل بار مثبت کاتیونی و بار منفی آنیونی هستند به گونه‌ای که از نظر الکتریکی خنثی هستند، اما تعویض کننده‌ها با محلول الکترولیت این تفاوت را دارند که فقط یکی از دو یون متحرک و قابل تعویض است. یک تعویض کننده کاتیونی دارای نقاط آنیونی غیرمتحرکی است که کاتیون‌های متحرک به آن وصل است و این کاتیون‌های متحرک می‌توانند در یک واکنش تعویض یونی شرکت کنند. در اثر تعویض یونی، کاتیون‌ها یا آنیون‌های موجود در محلول با کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در رزین عوض می‌شود به گونه‌ای که هم محلول و هم رزین از نظر الکتریکی خنثی باقی می‌مانند. برای آن که یک تعویض کننده یونی جامد مفید باشد، باید دارای شرایط زیر باشد:

- خود دارای یون باشد.
- در آب غیرمحلول باشد.
- فضای کافی در شبکه تعویض کننده وجود داشته باشد که یونها بتوانند به سهولت در شبکه جامد رزین وارد یا خارج شوند.
- فرآیند تبادل یونی در مخزنی انجام می‌شود که در این مخزن مقداری رزین وجود دارد.

به این مخزن همراه با رزین‌ها یک بستر گفته می‌شود. آب خام وارد بستر شده و تبادل یونی بین آب و رزین‌ها صورت می‌پذیرد. آبی که از رزین‌ها عبور کرده یون‌های خود را از دست داده و به آب بدون یون تبدیل شده است. به تدریج رزین‌ها توانایی خود را برای جذب یون از دست می‌دهند و دیگر امکان جذب یون جدید ندارند. در این حالت لازم است رزین‌ها احیاء شوند. فرآیند احیا شدن با استفاده از یک اسید و یک باز و به صورت جداگانه صورت پذیرد.

در صورتی که هدف از تبادل یونی رسیدن به آب بدون یون باشد لازم است از دو بستر کاتیونی و آنیونی استفاده شود که این دو بستر آنیون‌ها و کاتیون‌ها را از آب خام حذف می‌کنند. گاهی از یک بستر که در طبقات مختلف خود هم بستر آنیونی دارد و هم بستر کاتیونی استفاده می‌شود که به آن بستر مخلوط گفته می‌شود.

کاربرد روش تبادل یونی بیشتر در مواردی است که مقدار یون‌های موجود در آب بسیار کم و کل مواد محلول در آب از ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر کمتر باشد. محصول دستگاه‌های تبادل یونی می‌تواند کاملاً خالص و حدود یک دهم میلی‌گرم در لیتر نمک محلول داشته باشد. این روش را می‌توان به عنوان خالص سازی نهایی محصول دیگر فرآیندهای نمک زدایی استفاده کرد.

ژئولیت‌ها (ماسه سبز) با ترکیب شیمیایی "سدیم آلومینو سیلیکات" از قدیم الایام برای تبادل یونی به منظور سختی‌زدایی آب بکاربرده می‌شدند. با این فرآیند که یک واکنش جابجایی دو طرفه است، می‌توان یون‌های نامطلوب در محلول را با همان مقدار اکی والان از یون مطلوب با بار الکتریکی مشابه جایگزین نمود. امروزه با پیشرفت صنعت و نیاز فراوان به مواد تبادل

یونی با استفاده از ترکیبات آلی نظیر "اسید کربوکسیلیک" و "اسید سولفونیک" که در ترکیب فنلی تهیه و تحت عنوان "رزین‌های تبادل یونی" عرضه می‌شوند، سختی‌زدایی و نیز نم‌زدایی آبها را به کمک فرآیند تبادل یونی انجام می‌دهند. تبادل یونی به صورت‌های سیکل سدیم و سیکل‌های هیدروژن و هیدورکسیل انجام می‌گیرد که به شرح آنها پرداخته می‌شود. فرآیند تبادل یونی برای آبهای شور با غلظت کمتر از ۰/۱ درصد نمک می‌تواند اقتصادی باشد.

## ۲-۲-۳-۵-۱- تبادل یونی در سیکل سدیم

رزین‌های تبادل یونی در سیکل سدیم، مواد جامدی هستند که به منظور سختی‌زدایی با تعویض یونهای کلسیم و منیزیم و آهن با یون سدیم به کار گرفته می‌شوند. هر گاه رزین‌های مورد اشاره را در آب حاوی کلسیم و منیزیم غوطه‌ور سازیم، سدیم موجود در رزین جای خود را با کلسیم و منیزیم عوض خواهد کرد، که در نتیجه سختی آب حذف شده و یون سدیم در آب افزایش می‌یابد. این عمل تا وقتی ادامه می‌یابد که تقریباً تمام سدیم موجود در رزین‌ها جای خود را به سختی آب بدهد و بدین ترتیب رزین از کلسیم و منیزیم اشباع شود. در چنین حالتی اگر آب نمک در محیط وارد گردد و رزین را در آب نمک غرق سازیم عمل عکس انجام خواهد گرفت و سدیم نمک طعام جانشین کلسیم و منیزیم می‌شود و مجدداً آماده کار می‌گردد. به منظور اینکه رزین جامد بتواند بیشتر با آب تماس حاصل نماید، رزین را به صورت گرانول با دانه‌های یکنواخت می‌سازند تا دارای سطح تماس بیشتر و بتواند فعالیت شدیدی داشته باشد. لذا یکنواختی و قطر دانه‌ها در بازده رزین تاثیر کامل خواهد داشت.

## ۲-۲-۳-۵-۲- تبادل یونی در سیکل هیدروژن

این رزین‌ها که به تعویض کننده‌های کاتیونی هیدروژنی معروف هستند، می‌توانند تمام نمکهای محلول در آب را به اسیدهای مربوطه تبدیل کنند. بدین صورت که کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و سدیم موجود در آب با هیدروژن موجود در ترکیب رزین مبادله می‌شود و اسیدهایی در جوار آنیونهای موجود در آب بوجود می‌آورد. چنانچه تبادل یونی ادامه یابد، سبب خواهد شد که رزین از کاتیون‌های غیرهیدروژن اشباع گردد که در این صورت قدرت تبادل یونی رزین خاتمه یافته و باید نسبت به احیای رزین اقدام نمود.

## ۲-۲-۳-۵-۳- تبادل یونی در سیکل هیدروکسیل

رزینهایی که در سیکل هیدروکسیل عمل می‌کنند، آنیونهای موجود در آب را با یون  $(OH^-)$  موجود در ترکیب رزین مبادله می‌کنند که عکس عملکرد رزین‌های سیکل هیدروژن است. بدین صورت که چنانچه آب عبور کرده از بستر رزین سیکل هیدروژن را در ستون حاوی رزین سیکل هیدروکسیل وارد کنیم، از اسیدهای تولید شده در جوار رزین هیدروژنی ریشه‌های اسید با عامل هیدروکسیل مبادله می‌شود و هیدروژن اسید با  $(OH^-)$  آزاد شده از رزین، تولید آب خواهد کرد. بدین ترتیب آنیون‌ها و کاتیون‌های آب در دو مرحله به ترتیب با  $(OH^-)$  و  $(H^+)$  مبادله می‌شود و نهایتاً آب خالص تولید خواهد شد.

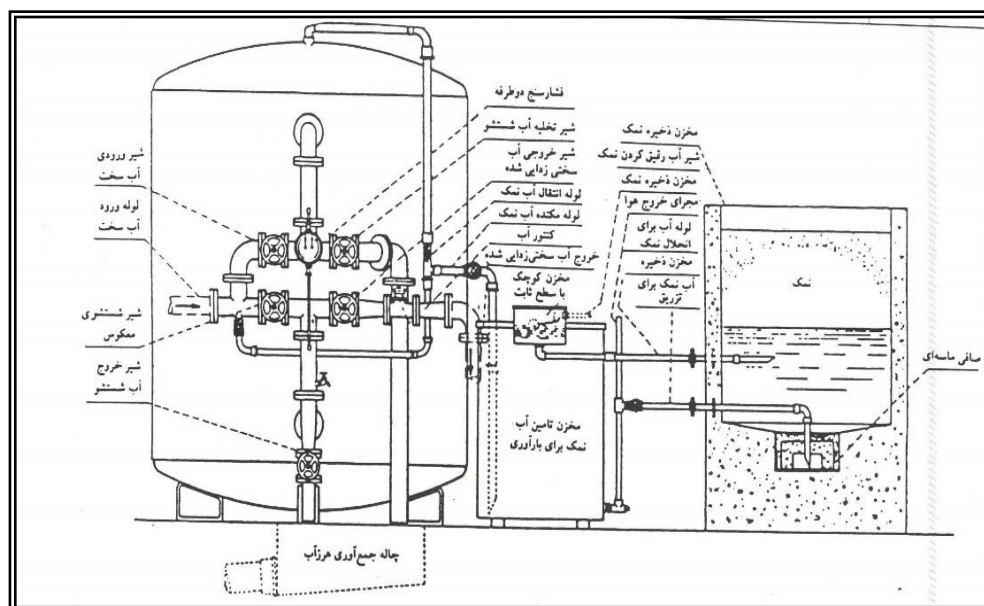
## ۲-۲-۳-۵-۴- مشخصات دستگاه‌های تبادل یونی

ترکیبات آلی مختلفی برای تولید رزین‌های تبادل یونی وجود دارد که گروه‌های رزین با استفاده از ترکیبات مزبور ساخته و عرضه می‌شوند.



دستگاه تبادل یونی از بخش‌های زیر تشکیل می‌شود:

- رزین یا رزین‌های تبادل یونی
  - بدنه دستگاه و مخزن تهیه محلول مواد شیمیایی
  - تلمبه یا وسیله انتقال ماده یا مواد شیمیایی به دستگاه
  - لوله‌های ورود آب خام و خروجی آب تصفیه شده
  - لوله و متعلقات ورود و خروج و دفع پساب شستشو و احیای رزین
- شکل دستگاه تبادل یونی مانند دستگاه‌های فیلتر فشاری ساخته می‌شود و تنها باید برای ساخت دستگاه از مصالح و متعلقاتی استفاده نمود که از نظر تاثیر شیمیایی آب دارای مقاومت کافی باشند. شکل (۷-۲) شمایی از یک دستگاه تبادل یونی را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲) شمای کلی از یک دستگاه تبادل یونی با رزین کاتیونی و سیستم احیاء به وسیله آب نمک اشباع شده

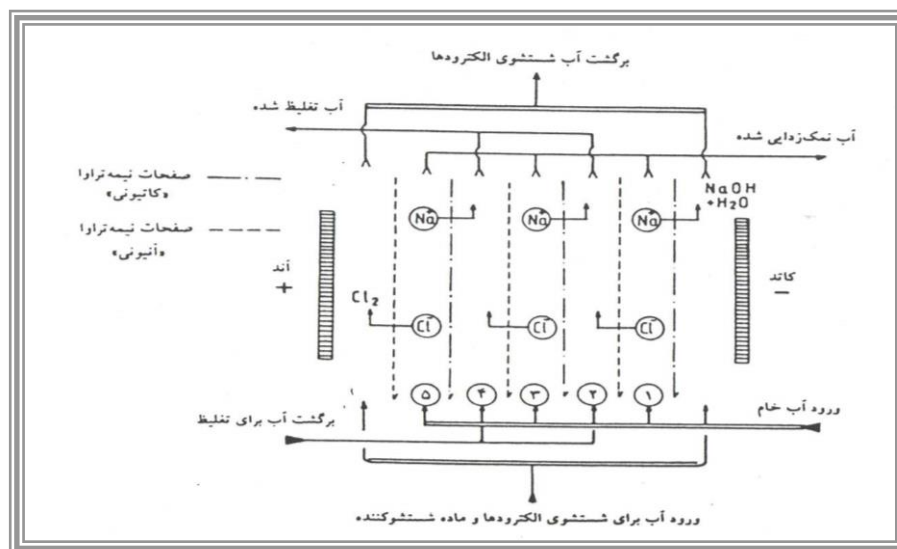
## ۲-۲-۳-۶- نمزدایی با استفاده از فرآیند الکترودیالیز

در فرآیند الکترودیالیز از غشاهایی استفاده می‌شود که طبیعتی همانند تعویض یونی دارند، با این تفاوت که رزین‌های تعویض یونی بصورت دانه‌ای هستند اما غشاهای به صورت صفحه‌ای بوده و مقاومت مکانیکی خوبی دارند. نمزدایی در این روش با استفاده از جریان مستقیم برق و الکترولیز آب دریا و آبهای شور انجام می‌گیرد. این فرآیند برای آب‌های شوری که از ۰/۱ تا حداکثر یک درصد نمک دارند (لبشور) ممکن است اقتصادی باشد. چنانچه محلولی که آنیون‌ها و کاتیون‌های مختلف در آن قرار دارد در معرض جریان مستقیم برق قرار گیرد. جریان الکتریکی در داخل محلول به وسیله دو قطب الکتریکی، کاتیون‌های موجود در محلول به طرف کاتد و آنیون‌ها به طرف آند حرکت خواهند کرد. به منظور اینکه عمل الکترودیالیز منجر به نمزدایی از آب گردد، در مسیر یون‌ها صفحات نیمه تراوا برای عبور دادن کاتیون‌ها و یا آنیون‌ها قرار می‌دهند تا عمل الکترودیالیز منجر به جلب آنیون‌ها از لایه صفحه نیمه تراوا به طرف آند و جلب کاتیون‌ها از لایه صفحه دیگر به طرف کاتد انجام گیرد.

دستگاه الکترودیالیز دارای مشخصاتی است که عبارتند از :

- حوضچه دیالیز که قطب‌های الکتریکی در دو طرف آن قرار دارند.
  - تعداد سه جفت صفحات نیمه تراوا برای آنیون‌ها و کاتیون‌ها
  - سیستم لوله کشی ورود آب خام و لوله کشی خروج آب تصفیه شده
  - سیستم لوله کشی ورود محلول شستشوی صفحات نیمه تراوا و جمع آوری آب شستشو
- شکل (۲-۸) شمای کلی از یک دستگاه الکترودیالیز را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشخص است به ازای هر یک پکولومب پالکتریسته که به سیستم وارد شود، یک والانس گرم آنیون و

یک والانس گرم کاتیون از آب گرفته خواهد شد و در بخش ۲ و ۴ سیستم جمع آوری می‌گردد. اختلاف سطح الکتریکی که در این سیستم به کار گرفته می‌شود، متناسب با تعداد بخش‌های الکترولیز و نیروی لازم برای بهره‌برداری ۰/۶ تا ۰/۸ کیلووات به ازای هر یک کیلوگرم نمک که از آب گرفته می‌شود، منظور می‌گردد. برگشت آب تغلیظ شده در مدار جریان بخش‌های ۲ و ۴ نیز طوری تنظیم می‌گردد که هدایت الکتریکی ثابتی را در سیستم تامین کند. از نکات مهمی که باید در استفاده از این فرآیند مورد توجه قرار دارد این است که کلوئیدها و مولکولهایی که یونیزه نمی‌شوند (مواد آلی و سیلیس کلوئیدی) و میکروارگانیسم‌ها در آب باقی خواهند ماند. به همین دلیل قبل از کاربرد این روش پیش تصفیه مناسب برای حذف این موارد لازم است. از معایب این سیستم می‌توان به عدم تحویل آب نمکزدایی شده به طور مداوم و به طور یکنواخت و همچنین افزایش مواد محلولی که از سیستم فرار می‌کند، اشاره کرد. برای رفع این عیب می‌بایست مقاومت الکتریکی سیستم ثابت نگه داشته شود، در غیر اینصورت مقداری از مواد محلول آب خام در آب نمکزدایی شده باقی خواهد ماند.



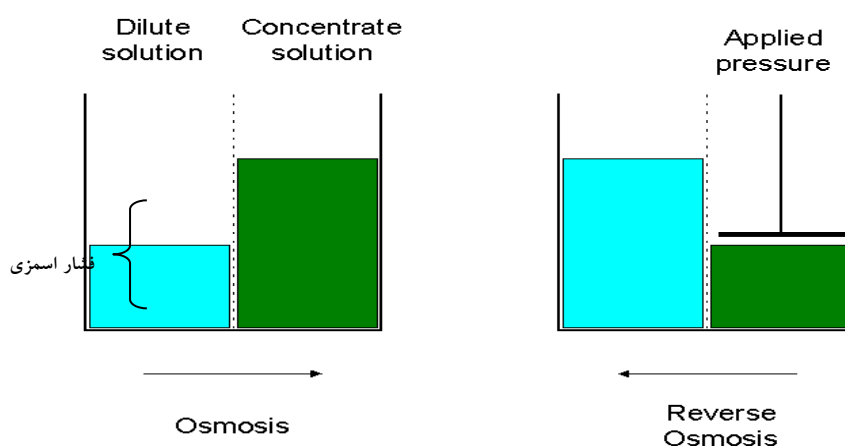
شکل (۲-۸) شمای کلی یک دستگاه الکترودیالیز

## ۲-۲-۳-۷- نمزدایی با استفاده از فرآیند اسمز معکوس

اسمز معکوس فرآیندی فیزیکی است که می‌توان از محلولی به کمک یک غشا نیمه تراوا، حلال تقریباً خالص تهیه کرد. به عنوان مثال به کمک این روش می‌توان از آب شور، آب آشامیدنی مطلوب تهیه کرد. اسمز معکوس می‌تواند ۹۹٪ مواد معدنی حل شده و ۹۷٪ مواد آلی و کلوییدی آب را حذف کند. تکنولوژی اسمز معکوس در دهه‌های اخیر با به بازار آمدن انواع جدیدی از غشاها، به طور قابل توجهی گسترش یافته است.

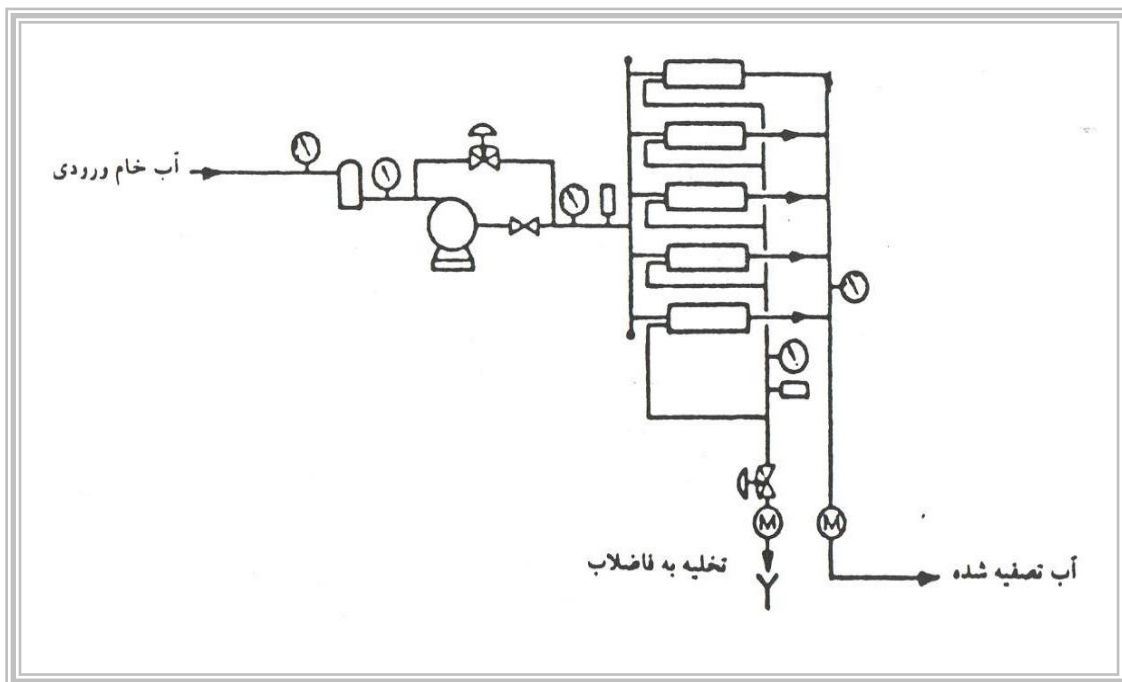
اگر یک غشای نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت های متفاوت قرار گیرد، مقداری از یک طرف غشاء به طرف دیگر منتقل می‌شود. جهت حرکت حلال بگونه‌ای است که محلول غلیظتر را رقیق می‌نماید، که این پدیده را اسمز می‌نامند. آب خالص از غشا عبور کرده و وارد آب شور می‌شود. اگر به سیستم اجازه داده شود تا به تعادل برسد در آن صورت سطح آب نمک بالاتر از سطح آب مقطر خواهد شد. اختلاف سطح در دو طرف غشاء را فشار اسمزی

گویند. در شکل (۲-۹) می‌توان این پدیده را مشاهده نمود. [1,3,4,5,6]



شکل (۲-۹) نمایش پدیده اسمزی و فشار اسمزی

یون‌های موجود در آب دریا از مولکول‌های آب بزرگتر می‌باشند و این مشخصه ایست که فرآیند اسمز معکوس از آن بهره می‌گیرد. در این سیستم آب دریا را با فشار به داخل غشاء شبه نفوذپذیر می‌فرستند تا نمک‌ها و مواد معدنی غیرحلال را فیلتر نماید. همچنین RO دارای مصرف بالای برق و هزینه زیاد نگهداری می‌باشد، همچنانکه غشاء شبه نفوذپذیر به صورت متناوب باید جایگزین شود. شکل (۲-۱۰) دیاگرام شماتیک یک مرحله‌ای تاسیسات تصفیه آب به روش اسمز معکوس (R.O) را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۰) دیاگرام تاسیسات تصفیه آب به روش اسمز معکوس یک مرحله ای

اسمز معکوس (RO) یک فرآیند جداسازی غشایی است که محلول آب دریا با فشار در داخل آن قرار داده می‌شود تا مواد موجود (مواد غیرحلال) در آب دریا به وسیله ایجاد جریان از میان غشاء جدا شود. غالب انرژی مورد نیاز برای فرآیند RO برای ایجاد فشار در آب تغذیه استفاده می‌شود. یک قسمتی از آب از میان غشاء عبور می‌کند و در همین زمان قسمتی از این آب تغذیه برای تغلیظ آب نمک تخلیه می‌شود بدون آنکه از میان غشاء عبور کند. بیشترین

نسبت‌های بازیافت نوعی (جریان نفوذ یافته/ جریان آب تغذیه) از آب شور ۸۵٪ و آب دریا ۴۵-۳۵٪ می‌باشد.

اسمز معکوس یک روش جدا سازی ناخالصی‌ها از آب می‌باشد که عامل جدا سازی با اعمال فشار مکانیکی است. اسمز معکوس گاهی شبیه به فیلتراسیون است چون هر دو فرآیند ناخالصی‌ها را از آب جدا می‌کنند، از این رو گاهی به اسمز معکوس، هایپرفیلتراسیون می‌گویند. اما باید توجه داشت که در فیلتراسیون فشار اسمزی خیلی کم است و اصولاً نقشی ندارد. در فیلتراسیون اندازه ذرات مهم است ولی در اسمز معکوس علاوه بر اندازه ذرات فاکتورهای دیگری چون میزان نمک‌های محلول هم مطرح است.

در اسمز معکوس آب خام (تصفیه نشده) توسط پمپ به داخل محفظه‌ای که دارای غشای نیمه تراوا است، رانده می‌شود چون تقریباً فقط آب خالص می‌تواند از غشاء عبور کند به این صورت آب تقریباً خالص در یک طرف غشاء و آب تغلیظ شده از ناخالصی‌ها در طرف دیگر خواهیم داشت.

اسمز معکوس به صورت پیوسته کار می‌کند و می‌تواند کل نمک‌های محلول آب خام را تا ۹۹٪ کاهش دهد. حذف باکتری‌ها، ویروس‌ها و دیگر میکروب‌ها با اسمز معکوس صددرصد است. اما به علت عدم آب‌بندی کامل سیستم اسمز معکوس مقدار کمی از این گونه ناخالصی‌ها در آب تصفیه شده دیده می‌شود. این فرآیند برای تهیه آب آشامیدنی از آب‌هایی املاح معدنی زیاد و ناخالصی‌های آلی دارد، بسیار مناسب است. حتی با این روش می‌توان از آب دریا با ۵۰۰۰۰۰ ppm ناخالصی، آب آشامیدنی تهیه کرد. برای تصفیه آب‌های معمولی با کل نمک‌های محلول حدود ۵۰۰۰ ppm یا بیشتر اسمز معکوس یک روش کاملاً اطمینان بخش

است.

اسمز معکوس را می‌توان در داروسازی و پزشکی جایگزین روش تقطیر برای تولید آب ناخالص و عاری از میکروارگانیسم‌ها کرد. امروزه روش اسمز معکوس اقتصادی‌ترین فرآیند برای تهیه آب آشامیدنی از آب‌های شور مناطق کم آب است.

یک سیستم اسمز معکوس شامل اجزاء اصلی زیر است. این سه جزء عبارتند از:

- پیش تصفیه و پس تصفیه
  - پمپ فشار بالا
  - مجموعه غشاءها
- هدف از فرآیند پیش تصفیه در اسمز معکوس عبارت است از:
- جداسازی ذرات بزرگتر توسط فیلترها
  - از بین بردن آلودگی‌های میکروبی برای جلوگیری از رسوب‌گذاری بیولوژیک بوسیله مواد ضد عفونی کننده
- هدف از فرآیند پس تصفیه عبارت است از:
- تبدیل آب معمول به آب صنعتی از طریق روش‌های تبادل یونی
  - ضد عفونی برای مصارف شرب یا صنعتی
  - مخلوط کردن معمول با آب شور با هدف دستیابی به آنالیز مورد نظر کشاورزی یا شرب

- افزودن اسید یا باز کردن رساندن pH به شرایط مورد نظر

این جزء برای بالا بردن فشار آب تغذیه پیش تصفیه شده برای رساندن آن به سطح مناسب برای مواجه شدن با غشاء است. فشار مورد نیاز به غلظت نمک موجود در آب و درجه حرارت آب تغذیه بستگی دارد. فشار اسمزی با افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد. بنابراین فشار عملگر باید از فشار اسمزی بیشتر باشد. این فشار می‌تواند تا سه بار از فشار اسمزی

بیشتر باشد.

آب بسیار شور و پر از املاح فشاری در حدود ۱۷ تا ۲۷ بار نیاز دارد و این در حالی است که آب تغذیه در فشاری برابر با ۵۰-۸۰ بار عمل می‌کند و این نکته را نیز باید در نظر گرفت که با افزایش درجه حرارت باید بر مقدار فشار افزود.

## ۲-۲-۳-۱- غشاء نیمه تراوا

غشاهای معمولاً از استات سلولز بافت دار ساخته می‌شوند. پیش از آن در فرآیند اسمز معکوس از مخلوط یا مشتقی از استات‌های بافت دار یا پلی آمیدهای بافت دار استفاده می‌کردند. غشاهای صفحه‌ای قابی شکل، مارپیچی، رزوه شده و فیبری ظریف، متداول‌ترین نوع غشاءها در فرآیندهای اسمزی هستند.

یک غشاء ایده‌آل باید دارای خصوصیات زیر باشد:

- دفع مقدار بسیار زیاد نمک
- خاصیت عبور دهی زیاد برای آب
- مقاومت بالا در برابر تغییر درجه حرارت
- مقاومت بالا در برابر اکسید شدن
- مقاومت بالا در برابر هر گونه ضایعات (ضایعات ناشی از مواد آلی، غیرآلی و ...)
- مقاومت استاتیکی بالا
- قیمت مناسب و ارزان

## ۲-۲-۳-۲- تشریح نحوه عملکرد فرآیند غشایی اسمز معکوس

فناوری اسمز معکوس تقریباً در هر صنعتی که جدا سازی مواد حل شده از حلال مورد



نظر است به کار گرفته می شود. متداول ترین مورد استفاده این فناوری تهیه آب خالص است فرآیند اسمز معکوس در تهیه آب آشامیدنی از طریق نمک زدایی آب دریا و حتی جهت بهبود مزه آب از طریق حذف آلودگی های مضر مورد استفاده قرار می گیرد.

اسمز معکوس یکی از روش های اساسی تصفیه آب است که در ساخت نیمه رساناها، تجهیزات پزشکی و صنایع دارویی مورد استفاده قرار می گیرد. آب خالص تولید شده با استفاده از این روش در عمل دیالیز و نیروگاه ها به کار می رود. همچنین این فناوری در تصفیه فاضلاب و حتی تغلیظ محلول های نمکی در صنایع غذایی کاربرد دارد.

استفاده از سیستم اسمز معکوس در مصارف خانگی عمومیت پیدا کرده است. در این کاربرد و بسیاری از کاربردهای دیگر در سیستم اسمز معکوس از فیلترهایی با منافذ با قطر کوچکتر از یک نانومتر استفاده می شود. این فیلترها تفکیک جامدات معلق، ذرات کوچک و ذرات بسیار ریزی را که می توانند در صنایع مختلف نظیر داروسازی منشاء مشکل باشند برای سیستم اسمز معکوس ممکن می سازند.

## ۲-۲-۳-۷-۱- مبانی فرآیند اسمز معکوس

اسمز فرآیندی طبیعی است که در آن آب از میان یک غشاء نیمه تراوا از سمت یک محلول کم نمک به سمت یک محلول پر نمک می رود. نیروی محرکی که موجب گذر آب می شود، فشار اسمزی نامیده می شود. فشار اسمزی به اختلاف غلظت نمک دو محلول نوع ناخالصی و دما بستگی دارد. اگر به سیستم اجازه داده شود تا به تعادل برسد در آن صورت سطح آب نمک بالاتر از سطح آب مقطر خواهد ایستاد. این اختلاف همان فشار اسمزی است.

غشاهای نیمه تراوا کامل نیستند و برخی نمکها همراه آب می گذرند. شار جریان و نمک عبور کرده دو پارامتر کلیدی و توصیفی غشاهای اسمز معکوس هستند که بر عملکرد غشاء تأثیر می گذارند. اغلب شار جریان با ضریب انتقال آب (حلال) و نمک عبور کرده با ضریب انتقال نمک مشخص می شود. ضریب انتقال نمک تابعی از مواد سازنده غشاء است در حالی که ضریب انتقال آب متناسب با فشار خالص است.

شار جریان شدت عبور حلال از سطح یک واحد غشایی است. نمک عبور کرده کیفیت آب تولیدی برای یک یون خاص یا TDS برای کیفیت آب تغذیه را به صورت درصد نشان می دهد. اگر نمک عبوری یک درصد آب تغذیه باشد بدین معناست که از آب تغذیه ppm ۱۰۰۰ محصولی با TDS برابر ۱۰ ppm بدست می آید. غشاها تا ۹۹/۵٪ نمکها را باز می گردانند. پیش تصفیه برای سیستم RO دارای اهمیت می باشد زیرا آب تغذیه در طی فرآیند باید از میان گذرگاه باریکی عبور کند بنابراین مواد جامد غیرحلال باید گرفته شود. این عمل (پیش تصفیه) همچنین از رسوب نمک و رشد میکروارگانیسم در غشاها جلوگیری بعمل می آورد. معمولاً پیش تصفیه شامل فیلترهای متنوع و استفاده از مواد اسیدی برای پرهیز از انعقاد و تجمع و در نتیجه رسوب گذاری می باشد.

در بعضی از واحدها از UF<sup>۱</sup> و MF<sup>۲</sup> برای پیش تصفیه استفاده می شود.

به دلیل هزینه بسیار بالای تولید انرژی و مشکلات تعمیر در روش های تولید بخار به روش های مذکور امروزه تکنولوژی ممبران به علت مشکلات کمتر و بازدهی بهتر (در کنار

---

<sup>۱</sup> - Ultra Filtration

<sup>۲</sup> - Micro Filtration

(Mixed Bed) برای تولید آب دمین (DM) به کار می‌رود. تصفیه به روش ممبران در کنار تبادل یونی علاوه بر اینکه دارای امکانات وسیع‌تری است بلکه از نظر اقتصادی نیز بسیار مقرون به صرف می‌باشد. پایه و اساس تصفیه به این روش جداسازی ذرات سیال با فشار بالا به وسیله پولیمرهای مخصوص است.

روش‌های رایج برای این کار عبارتند از :

- میکرو فیلتراسیون (MF)
- اولترا فیلتراسیون (UF)
- نانو فیلتراسیون (NF)
- اسمز معکوس (RO)
- الکترو دیالیز معکوس (EDR)
- الکترو دیالیز (ED)

## ۲-۲-۳-۲-۲- پارامترهای طراحی فرآیند اسمز معکوس

آب تغذیه پس از گذر از مراحل پیش تصفیه لازم وارد پمپ آب تغذیه فرآیند اسمز معکوس شده و این پمپ آب فشار را متناسب با غلظت جامدات محلول در آب درصد بازیافت و عملکرد غشاء افزایش می‌دهد. چینش موازی یا سری مخازن تحت فشار، در صد بازیافت و ظرفیت را مشخص می‌کند. در بعضی از حالات می‌توان قسمتی از آب تغذیه یا آب پیش تصفیه شده را با آب تولیدی مخلوط کرد. مخازن تحت فشار می‌توانند در بر گیرنده یک تا ۸ غشاء استاندارد ۱۰۱۶ cm باشند. معمولاً در سیستم‌های بزرگ مربوط به آب لب شور از ۶ تا ۷ غشاء استاندارد با قطر ۲۰۳cm و در ازای ۱۰۱۶ cm استفاده می‌شود. برای سیستم‌های مربوط به آب دریا از مخازن تحت فشار ۷ غشایی در یک یا دو مرحله استفاده می‌شود. در

فرآیند نمک زدایی از آب دریا معمولاً از سیستم اسمز معکوس ۲ مرحله‌ای استفاده می‌شود. مخزن تحت فشار ۷ غشایی به حدود ۷۶۲m طول نیاز دارد. علاوه بر این تقریباً ۱/۲m فضا در انتهای مخزن تحت فشار برای جابجایی لازم است و طول کلی مورد نیاز ۱۰m است. پهنای به ظرفیت واحد و نوع آب تغذیه بستگی دارد. بر روی واحدهای موجود نشان می‌دهد که به طور متوسط ۰/۰۲۵m<sup>2</sup> زمین به ازاء هر مترمکعب آب خروجی لازم است. تمام لوله‌های انتقال دهنده آب تولید شده مربوط به غشاهای هر مخزن تحت فشار به هم متصل می‌شوند. سپس مخازن تحت فشار برای تشکیل یک مرحله به صورت موازی قرار می‌گیرند. آن‌گاه مراحل به صورت سری چیده شده و جریان آب تولیدی به میزان کافی بازیافت و شدت جریان آب تغلیظ شده به حداقل می‌رسد. در برخی کاربردها، ممکن است دو واحد غشایی با هم سری شوند و میکروفیلتر یا اولترافیلتر به عنوان پیش تصفیه فرآیند اسمز معکوس مورد استفاده قرار گیرد. در این فرآیند معمولاً آب تغلیظ شده مرحله دوم کم نمک‌تر از آب دریا است و به آب تغذیه واحد برگردانده می‌شود.

## ۲-۲-۳-۲-۳-۲-۳- تغذیه فرآیند اسمز معکوس

در طراحی فرآیند اسمز معکوس باید ترکیب و کیفیت آب تغذیه تغییرات احتمالی در کیفیت، دما و اثر فرآیندهای پیش تصفیه بر غشاء مدنظر قرار گیرد. دبی آب تغذیه مورد نیاز برای یک فرآیند RO به درصد بازیافت آن بستگی دارد. حداکثر درصد بازیافت ممکن برای یک فرآیند اسمز معکوس با توجه به کیفیت آب تغذیه تعیین می‌شود. در اسمز معکوس حداکثر درصد بازیافت مجاز، به غلظت نمک‌ها و سیلیکات حل شده در آب تغذیه بستگی دارد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴- متغیرهای فرآیند اسمز معکوس

شدت جریان آب تولیدی و میزان جداسازی نمک، پارامترهای مشخصه فرآیند اسمز معکوس هستند. این دو پارامتر در یک فرآیند اسمز معکوس توسط پارامترهای متغیر فشار دما درصد بازیافت و غلظت نمک در آب تغذیه تحت تأثیر قرار می گیرند. پارامترهای مهم دیگری که مستقیماً به عملکرد غشاء مربوط نیستند ولی بسیار مهم اند و نباید از نظر دور داشته شوند، عبارتند از نگهداری مناسب از سیستم، به کارگیری صحیح سیستم و طراحی مناسب فرآیند در درصد بازیافت. برای محاسبه حداکثر درصد بازیافت و نیز تعیین مراحل پیش تصفیه موردنیاز باید ترکیب آب تغذیه کاملاً مشخص شود.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۱- شدت جریان ها

بهترین عملکرد فرایند زمانی است که برای غشاها شدت جریان آب تغلیظ شده کمترین و شدت جریان آب تغذیه بیشترین باشد. شدت جریان آب تغذیه به اولین غشاء درون یک مخزن تحت فشار و شدت جریان خروجی آب تغلیظ شده از آخرین غشاء درون یک مخزن تحت فشار باید با نیازمندی هایی که توسط تولید کننده غشاء گفته شده مطابقت داشته باشد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۲- شدت جریان آب تغذیه

با افزایش درصد بازیافت، شدت جریان آب تغذیه لازم برای تولید میزان ثابتی از آب تولیدی کاهش می یابد. حداکثر کردن درصد بازیافت موجب می شود که شدت جریان آب تغذیه و نیز آب تغلیظ شده به حداقل برسند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۳- کیفیت آب تولیدی

با افزایش در صد بازیافت به علت بالا رفتن غلظت نمک در شدت جریان‌های آب تغذیه و آب تغلیظ شده کیفیت آب تولیدی کاهش می‌یابد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۴- میزان جداسازی نمک

حذف و میزان جداسازی مواد محلول در آب یا میزان عبور آن‌ها از غشاء به عوامل مختلفی بستگی دارد. توضیحات و دستورالعمل‌های تولید کننده غشاهای اسمز معکوس طبق مقادیر اسمی و حداقل جداسازی نمک که تحت شرایط خاصی آزمایش شده‌اند، دسته‌بندی می‌شوند. تولید کنندگان غشاء معمولاً میزان جداسازی را براساس میزان جداسازی کلرید سدیم بیان می‌کنند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۵- مواد محلول آلی و غیر آلی

غشاهای اسمز معکوس بسیاری از مواد آلی یونی و غیر فرار را تا حد بسیار زیادی جدا می‌کنند. معمولاً غشاهای کامپوزیتی نسبت به غشاهای استات سلولزی، ترکیبات آلی را بهتر جدا می‌کنند. به طور کلی هیچ کدام از انواع غشاها نمی‌توانند ترکیبات آلی فرار آلی را به خوبی جدا کنند. میزان جداسازی نمک‌های محلول یک ظرفیتی بسیار کمتر است. این جداسازی تا حد زیادی به نوع یون‌ها و نیز pH آب بستگی دارد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۴-۶- نوع غشاء

ترکیب غشاء در طول زمان بر میزان جداسازی تأثیر می‌گذارد. به طور کلی غشاهای کامپوزیتی پایدار و خواص جداسازی آنها در طول زمان عملکرد ثابت می‌ماند. غشاهای

استات سلولزی به مرور زمان هیدرولیز شده و توانایی جداسازی آنها به تدریج کاهش می‌یابد. افزایش دما سرعت هیدرولیز را بیشتر می‌کند. توصیه شده که برای عملکرد مناسب، pH بین ۵ تا ۶/۲ نگهداشته شود.

## PH-۷-۴-۲-۷-۳-۲-۲

جداسازی بعضی یون‌ها مثل فلوئورید، بی‌کربنات و بور با pH تغییر می‌کند. با افزایش pH به بیش از ۵/۵ جداسازی یون‌های فلوئورید و بی‌کربنات افزایش می‌یابد. جداسازی بور هم با رفتن به سمت قلیائیت افزایش می‌یابد. تمام غشاءها از لحاظ pH دارای محدوده عملکرد خاصی هستند. غشاءهای پلی‌امیدی اسمز معکوس در محدوده pH ۴ تا ۱۰ به طور پیوسته و در محدوده وسیع‌تری از pH به طور متناوب کار می‌کنند. غشاءهای سلولز استاتی اسمز معکوس برای به حداقل رساندن هیدرولیز به pH بین ۴ تا ۶/۵ نیاز دارند.

## شدت جریان-۸-۴-۲-۷-۳-۲-۲

شدت جریان یک مخزن تحت فشار از ابتدا تا انتهای آن به تدریج کاهش می‌یابد. غشاءهای ابتدای فرآیند دارای شدت جریان بیشتری نسبت به غشاءهای انتهای فرآیند هستند، زیرا در غشاءهای ابتدایی TDS آب تغذیه کمترین و فشار آن بیشترین مقدار را دارد. با افزایش شدت جریان میزان رسوب‌گذاری نمک‌ها روی سطح غشاءها افزایش می‌یابد.

## دما-۹-۴-۲-۷-۳-۲-۲

در یک شدت جریان ثابت هر چه دمای آب افزایش می‌یابد کیفیت آب تولیدی افت پیدا می‌کند زیرا که میزان عبور آب ثابت است ولی میزان عبور نمک‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین

حداکثر دمای آب بدترین کیفیت آب تولیدی را بدست خواهد داد.

دمای آب به صورت‌های مختلف روی فرآیندهای اسمز معکوس تأثیر می‌گذارد:

- خواص مواد سازنده غشاء و عمر غشاء را تغییر می‌دهد.
  - ویسکوزیته و دانسیته آب بر عملکرد هیدرولیکی غشاء و سطح مورد نیاز غشاء تأثیر می‌گذارد.
  - حلالیت نمک‌های کم محلول و سیلیکات را که طراحی درصد بازیافت غشاء در فرآیندهای نمک‌زدایی را محدود می‌کند، تغییر می‌دهد.
- برای حداکثر کردن عمر غشاءها باید از راهنمای سازنده‌های غشاء در مورد دما استفاده کرد. غشاءهای سلولز استات با افزایش شدت جریان و دما دچار هیدرولیز می‌شوند. افت شار جریان ناشی از فشردگی غشاءهای اسمز معکوس در دماهای بالا بیشتر است.
- غشاءهای سلولز استاتی اسمز معکوس برای آب‌های لب شور حداکثر تا دماهای ۴۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده هستند. این دما برای غشاءهای پلی‌آمید ۵۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد است ولی عمر غشاء به طور چشم‌گیری در این دماها کاهش می‌یابد.
- ویسکوزیته و دانسیته آب در دمای پایین‌تر بیشتر است و در سیستم‌های تحت فشار برای تولید شدت جریان مشخصی از محصول در فشار آب تغذیه مشخص سطح بیشتری برای غشاء نیاز است. به عبارتی در یک سیستم با فشار آب تغذیه معین، شدت تولید در دمای کمتر کاهش می‌یابد. دما نه تنها به طور مستقیم بر شدت جریان محصول یا جداسازی نمک اثر می‌گذارد، بلکه به طور غیرمستقیم در حلالیت موردی رسوب دهند تأثیر می‌گذارد. اگر چه به ندرت دما عامل مؤثری در کنترل رسوب گذاری در غشاءها است ولی باید توجه داشت که کربنات کلسیم بعد از ۳۵ درجه سانتی‌گراد دارای منحنی حلالیت معکوس است.



## ۲-۲-۳-۷-۲-۵- پیش تصفیه فرآیندهای اسمز معکوس

بسیاری از فرآیندهای نمک زدایی اسمز معکوس نیاز به پیش تصفیه آب تغذیه دارد. نوع سیستم پیش تصفیه به کیفیت نوع غشاء و شرایط بحرانی واحد در طراحی بستگی دارد. پیش تصفیه ممکن است برای موارد ذیل به کار گرفته شود:

- ایجاد شرایطی برای مؤثرتر کردن کار غشاء
  - بهتر کردن کیفیت آب تغذیه برای جلوگیری از گرفتگی و رسوب گذاری، حداکثر کردن زمان بین دو شستشوی شیمیایی و بالا بردن عمر غشاء
  - عموماً آب‌های سطحی به خاطر مقدار زیاد جامدات معلق و مواد بیولوژیک نسبت به آب‌های زیرزمینی نیاز بیشتری به عملیات پیش تصفیه دارد.
- در پیش تصفیه فرآیندهای اسمز معکوس پارامترهای متعددی باید کنترل شود. این موارد در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۱- کنترل جامدات معلق

جامدات معلق موجود در آب تغذیه فرآیندهای اسمز معکوس می‌توانند شامل مواد غیرآلی مانند گل و لای، اکسیدهای فلزی غیرمحلول و مواد آلی مانند رنگ‌های کلوئیدی باشند. جامدات معلق مسیر عبور آب تغذیه را مسدود می‌کنند. اصولاً تمام سیستم‌های غشایی برای محافظت از غشاء در برابر تجمع جامدات روی آن به کنترل جامدات معلق در آب تغذیه نیاز ندارند. در فناوری اسمز معکوس، تمام ذرات بزرگتر از یک میکرومتر باید جدا شوند. شدت جریان مورد نیاز برای جدا کردن ذرات جامد روی غشاها کمتر از شدت جریان مربوط به شستشوی شیمیایی است.

تقریباً تمام فرایندهای اسمز معکوس بسته به نوع فرآیند علیرغم هزینه بالا، از کارتریج فیلترهای ۱-۲۵ میکرونی به عنوان مرحله نهایی پیش تصفیه استفاده می کنند. علاوه بر این، جایی که تجمع جامدات، موجب تعویض زیاد کارتریج فیلتر شود و یا هنگامی که کارتریج فیلتر به تنهایی برای حفاظت از غشاء کافی نباشد، از مدیا فیلترهای گرانولی همراه یا بدون افزودن مواد شیمیایی استفاده می شود. فیلترهای پوشیده شده به خاک خاص برای مدت کوتاهی در پیش تصفیه فرایندهای اسمز معکوس استفاده می شدند. این روش بسیار مؤثر بوده ولی به خاطر مشکلاتی همچون گذشتن مواد از میان این لایه ها و رسیدن به غشاء و گرفتگی سریع غشاء کاربرد آن محدود گردید.

سیکلون ها بیشتر برای جدا کردن شن و ماسه از آب های زیرزمینی استفاده می شوند. این دستگاه ها کارآمد و نسبتاً ارزان هستند و برای آب های بی اکسیژن که امکان گرفتگی با گوگرد یا اکسید فلزی در آن ها وجود دارد، بسیار مناسبند. برای جداسازی مواد آلی معمولاً از روش های کربن فعال پودری در یک بستر ته نشینی، منعقد سازی با آلوم، کلرید آهن یا سایر منعقد کننده ها پیش از فیلتراسیون استفاده می شود. استفاده از فیلتراسیون مستقیم با منعقد سازی پیوسته آب تغذیه روش دیگری برای جداسازی مواد آلی است. همچنین اولترافیلتراسیون برای کاهش مؤثر مواد کلوئیدی آلی تا اندازه مورد نظر به کار می رود.

در آب هایی که مقدار جامدات معلق زیاد است (عموماً آب های سطحی) از فرآیندی منعقد سازی، لخته سازی و ته نشینی به عنوان پیش تصفیه استفاده می شود. اخیراً فیلتراسیون غشایی به عنوان روشی برای پیش تصفیه فرایندهای اسمز معکوس پذیرفته شده است و سیستم های اولترافیلتر و میکروفیلتر نیز برای پیش تصفیه فرایندهای اسمز معکوس به کار

می‌روند. از چند سال گذشته تحقیقاتی در اروپا خصوصاً در هلند، برای ترکیب میکروفیلتر بر فرآیند اسمز معکوس آغاز شده است.

دو پارامتر عمده‌ای که نشانگر مقدار جامدات معلق موجود در آب تغذیه هستند، عبارتند از: SDI و کدورت.

### الف) شاخص<sup>۱</sup> SDI

در این آزمایش آب با فشار ثابت ۳۰ psi از یک فیلتر با قطر ۴۷ mm عبور می‌کند. در ابتدا زمان عبور ۵۰۰ ml آب از این فیلتر، اندازه‌گیری می‌شود. آب همچنان از فیلتر عبور می‌کند و پس از گذشت پانزده دقیقه مجدداً زمان عبور ۵۰۰ ml آب از فیلتر اندازه‌گیری می‌شود. نسبت بین این دو زمان میزان گرفتگی را مشخص می‌کند.

در سیستم RO؛ درصد نامشخصی از گرفتگی‌ها همراه با آب دورریز از انتهای سیستم خارج می‌شوند، بنابراین مقدار زیاد SDI نشانگر این نیست که RO به آسانی دچار گرفتگی می‌شود.

### ب) کدورت

این آزمایش روش دیگری برای اندازه‌گیری میزان گرفتگی غشاء است. در این آزمایش با استفاده از شکست نور توسط ذرات و جامدات معلق میزان آن را اندازه‌گیری می‌کنند. کدورت فقط میزان گرفتگی را نشان می‌دهد و میزان بالای آن نشان نمی‌دهد که غشاء دچار گرفتگی می‌شود و بر عکس، زیرا میزان زیادی از ذرات که باعث گرفتگی غشاء می‌شوند در مقابل نور تاثیری ندارند.

---

<sup>۱</sup> – Silt Density Index

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۲- کنترل رسوب گذاری

در طراحی سیستم کنترل رسوب گذاری مربوط به فرآیندهای اسمز معکوس باید سولفات و کربنات کلسیم به صورت ویژه مد نظر قرار داده شود. همچنین باید به سیلیکات هم توجه داشت. بسته به درصد بازیافت هیدرولیکی غلظت یونهای نمک و سیلیکات آب تغذیه در طی فرآیند می تواند تا ۱۰ برابر افزوده شود. اگر غلظت ها از حلالیت در شرایط دمایی و غلظت یونی محیط بیشتر شود، درون مخازن تحت فشار و روی غشاهای رسوب ایجاد می شود و تولید محصول و کیفیت آن پایین می آید. این ترکیبات در سطح غشاء و مسیر جریان تولید رسوب می کنند و قدرت فرآیند نمک زدایی را کاهش می دهند. سایر نمک ها ممکن است در درصد بازیافت برخی آب ها محدودیت ایجاد کنند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۳- کنترل کربنات کلسیم

کربنات کلسیم، عمده ترین نمک معدنی است که روی غشاهای رسوب ایجاد می کند. تمایل کربنات کلسیم به رسوب گذاری در طی نمک زدایی آب های لب شور مشخص می شود. کنترل کربنات کلسیم از روش های ذیل امکان پذیر است:

- اسیدی کردن محیط برای کاهش pH و قلیائیت
- کاهش غلظت کلسیم با تبادل گر یونی یا نرم سازی با آهک
- افزودن بازدارنده های رسوب شیمیایی برای افزایش حلالیت ظاهری کربنات کلسیم در جریان آب تغلیظ شده
- پایین آوردن درصد بازیافت در طراحی
- اسیدی کردن آب تغذیه معمول ترین روش برای کنترل رسوب گذاری کربنات کلسیم

است. معمولاً در این روش از اسید سولفوریک استفاده می‌شود زیرا کم هزینه و کم خطر (کف نمی‌کند) است.

هنگامی که امکان رسوب‌گذاری نمک‌های کم محلول سولفات وجود دارد و افزودن یون‌های سولفات میسر نیست لذا از اسید کلریدریک استفاده می‌شود.

با وجود سدیم هگزااستافسفات یا اسید پلی اکریلیک و یا سایر انواع ضد رسوب، کمتر از روش اسیدی کردن استفاده می‌شود. ضد رسوب‌های خانواده اسید پلی آکریلیک عموماً در غلظت کمتر از ۵ ppm، رسوب‌گذاری را کنترل می‌کنند. همچنین با به کار بردن این ضد رسوب‌ها در غشاء‌های غیرسلولزی کنترل pH برای حداقل کردن هیدرولیز غشاء لازم نیست.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۴- کنترل سولفات‌ها

امکان رسوب‌گذاری نمک‌های سولفات با محاسبه غلظت یون‌های هر نمک در جریان آب تغلیظ شده و مقایسه آن با حلالیت نمک در دمای مورد نظر امکان‌پذیر است.

قبل از ساخت بازدارنده‌های رسوب سعی بر نگه‌داشتن سولفات کلسیم اشباع تا کمتر از ۱۰۰٪ بود. امروزه مقدار دو برابر حالت اشباع نیز قابل کنترل است به شرط این که یک سیستم پایش قابل اعتماد برای افزودن مقدار صحیح بازدارنده رسوب وجود داشته باشد.

عمده‌ترین روش برای کنترل رسوب‌گذاری سولفات‌ها افزودن سدیم هگزااستافسفات یا اسید پلی آکریلیک و یا سایر ضد رسوب‌ها است. این خانواده اسید پلی آکریلیک، بیشتر در فرآیندهای اسمز معکوس استفاده می‌شود زیرا نسبت به سدیم هگزااستافسفات در جهت بالاتری از فوق اشباع شدن یون‌های بحرانی را در جریان آب تغلیظ شده امکان‌پذیر می‌سازد.

پیش‌بینی محدودیت انحلال سولفات‌ها به خاطر داشتن دو نکته حائز اهمیت است:

- غشاهای جدید اسمز معکوس یون‌های دو ظرفیتی را به خوبی باز می‌گردانند بنابراین باید در محاسبه فاکتور تغلیظ درصد نمک عبوری را صفر فرض کرد.
- مقدار مواد محلول در آب تغلیظ شده از آب تغذیه بیشتر است و ثابت حلالیت محصول در مورد هر ترکیب با غلظت یونی آن افزایش می‌یابد. غلظت بازدارنده رسوب برای فرآیندهای اسمز معکوس هنگامی که غلظت این باز دارنده‌ها در آب تغلیظ شده ppm ۱۸-۱۲ است محاسبه می‌شود. سپس این مقدار با استفاده از فاکتور تغلیظ به غلظت آب تغذیه تبدیل می‌شود. فاکتور تغلیظ مورد نظر در درصد بازیافت طراحی و با فرض صفر بودن نمک عبوری تعیین می‌شود.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۵- کنترل سیلیکات

سیلیکات با غلظت‌های مختلف در تمام آب‌های طبیعی وجود دارد. سیلیکات موجود در آب تغذیه فرآیند اسمز معکوس می‌تواند دارای سه شکل باشد:

- مونومر سیلیکات یا اسید سیلیسیک: عموماً به آن سیلیکات واکنش پذیر یا محلول گفته می‌شود.
- اسید سیلیسیک پلیمری شده: عموماً به آن سیلیکات کلوئیدی یا واکنش ناپذیر گفته می‌شود.
- ذرات سیلیکات: معمولاً غلظت سیلیکات در آب تغلیظ شده اسمز معکوس باید کمتر از ۱۲۰ ppm باشد.

روش‌های پیش تصفیه جهت کنترل رسوب‌گذاری سیلیکات عبارتند از:

- کاهش درصد بازیافت هیدرولیکی جهت کاهش غلظت سیلیکات در جریان آب غلیظ
- نرم سازی با آهک زیاد جهت کاهش غلظت سیلیکات در جریان آب تغذیه.
- افزایش دمای آب تغذیه

- افزایش pH آب تغذیه ۸/۵ و بالاتر
- افزودن ضد رسوب‌های مخصوص سلیکات

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۶- کنترل سولفید هیدروژن

سولفید هیدروژن یکی از اجزاء مهم آب‌های زیرزمینی در ساحل‌ها، چاه‌ها یا سایر مناطق مرطوب است. سولفید هیدروژن محصول جانبی چرخه زندگی باکتری‌های کاهنده سولفات است که در بیشتر سیستم‌های آب زیرزمینی وجود دارد. توزیع سولفید هیدروژن به صورت تابعی از pH را نشان می‌دهد. سولفید هیدروژن در یک محیط بی‌هوازی به دو صورت گاز محلول و الکترولیت ضعیف تبدیل می‌شود.

سولفید هیدروژن نیز مانند همه گازها از غشاء اسمز معکوس می‌گذرد و هم در آب تولیدی و هم در آب تغلیظ شده وجود دارد. جایی که سولفید هیدروژن وجود دارد، وجود کلر و هوا جایز نیست. چرا که گوگرد کلوئیدی تشکیل شده و روی غشاها را می‌گیرد و به علت کم اثر بودن شستشوی شیمیایی در بر طیف کردن این نوع گرفتگی به ناچار غشاها باید تعویض شوند.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که باید در طراحی خطوط لوله آب تغذیه خطوط لوله واحد و نوع اتصالات مخازن تحت فشار توجه ویژه‌ای صورت گیرد تا پیش از فرآیند غشایی اجازه ورود به هوا داده نشود. هنگامی که حتی مقدار کمی سولفید هیدروژن در آب تغذیه وجود دارد، سیستم را باید به صورت هوا بند ساخت و سولفید هیدروژن را در مراحل پس تصفیه با گاز جدا کرد. جداسازی سولفید هیدروژن از آب تولیدی بسیار موثر و در عین حال کم هزینه‌تر است.

## ۲-۲-۳-۷-۵-۷- کنترل آهن و منگنز

اکسید بسیاری از فلزات نامحلولند. اکسید آهن سه ظرفیتی و منگنز چهار ظرفیتی از مهمترین آنها هستند که برای فرایندهای اسمز معکوس مشکل ایجاد می‌کنند. با این حال اگر این فلزات احیا و در آب حل شوند مشکل کمی برای فرایند اسمز معکوس ایجاد می‌کنند. در کاربردهای فناوری اسمز معکوس، مقدار آهن و منگنز موجود در آب تغذیه به ترتیب نباید بیش از ۰/۲ ppm و ۰/۵ ppm باشد. مقادیر بیشتر ممکن است سبب مشکلاتی چون رسوبدهی با سایر ذرات مثل سیلیکات شود. در هنگام طراحی واحد غشایی، آب تغذیه باید عاری از هوا نگاهداشته شود چون آهن و منگنز در حضور اکسیژن و یا pH بالا رسوب می‌دهند اغلب از افزودن اسید برای کنترل اکسید فلزات استفاده می‌شود.

بازدارنده‌هایی چون سدیم هگزااستافسفات نیز عموماً برای جلوگیری از تغییر شکل آهن و منگنز افزوده می‌شوند. بعضی از انواع ضد رسوب‌های گروه اسید پلی آکریلیک با آهن و منگنز واکنش می‌دهند و در خروجی غشاء ایجاد گرفتگی می‌کنند، بنابراین نباید از آنها استفاده کرد. مواد تجاری جلوگیری کننده از گرفتگی غشاء نیز برای کنترل رسوب‌گذاری و گرفتگی در حضور آهن و منگنز استفاده می‌شوند. در صورت حضور رسوب آهن و منگنز یا سایر فلزات ناشی از خوردگی، فرایندهای اسمز معکوس دچار گرفتگی می‌شوند. بنابراین باید از مواد مناسبی برای ساخت منابع آب یا سیستم‌های پیش تصفیه استفاده شود.

معمولاً سه فرایند پیش تصفیه برای جدا کردن آهن و منگنز به کار می‌روند:

- اکسیداسیون با هوا، کلر یا سایر اکسید کننده‌ها و به دنبال آن اولترافیلتر، میکروفیلتر و مدیا فیلتر گرانولی



- اکسیداسیون با پرمنگنات سدیم و به دنبال آن فیلتر زئولیت منگنز
  - سختی گیری با تبادل گرهای کاتیونی
- مقدار اکسید کننده های باقیمانده باید قبل از ورود به غشاء کنترل شوند. نرم سازی با آهک که برای کنترل رسوب گذاری استفاده می شود برای کاهش آهن و منگنز مناسب است.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۸- کنترل مواد آلی

مواد آلی به دو دسته معلق و محلول تقسیم می شوند. جامدات آلی معلق یا کلوئیدی و مواد میکروبی تأثیر نامطلوبی بر غشاها دارد. مواد آلی محلول در مقایسه با سایر سیستم های غشایی گرفتگی کمتری را برای فرآیند اسمز معکوس ایجاد می کنند. در حقیقت بعضی از فرآیندهای اسمز معکوس برای جداسازی مواد آلی طبیعی و مصنوعی و رنگ استفاده می شوند. سازندگان غشاء بسیاری از ترکیبات آلی مشکل زا برای غشاها را شناسایی کرده اند. رابطه قطعی بین مقدار مواد آلی موجود از قبیل آنالیزها و افت عملکرد غشاهای اسمز معکوس وجود ندارد. معمولاً برای جداسازی مواد آلی از اولترافیلتر و میکروفیلتر و گاهی قبل از آنها از کربن فعال پودری استفاده می شود. روغن، گریس، هیدروکربن ها، حلال های آلی مختلف و سایر مواد مشابه می توانند غشاها را تخریب و یا مسدود کنند و دیگر اجازه عبور آب را ندهند. ترکیبی از منعقد سازی، ته نشینی و نرم سازی با آهک برای کاهش مواد آلی موجود در آب تغذیه قبل از ورود به غشاها به کار می رود. گاهی کربن فعال نیز برای جداسازی مواد آلی یا کلرزدایی آب تغذیه فرآیند اسمز معکوس به کار می رود، ولی مشکلات ناشی از ذرات کربن یا میکروارگانیزم های عبور کرده از فیلتر کربنی در سیستم ها رخ می دهد. پلیمرهای آلی، خصوصاً نوع کاتیونی آنها می توانند غشاها را مسدود کنند و نباید بدون تایید از آنها استفاده شود.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۹- کنترل گرفتگی بیولوژیکی

گرفتگی بیولوژیکی یکی از دلایل عمده در کاهش شار جریان و افزایش قابل ملاحظه افت فشار هیدرولیکی در غشاء است. رشد میکروب‌ها می‌تواند فرآیند اسمز معکوس را دچار گرفتگی بیولوژیکی کند و سبب افت عملکرد شود. اگر چه تشکیل لایه بیولوژیکی مقدمه گرفتگی بیولوژیکی است ولی می‌توان با وجود لایه بیولوژیکی در سطح غشاء گرفتگی بیولوژیکی قابل توجهی نداشت. حتی در آب‌های لب شور تمیز نیز امکان گرفتگی بیولوژی وجود دارد. در روزهای اول توسعه فناوری اسمز معکوس غشاهای سلولز استات در برابر انواع باکتری آسیب‌پذیر بودند. افت شار جریان ناشی از گرفتگی بیولوژیکی، در طول روزها و هفته‌ها، منجر به تغییر در عبور نمک و افزایش انرژی مورد نیاز می‌شود. روش‌های کنترل گرفتگی بیولوژیکی در فرآیندهای اسمز معکوس به کیفیت آب تغذیه، غشاء و محدوده تحمل غشاء برای ضد عفونی شیمیایی خصوصاً با اکسید کننده‌هایی مثل کلر و ازن بستگی دارد.

اگرچه امکان تشکیل محصول جانبی گندزدایی مانع استفاده از کلر می‌شود، ولی گاهی برای ضد عفونی از کلر زنی استفاده می‌شود. غلظت کلر باید به دقت کنترل شود.

بسیاری از انواع غشاهای اسمز معکوس سلولز استاتی تنها تا ۱ ppm کلر آزاد را تحمل می‌کنند. با این حال غشاهای اسمز معکوس کامپوزیتی از قبیل پلی‌آمید نمی‌توانند کلر یا سایر اکسید کننده‌های قوی را تحمل کنند. اگر پیش از غشاهای ناسازگار با کلر آزاد از کلر استفاده شده باشد، باید قبل از غشاء از فرآیند کلرزدایی از قبیل افزودن بی‌سولفیت سدیم یا دی‌اکسید گوگرد استفاده کرد. در سیستم‌های کوچک برای کلر زدایی از کربن فعال گرانولی نیز استفاده می‌شود. میکروب‌هایی که در خروجی سیستم‌های کلر زنی شیمیایی دوباره رشد می‌کنند و یا از

کربن فعال گرانولی عبور می‌کنند، می‌توانند برای سیستم‌های غشایی مشکل ایجاد کنند. در صورت استفاده از سیستم کلرزنی و کلرزدایی باید طراحی قابل اعتماد باشد تا از رسیدن غلظت‌های غیرقابل قبول اکسید کننده‌ها به غشاء ممانعت به عمل آید. کنترل بیولوژیکی با افزودن بی سولفیت سدیم یا سایر ترکیبات بی‌کلر به صورت شوک‌های دوره‌ای در فرآیندهای اسمز معکوس انجام می‌گیرند ضد عفونی با نور ماوراء بنفش می‌تواند به عنوان پیش تصفیه فرآیندهای اسمز معکوس به کار رود. باکتری‌ها می‌تواند منجر به مشکلات ناشی از رشد مجدد شود. اولترافیلتر و میکروفیلتر دو سیستم غشایی هستند که می‌توانند مواد بیولوژیکی را پیش از فرآیند اسمز معکوس کاهش دهند. همچنین می‌توان کنترل باکتری را در غشاء خارج از سرویس انجام داده وقتی زمان توقف فرآیند زیاد است غشاها در محلول محافظ و ذخیره قرار داده می‌شوند تا رشد میکروها تا استفاده از سیستم شستشوی به تعویق بیفتد.

آفت کش‌ها این دسته از طریق آب تغذیه به عنوان افزودنی وارد فرآیند می‌شوند، چون مونوکلر آمین در مقایسه با کلر آزاد فعالیت احیا کنندگی کمتری را از خود نشان می‌دهد به غشاهای پلی‌آکریلیک آسیب چندانی نمی‌رساند بنابراین آفت کش خوبی برای مقابله با لایه بیولوژیکی است.

بی سولفیت سدیم تنها عامل کاهنده‌ای است که به عنوان افزودنی به همراه آب تغذیه استفاده می‌شود این ماده مانع رشد میکرو ارگانیسم‌ها می‌شود. سایر مواد لیست شده به منظور جلوگیری از تخریب غشاء در مدت عدم فعالیت سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۶- پس تصفیه

اغلب جریان‌های تولیدی توسط فرآیند اسمز معکوس نیاز به گونه‌ای از پس تصفیه قبل از توزیع دارند. در پس تصفیه، ضدعفونی، کنترل خوردگی و جدا سازی گازهای حل شده و ترکیبات بی‌ثبات مد نظر است.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۱- ضد عفونی

بسیاری از عوامل بیماری‌زا توسط غشاء‌های اسمز معکوس جدا می‌شوند و کمیت میکروبی در آب تولیدی خیلی خوب است. با این حال ممکن است که میکروب‌ها در طی فرآیند هنگامی که دیواره غشاء تخریب می‌شود (مانند فیبر شکسته) یا وقتی نقصی در سیستم غشایی وجود دارد عبور کنند. طراحی پس تصفیه برای ضد عفونی شبیه همان چیزی است که در واحدهای تصفیه آب رایج است.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۵-۲- کنترل خوردگی

کنترل خوردگی به خاطر نبود کلسیم و قلیائیت و pH اسیدی، در فرآیندهای اسمز معکوس لازم است. این فرآیند خاص هر منطقه بوده و به کیفیت آب تولید شده بستگی داشته و شامل موارد ذیل است:

- کاهش دی اکسید کربن در یک گاززدا
- افزودن کاستیک، بی کربنات سدیم یا کربنات سدیم
- افزایش قلیائیت بی کربناتی و pH و افزودن آهک جهت افزایش یون کلسیم و قلیائیت
- افزودن ماده شیمیایی به عنوان بازدارنده خوردگی
- افزودن کلرید کلسیم برای افزایش مقدار کلسیم

## ۲-۲-۳-۵-۶-۳- جداسازی گازها

فرآیند اسمز معکوس، گازهای محلول را جدا نمی‌کند و تنها مقدار کمی از ترکیبات بی ثبات آلی را جدا می‌سازد، بنابراین این ترکیبات باید در پس تصفیه مربوط به آب تولیدی جدا شوند. سولفید هیدروژن و دی اکسیدکربن عمده‌ترین گازهای موجود در محصول این فرآیند هستند. گوگرد اغلب در آب‌های زیرزمینی وجود دارد و دی اکسیدکربن یا در آب‌های زیرزمینی موجود است یا از طریق اسیدی کردن آب تغذیه ایجاد می‌شود.

اگر آب تولیدی دارای قلیائیت کافی باشد، نیاز به جداسازی دی اکسید کربن نیست زیرا گاز می‌تواند به عنوان منبعی برای قلیائیت بی‌کربناتی جهت کنترل خوردگی استفاده شود. هنگامی که نمک‌زدایی آب‌های زیرزمینی آلوده شده با فرآیند صنعتی مطرح است، مشکل VOC به چشم می‌خورد. عمومی‌ترین روش تصفیه استفاده از گاز زدا (یک برج پر شده با یک دمنده) است. طراحی برج تابعی از VOC موجود در محصول و درجه جداسازی مورد نیاز است. وقتی دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن هر دو وجود دارند جداسازی سولفید هیدروژن با استفاده از گاز زدا لازم است.

اگر pH مربوط به آب تولیدی از ۶/۵ بیشتر باشد، ممکن است لازم باشد قبل از گاززدایی، این pH اسیدی شود. گاز زدهایی که سولفیدها را خارج می‌کنند ممکن است برای به حداقل رساندن بو و مشکلات خوردگی و برای ایمنی بیشتر به شستشو نیاز داشته باشند. شستشو معمولاً با عبور گاز از میان کلر یا محلول کاستیک برای تبدیل سولفید به شکل یونی صورت می‌گیرد. همچنین بسته به قوانین منطقه‌ای در مورد هوا، ممکن است گاز زدایی برای جداسازی VOC به تصفیه گاز خروجی با کربن فعال گرانولی نیاز باشد.

## ۲-۲-۳-۲-۷- دفع پسماند

طراح باید کم هزینه‌ترین روش قابل قبول برای دفع پسماند ایجاد شده از فرآیند پیش تصفیه و باقی مانده‌های ناشی از فرآیندهای غشایی را معرفی کند. آب تغلیظ شده فرآیندهای اسمز معکوس به صورت یک جریان پسماند باید مطابق با مفرات دفع زباله در هر منطقه دفع شود. انواع دفع آب تغلیظ شده برای فرآیند اسمز معکوس شامل موارد ذیل است:

- تخلیه به آب‌های سطحی
- استفاده روی زمین (برای آبیاری یا شستشو پس از مخلوط کردن با آب با TDS پایین)
- دفع به دریا یا سایر روش‌های جایگزین

## ۲-۲-۳-۲-۸- کنترل و ابزار دقیق

تأسیسات کنترل و ابزار دقیق متناسب با نوع فرآیند غشایی، درجه پایش اتوماتیک و کنترل متفاوت است. برخی فرآیندهای اسمز معکوس با عملکرد عادی تمام اتوماتیک هستند و به وسیله اتصال به کامپیوتر کنترل می‌شوند. اگر دما و کدورت آب متغیر باشد، سیستم غشاء باید توسط ابزار اندازه‌گیری پیوسته دما و کدورت آب تغذیه محافظت شود. بدین منظور در فرآیندهای اسمز معکوس روی جریان آب تغذیه و تولیدی، نمایشگر هدایت الکتریکی نصب می‌شود.

معمولاً روی جریان آب تغذیه و آب تولیدی یا آب تولیدی و آب تغلیظ شده دبی سنج نصب می‌شود. نمایشگرهای فشار، تمام فشارهای بحرانی و اختلاف فشارها مانند فشار آب تغذیه بین مراحل، آب تغلیظ شده و آب تولیدی را نشان می‌دهد. امروزه فرآیندهای اسمز معکوس مربوط به آب آشامیدنی با سیستم‌های کنترلی بر پایه PLC طراحی شده‌اند. این

سیستم‌ها می‌توانند برای کنترل جریان‌ها فشارها و سایر پارامترها برنامه‌ریزی شوند. بسیاری از فرآیندهای اسمز معکوس دارای کنترل‌هایی هستند که هنگام خاموشی به طور اتوماتیک عملیات شستشو را انجام می‌دهند. بسیاری از واحدهای بزرگ اسمز معکوس هوشمند و کامپیوتری هستند و داده‌های عملکرد را برای پایش آن محاسبه و مقایسه می‌کنند و زمان شستشوی شیمیایی غشاء را تشخیص می‌دهند. اجزاء غشاء باید محافظت شوند. اگر احتمال رخ دادن مشکلاتی چون تغییرات ناخواسته در آب تولیدی وجود داشته باشد، باید پیش‌بینی‌های لازم جهت خاموش کردن سیستم صورت گیرد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹- تجهیزات سیستم اسمز معکوس

در ۲۰ سال اخیر، پیشرفت‌های مهمی در فناوری غشاء صورت گرفته که تأثیر هزینه و ظرفیت اجرای فرآیندها را بهبود بخشیده است. امروزه فناوری اسمز معکوس به طور فزاینده‌ای در دنیا برای حل مشکلات مختلف در تصفیه آب به کار می‌رود. حرکت در مسیر پیشرفت و پیشبرد این فناوری نیاز به شناخت تجهیزات و ملاحظات خاص مربوط به ساخت برخی از آنها دارد. در این قسمت بطور خلاصه به این تجهیزات شامل انواع غشاءها، مخازن تحت فشار، پمپ‌های فشار قوی، کارتریج فیلترها، سیستم‌های شستشوی شیمیایی و غیره و ملاحظات خاص مربوط به ساخت برخی از آنها از جمله غشاءها به عنوان مهمترین جزء یک فرآیند اسمز معکوس پرداخته شده است.

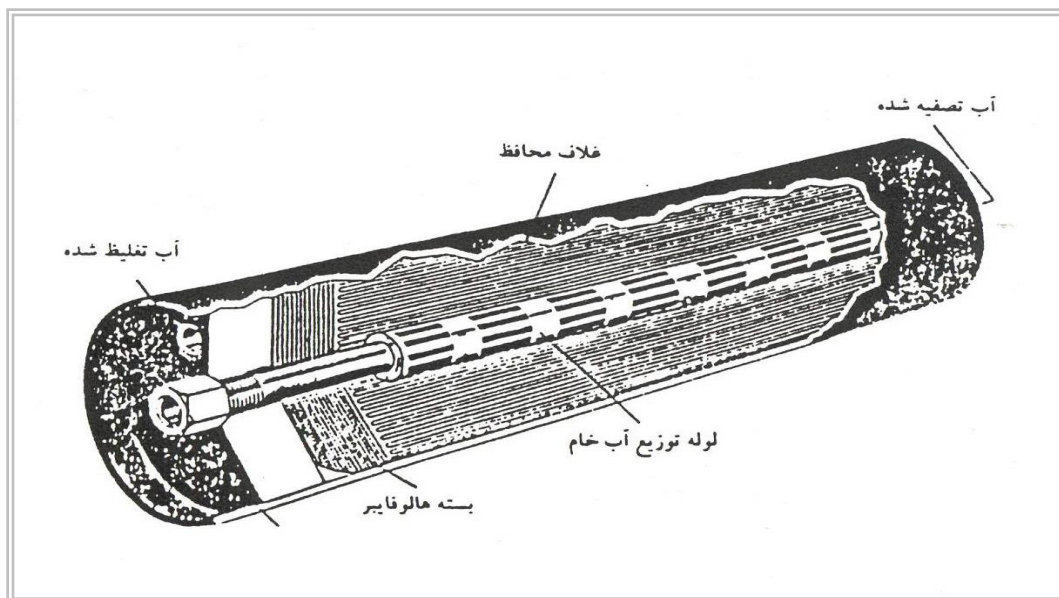
## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۱- غشاءها

امروزه برای نمک‌زدایی آب دریا و آب لب شور بیشتر از دو نوع غشاء حلزونی و الیافی

استفاده می‌شود. دو نوع دیگر غشاء یعنی لوله‌ای و صفحه‌ای، به ندرت در کاربردهای نمک‌زدایی دیده می‌شوند ولی در بسیاری از صنایع غذایی و کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

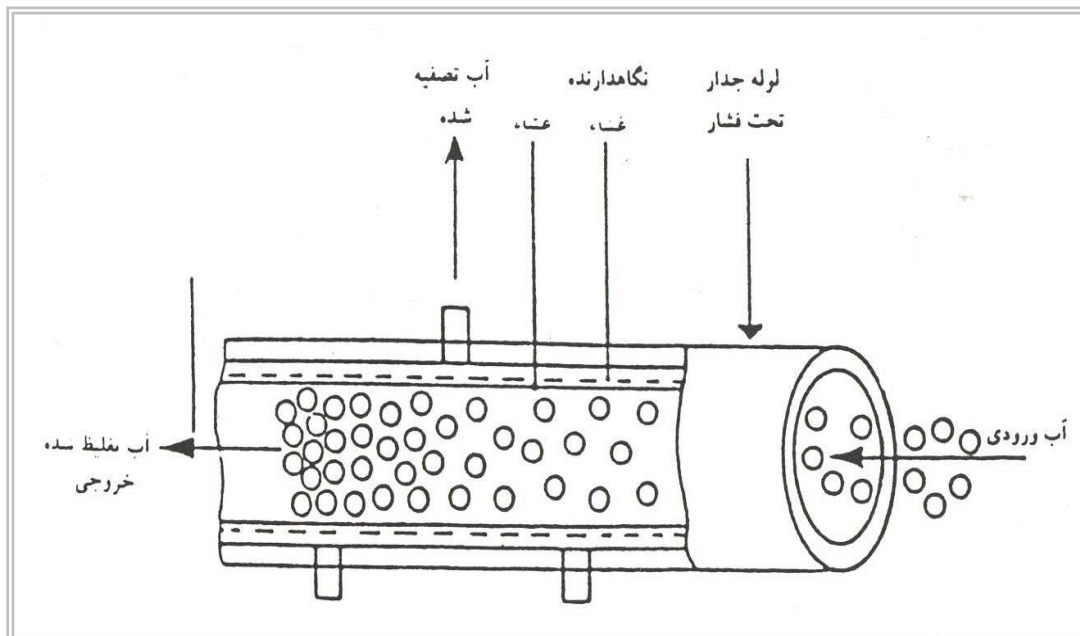
از انواع مدولهای موجود، مدولهای هالوفایبر، لوله‌ای و با غشا صفحه‌ای (حلزونی و قابی شکل) از همه مهم‌ترند.

شکل‌های (۱۱-۲) تا (۱۴-۲)، مدول‌های هالوفایبر، لوله‌ای، حلزونی با جریان محوری و حلزونی با جریان آب تصفیه شده خارج از محور و قابی را نشان می‌دهند.

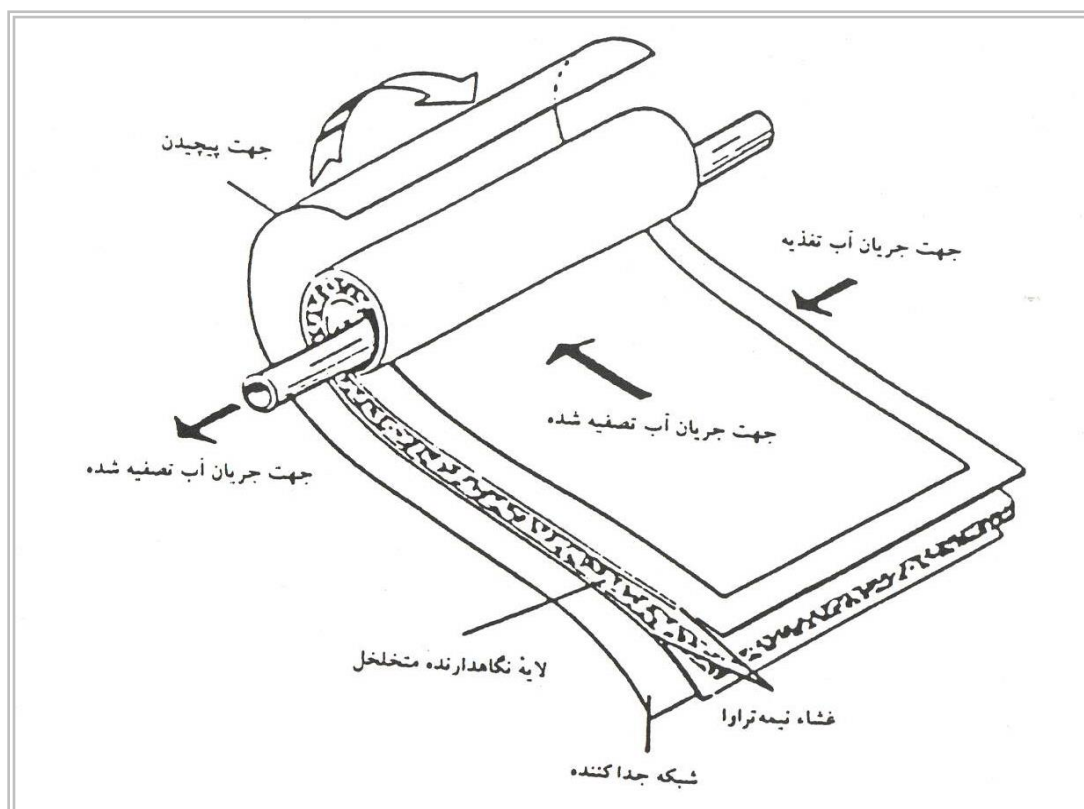


شکل (۱۱-۲) مدول هالوفایبر (Hollow Fiber Module)

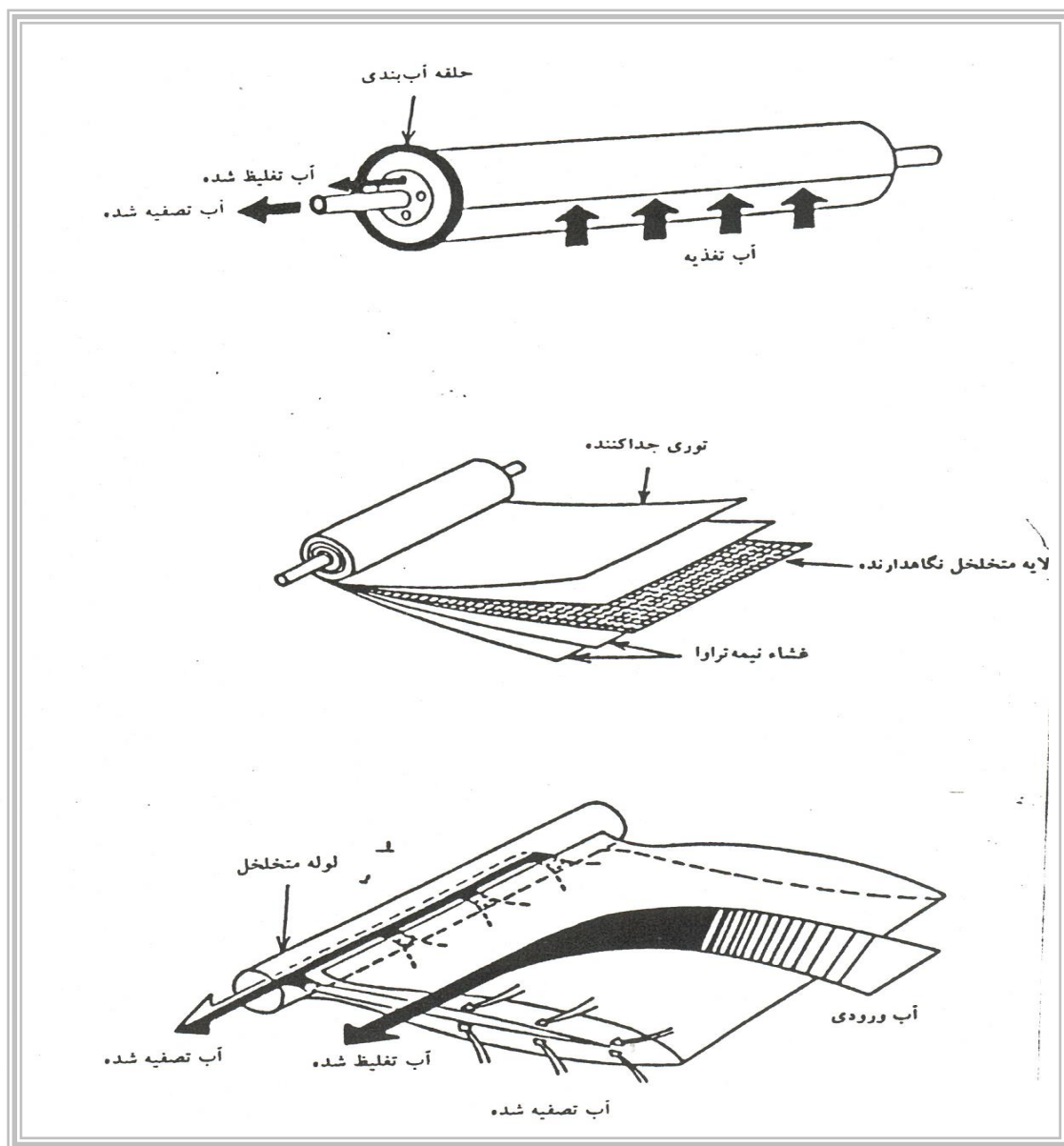




شکل (۲-۱۲) مدول لوله‌ای (مقطع)



شکل (۲-۱۳) مدول حلزونی با جریان محوری



شکل (۲-۱۴) مدول حلزونی با جریان آب تصفیه شده خارج از محور

### الف) غشاء حلزونی

این مدل از صفحات غشایی تخت تشکیل شده است. صفحات غشایی تخت مشتمل بر

قسمت‌های ذیل است:

- مواد پشتیبان برای فراهم کردن مقاومت مکانیکی
- یک لایه فعال متراکم

### – یک لایه اسفنجی متخلخل برای نگهداری لایه فعال

ماده غشاء ممکن است سلولزی (غشاء استات سلولز) یا غیر سلولزی (غشاء کامپوزیت) باشد. غشاءهای استات سلولز از دو لایه از دو شکل مختلف یک پلیمر به صورت غیرمتقارن تشکیل شده‌اند. غشاءهای کامپوزیت از دو لایه از دو پلیمر کاملاً متفاوت تشکیل شده‌اند که پایه متخلخل آن اغلب پلی سولفون است. غشاء در پوششی قرار می‌گیرد و از سه طرف درزگیری می‌شود. یک توری که حامل آب تولیدی نامیده می‌شود داخل آن قرار می‌گیرد. پوشش به دور یک لوله جمع کننده مرکزی که قسمت باز آن به داخل لوله راه دارد می‌پیچد و درزگیری می‌شود. پوشش‌ها یا برگه‌های مختلف با یک سری توری میانی به هم متصل می‌گردند. این پوشش‌ها جدا کننده آب تغذیه از آب تغلیظ شده هستند.

### ب) غشاء الیافی

در طراحی المان غشاء الیافی، تعداد زیادی از غشاهای الیافی در مخزن تحت فشار قرار می‌گیرد. ماده اصلی این غشاءها پلی‌آمید یا مخلوطی از سلولز استات‌ها است. غشاءها دارای قطر خارجی حدود ۳۰۰-۱۰۰ میکرون و قطر داخلی بین ۵۰ و ۱۵۰ میکرون هستند. معمولاً رشته‌ها به صورت U شکل هستند و دو انتهای آن در یک صفحه نگهدارنده از جنس اپوکسی قرار می‌گیرد. صفحه نگهدارنده نیز داخل یک مخزن تحت فشار قرار می‌گیرد. آب نمک با فشار در سطح خارجی الیاف وارد مخزن می‌شود. تحت فشار، آب خالص از دیواره رشته‌ها عبور می‌کند و داخل رشته جریان می‌یابد.

### ج) غشاء لوله‌ای

در غشاء لوله‌ای از یک لول متخلخل استفاده می‌شود. این لوله قطرهای مختلفی دارد که به کاربرد و تولید کننده آن بستگی دارد. غشاء از پلیمرهای متعددی تشکیل شده است و معمولاً

داخل لوله قرار می گیرد. برخی از غشاءها دینامیک هستند یعنی ماده غشاء می تواند روی بستر پی شیبان بنشیند. قابل تعمیر بودن این غشاء از مزایای آن در بسیاری از کاربردها است. لوله ها اغلب دسته شده و داخل محفظه ای با یک مسیر آب تغذیه آب تولیدی و آب تغلیظ شده قرار می گیرند. عموماً غشاء های لوله ای از غشاء های الیافی و حلزونی گرانترند و بازده فضایی پایین تری دارند، بنابراین این طراحی عمدتاً در کاربردهای خاصی استفاده می شود.

#### **(د) غشاء صفحه ای**

در بسیاری از بازارهای اختصاصی صنعتی مانند فراورش غذایی دیده می شود ولی استفاده زیادی در تولید آب تصفیه شده ندارد. این شکل از غشاء مانند فیلترهای تحت فشار صفحه ای هستند. دستگاه دارای فضای باز برای ورودی آب تغذیه و تنها یک مسیر برای عبور آن است. این طراحی برای آب تغذیه با TDS بالا نیز قابل استفاده است. معمولاً این دستگاه دارای ظرفیت کمی است و نسبت به سایر سیستم های اسمز معکوس بیشترین هزینه را به ازای هر واحد ظرفیت دارد. در کویت برای توسعه سیستم های صفحه ای با هزینه جهت نمک زدایی از آب دریا سرمایه گذاری بزرگی صورت گرفت ولی موفقیتی در بر نداشت.

#### **(ه) طراحی شکل غشاء**

یکی از نکات مهم اصلی در طراحی شکل غشاء توجه به پلاریزاسیون غلظتی است. هنگامی که آب خالص با فشار از غشاء می گذرد، یک لایه غلیظ نمک در قسمت تماس آب تغذیه با غشاء تشکیل می شود. غلظت این لایه نمک می تواند تا چندین برابر غلظت محلول بالا برود. این پدیده سبب به وجود آمدن پلاریزاسیون غلظتی می شود که می توان مشکلات متعددی ایجاد کند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۲- مخازن تحت فشار

به دلیل فشار بالای فناوری اسمز معکوس و حساسیت و صدمه پذیری بالای غشاءها از مخازن تحت فشار استفاده می‌شود. مخازن تحت فشار محفظه‌های مستحکم فلزی و یا پلیمری هستند که سطح وسیعی از غشاء را در حجم پایینی جای می‌دهند.

## ۲-۲-۳-۷-۳-۹-۲- پمپ فشار و قوی

پمپ به منظور خشی کردن فشار اسمزی و جبران کردن افت فشار ناشی از وجود غشاء و تجهیزات موجود در مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشتر انرژی الکتریکی مورد نیاز فرآیند اسمز معکوس به وسیله پمپ‌ها مصرف می‌شود. در ۱۰ سال گذشته فشار مؤثر مورد نیاز برای خالص سازی و انرژی الکتریکی لازم در فرآیند به مقدار زیادی کاهش یافته است. فشار مؤثر: مورد نیاز برای فرآیند اسمز معکوس تابعی از تغییرات فشار اسمزی و مقاومت هیدرولیکی است. فشار هیدرولیکی آب تولیدی در فشار مؤثر نقش مهمی دارد. در کاربردهای معمولی مربوط به آب لب شور، فشار هیدرولیکی آب تولیدی هنگام ورودی مستقیم به مخازن زمینی یا گاز زدا می‌تواند بین ۳ تا ۱۰ متر ستون آب باشد. دما بر دشت جریان و شدت جریان بر فشار مؤثر تأثیر می‌گذارد. یعنی افزایش شدت جریان متناسب با افزایش فشار مؤثر است. بازده بالای موتور و پمپ مهمترین پارامتر در انتخاب پمپ آب تغذیه است. با استفاده از تجهیزات خاص بازیافت انرژی انرژی لازم برای پمپ واحدهای اسمز معکوس مربوط به آب لب شور  $2 \text{ kwh/m}^3 - 0.5$  و در مورد آب دریا کمتر از  $3 \text{ kwh/m}^3$  است.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۴- واحد بازیافت انرژی

درصد بازیافت انرژی در تعیین مشخصات سیستم اسمز معکوس تأثیر چندانی ندارد.

چهارنوع اصلی واحدهای بازیافت انرژی عبارتند از :

- چرخ پلتون
- مبدل کاری
- مبدل فشاری
- توربوشارژر هیدرولیکی

به طور کلی در مورد آب دریا انرژی بازیافت شده ۳۵-۲۵ درصد انرژی ورودی فرایندهای اسمز معکوس است. برخی از واحدهای بزرگ مربوط به نمک زدایی آب دریا که امروزه ساخته می‌شوند، از چرخ پلتون برای بازیافت انرژی استفاده می‌کنند. آب شیرین کن‌های با ظرفیت ۲۰۰۰ gpm و بیشتر دارای بازده بالای بازیافت (در بیشتر موارد بیش از ۸۰٪) هستند. اخیراً در آب شیرین کن‌های کوچکتر، از واحد مبدل فشاری استفاده می‌شود. بازده این واحد بیشتر از ۹۰٪ است. بازده توربوشارژهای جدید ۷۰-۶۰ درصد است. این توربوشارژها از نظر اندازه دارای محدودیت هستند. ظرفیت بزرگترین واحدی که با این سیستم کار می‌کند ۱۸۰۰ gpm است. تا قبل از ابداع غشاءهای آب لب شور با فشار بسیار پایین دلیل چندانی برای استفاده از تجهیزات بازیافت انرژی در طراحی فرآیند وجود نداشت، مگر جایی که TDS بالا و درصد بازیافت پایین باشد.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۵- مخازن تهیه محلول‌ها و تزریق کننده‌های مواد شیمیایی

این تجهیزات به منظور تهیه اسید با غلظت مناسب و تزریق آن به آب تغذیه برای تنظیم pH آب و تأمین و تزریق فسفات به آب برای جلوگیری از رسوب نمک‌های کلسیم و منیزیم تدارک دیده شده است.

بیشتر آب شیرین‌کن‌های اسمز معکوس به افزودن بازدارنده رسوب و گاهی اسید برای کنترل رسوب در غشاء نیاز دارند زیرا ممکن است یکی از ترکیبات موجود آب تغذیه تغلیظ شده به حالت فوق اشباع در آید. سیستم‌های ذخیره سازی و تزریق این مواد شیمیایی شامل مخازن ذخیره بالک و روزانه، پمپ‌ها، لوله‌های کالیبراسیون و سیستم‌های کنترل و پایش است.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۶- فیلتر

این تجهیزات، با حذف مواد معلق و بای مانده کلر ناشی از ضدعفونی آب از آب به منظور افزایش عمر غشاء مورد استفاده قرار می‌گیرد عموماً از کارتریج فیلترهای ۱۰-۵ میکرونی استفاده می‌شود. این فیلترها برای جبران تغییرات نامتعارف کیفیت آب تغذیه که موجب تخریب پمپ یا غشاءها می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلترها قبل از پمپ فشار قوی قرار داده می‌شوند.

## ۲-۲-۳-۷-۲-۹-۷- سیستم شستشوی شیمیایی

سیستم شستشوی شیمیایی فرآیند اسمز معکوس باید برای تمام مراحل شستشو و نگهداری غشاء طراحی شود.

این سیستم معمولاً شامل قسمت‌های ذیل است:

- تانک‌های هم زن دار جهت حفظ و نگهداری محلول‌ها
- یک پمپ با هد کافی جهت چرخاندن محلول در مسیر تانک به داخل غشاء‌ها و برگرداندن آن به تانک یک کارتریج فیلتر برای گرفتن جامدات معلق موجود در محلول
- شیرها و خطوط لوله برای انتقال محلول
- تجهیزات کنترل سیستم شامل سوئیچ‌های، دما، نمایشگر pH و سطح سنج تانک
- ابزار گرم کننده محلول شستشو مانند گرم کننده‌های غوطه‌ور برای افزایش دمای محلول و بهبود بازده شستشوی شیمیایی خصوصاً وقتی شستشو با مورد شوینده انجام می‌شود.
- ابزار خنک کننده محلول شستشو را مانند مبدل‌های حرارتی بیرون تانک محلول شستشو یا مانند کوئل‌های خنک کننده در داخل تانک برای کنترل حداکثر دمای محلول در صورت نیاز به کار می‌گیرند.

## مزایا و معایب روش RO - ۱-۲-۳-۴-۵-۶-۷-۸-۹-۱۰

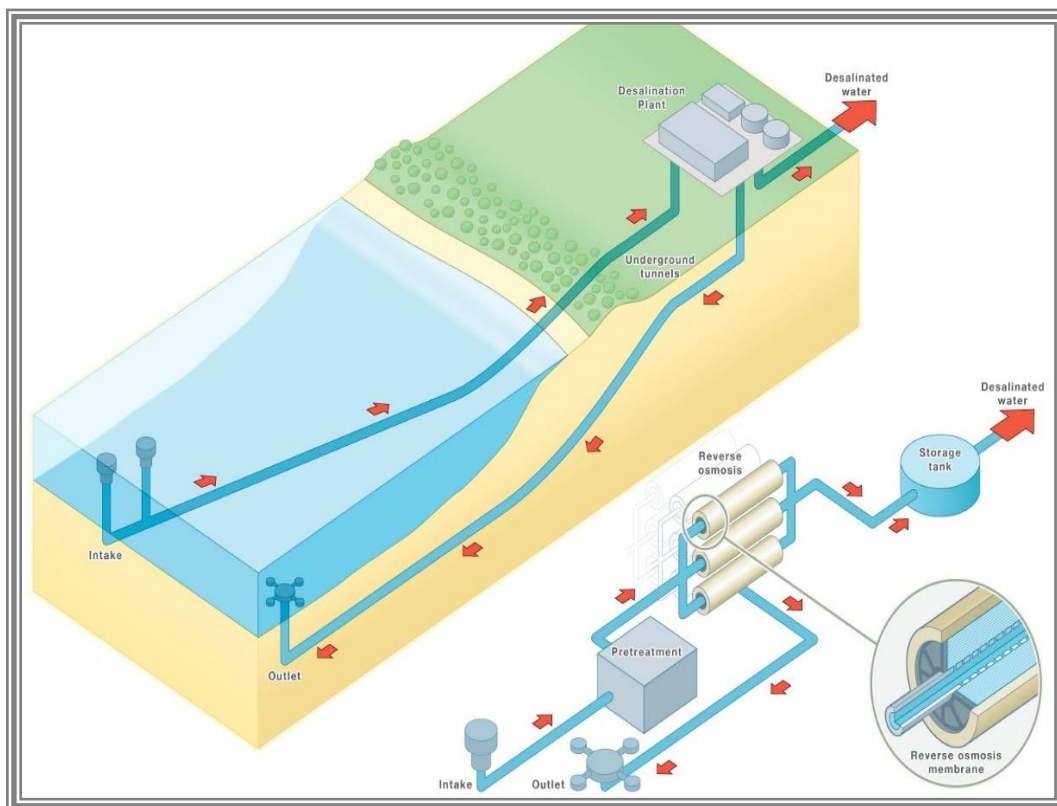
### الف) مزایا RO:

- ارزانی تجهیزات و سرعت عمل در نصب و بهره‌برداری
- قابلیت بهره‌برداری در محدوده‌های متغیر و تنوع از چند لیتر در روز تا میلیون مترمکعب در روز
- عدم نیاز به انرژی حرارتی
- مصرف بسیار کم مواد شیمیایی جهت شستشو
- عدم نیاز به توقف کامل سیستم برای تعمیرات و یا شستشوی دوره‌ای (با قابلیت بالایی که سیستم دارد می‌تواند به صورت موازی ده‌ها واحد را طراحی و نصب کرد و که هر کدام به صورت مجزا از مدار خارج شده و یا در مدار قرار می‌گیرند، اما در سیستم MSF یا MED هر کدام از افکت‌ها را نمی‌توان بدون توقف کل پروسه تعمیر کرد).

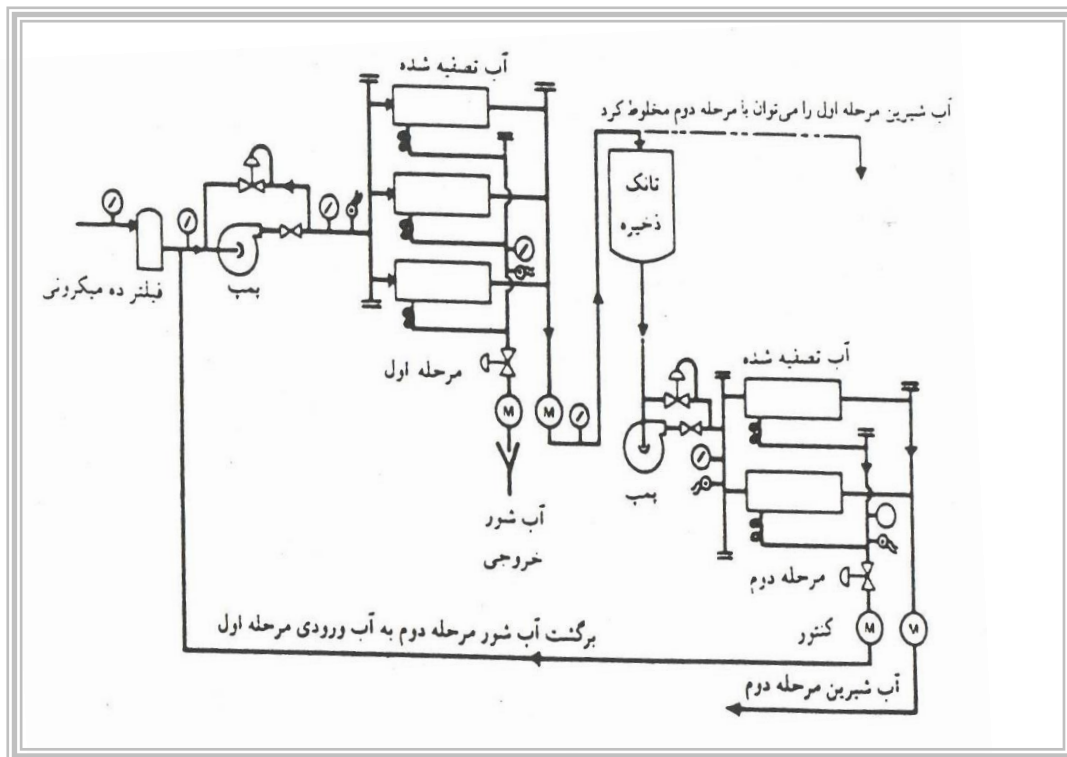


## ب) معایب روش RO:

- گرانی فیلترهای غشایی نیمه تراوا و طول عمر پایین (۲-۵ سال)
  - در صورت استفاده از آب دریا برای سیستم، در هوای طوفانی باید کار متوقف شود زیرا ذرات معلق در آب افزایش می‌یابد و ممکن است از مقدار طراحی بیشتر شود.
  - نیاز به استفاده از مواد تجهیزات با استاندارد بالا
  - نیاز به تعمیرات منظم و تجهیزات یدکی
  - قابلیت رشد باکتری در فیلترهای غشایی که روی طعم بوی آب خروجی تأثیر می‌گذارد.
  - نیاز حتمی به استفاده از پیش تصفیه‌های متعدد با توجه به کیفیت آب ورودی
  - کارکرد فشار بالا که باعث ایجاد مشکلات مکانیکی می‌شود.
- در اشکال (۲-۱۵) و (۲-۱۶) دیاگرام شماتیک واحد اسمز معکوس با تغذیه از آب دریا و شمایی از یک سیستم اسمز معکوس دو مرحله‌ای برای تصفیه آب نمایش داده شده است.



شکل (۲-۱۵) دیاگرام شماتیک واحد اسمز معکوس با تغذیه آب دریا



شکل (۲-۱۶) شمایی از یک سیستم اسمز معکوس دو مرحله‌ای برای تصفیه آب

## ۲-۲-۴- فرآیند نمک زدایی در مقایسه با سایر منابع تامین آب

نمک‌زدایی از آب‌های شور در مقایسه با استفاده مجدد از فاضلاب جهت تامین آب نوشیدنی دارای مزیت نسبی است، هرچند که استفاده مجدد از فاضلاب جهت مصارف صنعتی و کشاورزی کم هزینه‌تر است.

با مطالعه فناوری‌های جدید و پیشرفت‌های دیگر در این زمینه می‌توان دریافت که بسیاری از فناوری‌های نمک‌زدایی جدید با میزان‌های متفاوت از موفقیت آزمایش و تحقیق شده‌اند. بعضی از آن‌ها هنوز در مرحله محاسبات کاغذی می‌باشند در حالی که برخی دیگر در مرحله جذب سرمایه مورد نیاز تحقیق هستند.

در حال حاضر یکی از مثال‌های موثر و جدید برای تحقیقات در نمک‌زدایی، تمرکز بر

روی بیشتر کردن راندمان انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌باشد. فرآیند پاسارل (Passarelli Process) در این کار ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که غشاهای نانولوله‌ای به شدت در تصفیه آب موثرند و می‌توانند یک فناوری نمک‌زدایی حیاتی را به وجود آورند که انرژی بسیار کمتری از انرژی اسمز معکوس نیاز دارد.

در ۲۳ ژوئن ۲۰۰۸ واحد فناوری‌های آب زیمنس گزارش داده که یک فناوری جدید نمک‌زدایی را توسعه داده که نمک‌زدایی یک متر مکعب آب را تنها با انرژی ۱/۵ کیلووات ساعت انجام می‌دهد و این نصف میزان انرژی است که بقیه‌ی فناوری‌ها استفاده می‌کنند.

دستگاه نمک‌زدای خورشیدی راه بسیار ساده‌ای است که با استفاده از انرژی گرمای خورشید کار می‌کند و مخصوصاً برای هنگامی که تجهیزات نمک‌زدایی در دسترس نمی‌باشد. از انواع اصلی دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی مخروطی شکل، جعبه‌ای شکل و گودالی هستند. برای دستگاه‌های مخروطی شکل آب شور در ته ظرف قرار می‌گیرد و سپس بوسیله‌ی انرژی خورشیدی که از میان سطح شفاف پلاستیکی دریافت می‌کند تبخیر می‌شود و بر روی سطح پلاستیک‌ها چگالیده شده و از روی سرازیری آن به سمت پایین چکه می‌کند و در محل‌های مخصوص جمع‌آوری می‌شود. مدل‌های جعبه‌ای پیچیده‌تر و انواع گودالی آن پیچیدگی کمتری دارند. در جدول (۱-۲) مقایسه روش‌های موجود نمک‌زدایی از آب ارائه شده است. برای تعیین روش نمک‌زدایی می‌بایست سه پارامتر مدنظر قرار می‌گیرد:

الف) کیفیت آب خام مورد پذیرش در روش‌های مختلف

ب) کیفیت آب خام تولیدی در روش‌های مختلف

ج) هزینه آب تولیدی

اصولاً راندمان دستگاه‌های تصفیه آب بستگی به مقدار املاح موجود در آب خام دارد و در این مورد برای هر روش محدودیت‌ها و شرایط خاص وجود دارد که آب خام مورد پذیرش باید دارای آن شرایط باشد. از جمله عوامل اصلی آب خام جهت انتخاب روش تصفیه پارامتر TDS است که در جدول (۲-۲) ارائه شده است.

جدول (۲-۱) مقایسه روش‌های موجود نم‌زدایی از آب

روش	هزینه احداث	هزینه بهره برداری	قابلیت اجرایی	نیاز به نیروی متخصص	راندمان فرآیند	سایر موارد
اسمز معکوس	پائین تر از سایر فرایندها	پائین تر از سایر فرایندها	بسیار خوب	نسبتاً دارد	خوب	غشاهای در برابر آلودگی حساس هستند
الکترو دیالیز	بالا تر از اسمز معکوس	قابل مقایسه با اسمز معکوس	بسیار خوب	بهره برداری ساده تر از اسمز معکوس	خیلی خوب	غشاهای در برابر مواد آلی حساس هستند
تقطیر	زیاد	زیاد	خوب	نسبتاً دارد	خوب	مصرف انرژی بالا
تبادل یونی	پائین	بسیار بالا	خود	نسبتاً دارد	پائین	از این روش جهت $TDS < 1000 \text{ mg/l}$ استفاده می‌شود
روش یخ زدن	-	-	-	-	-	از این روش در مقیاس تجاری استفاده نشده است
ترسیب شیمیایی	پائین	پائین	بسیار خوب	نسبتاً کم	بسیار پائین و وابسته به غلظت بیکربنات	تنها به طریق سختی گیری املاح کاهش می‌یابد.

جدول (۲-۲) میزان TDS روش‌های نمکزدایی از آب

روش تصفیه	محدود TDS آب خام مورد پذیرش
تبادل یونی	0-500 ppm
الکترودیالیز	400-3000 ppm
اسمز معکوس	50-60000 ppm
تقطیر VC و MSF و MED	25000-100000 ppm

به طور کلی به کار بردن روش‌های ذکر شده در خارج از محدوده ارقام یاد شده، باعث افزایش تجهیزات پیش تصفیه و آماده سازی آب شده و کاهش بازدهی کل و افزایش هزینه‌های مربوطه را در بر خواهد داشت. بنابراین از نظر هزینه‌های روش‌های تصفیه آب باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

- هزینه استهلاک سرمایه اولیه دستگاه
- هزینه انرژی حرارتی، شیمیایی و یا معادل آن‌ها برای تولید آب
- هزینه انرژی مورد نیاز و هزینه آب و پمپ‌های مربوط و سایر تجهیزات جانبی
- هزینه نظارت و مهندسی، تعمیر و نگهداری و مصرف مواد شیمیایی و مصرفی
- هزینه‌های ساختمان، احداث فونداسیون، راه و تاسیسات

## ۲-۲-۵- انتخاب گزینه‌های پیشنهادی فرآیند نمک زدایی

با توجه به توضیحات ارائه شده گزینه‌های زیر برای نمک‌زدایی از آب دریای عمان جهت مصارف شرب، بهداشتی و فضای سبز پیشنهاد می‌گردد:

گزینه اول؛ استفاده از فرآیند اسمز معکوس

گزینه دوم؛ استفاده از فرآیند MED

گزینه سوم؛ استفاده از فرآیند MSF

## ۲-۳- مروری بر مقالات گذشته

به طور کلی می‌توان گفت، انتقال جرم از یک محیط به محیط دیگر در اثر اختلاف غلظت و یا به عبارت بهتر در اثر اختلاف پتانسیل شیمیایی، به وجود می‌آید. اسمز معکوس<sup>۱</sup> فرآیندی است که در آن از فشار برای معکوس نمودن جریان اسمزی آب از درون یک غشای نیمه تراوا استفاده می‌شود. میتوان گفت یکی از بهترین روشهای نمک زدائی از آبهای لب شور، استفاده از فرایند اسمز معکوس می‌باشد، زیرا سیستم پیچیده‌ای نداشته و راهبری آن، آسانتر از دیگر روش‌ها می‌باشد لیکن با توجه به توسعه نرم افزارهای مهندسی و روش‌های پیشرفته‌ی تولید غشاهای پلیمری، استفاده از این فناوریها توجیه مناسب و بیشتری دارد. علیهذا در این فصل به بررسی تاریخچه اسمز معکوس و کارهای انجام شده در خصوص مدلسازی و بهینه سازی این فرآیند می‌پردازیم.

اسمز معکوس به کمک غشاءها، اولین بار در سال ۱۷۴۸ میلادی توسط ژان آنتونی نوله انجام شد. این روش در ۲۰۰ سال پس از آن به عنوان یک روش آزمایشگاهی باقی ماند. [6]

تاریخچه کاربرد روش اسمز معکوس به سال ۱۹۴۹ میلادی بر می‌گردد. در این سال در دانشگاه کالیفرنیا آمریکا برای اولین بار روش تولید آب به کمک غشاهای ممبران برای تصفیه آب دریا به کار بردند. بعدها در اواسط دهه ۱۹۵۰ میلادی تحقیقات و آزمایش‌هایی توسط رید و برتون در این دانشگاه و دانشگاه فلوریدا انجام پذیرفت که منجر به تولید موفقیت آمیز آب آشامیدنی از آب دریا شد، اما حجم آب آشامیدنی بدین روش همچنان برای مصارف تجاری ناکارآمد بود. [3,4]

<sup>1</sup> reverse osmosis

با روند تحقیقات در طول زمان و با پیشرفت تدریجی تکنولوژی، نخستین غشاء اسمز معکوس از سلولزاستات ساخته شد و در اواخر سال های ۱۹۶۰ روش اسمز معکوس به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت. هم اکنون نیز برای غشاهای رایج مورد استفاده در اسمز معکوس می توان از پلی آمید و سلولزاستات نام برد.

اسمز معکوس، تکنولوژی مدرنی است که آب را برای مصارف متعددی از جمله نیمه رساناها، خوراک پزی، تکنولوژی زیستی، داروها، تولید برق، نمک زدایی آب دریا و آب خوردنی شهری، تصفیه می نماید. از ماه جولای سال ۲۰۰۴ عمده ترین روش مورد استفاده روش اسمز معکوس بوده که ۸۵٪ تولید کل جهان را به خود اختصاص داده است. [5]

کارایی سیستم اسمز معکوس بعد از مدتی کارکرد به صورت کاهش آبدهی سیستم و نیاز به افزایش اختلاف فشار به منظور تامین آبدهی مورد نظر کاهش می یابد. کاهش کارایی اسمز معکوس به دلایل مختلف از جمله وجود مواد آلی در آب می تواند باشد که این مواد یا با جذب غشا شدن و یا با یونیزه شدن، میزان آب دهی فرآیند اسمز معکوس را کم می کند. در ادامه به بررسی راهکارهای جلوگیری از این حالات با مدلسازی انجام می شود.

مقاله ای با عنوان مدل شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه سازی بهره برداری از فرآیند نمکزدایی آب دریا در مجله Desalination توسط آقای Y.G.Lee و همکارانش در سال ۲۰۰۹ چاپ شده است که در آن همانگونه که از عنوان برمی آید بهینه سازی فرآیند نمکزدایی به اثبات رسیده است \*

مجتبی شیر و همکارانش ۱۳۸۹ طی مدلسازی فرآیند اسمز معکوس با استفاده از شبکه عصبی و بهینه سازی آن توسط الگوریتم ژنتیک، به این نتیجه رسیدند که با بررسی داده های

ورودی مانند دما، فشار، TDS و شار ورودی می توان مقدار آب خالص و دبی خروجی را کاملاً کنترل نمود. [۱]

نصرالله کثیری و همکارانش ۱۳۹۱ از بررسی تاثیر پارامترهای مختلف عملیاتی بر گرفتگی غشاء اسمز معکوس در تصفیه پساب نفتی به این نتیجه رسیدند که مدلسازی شبکه عصبی فرآیند می تواند عوامل تاثیرگذار در گرفتگی غشاها را شناسایی نماید. [۲]

علی مرادی و همکارانش در مجله Springer Science + Business Media در اکتبر ۲۰۱۲ طی مقاله ای با عنوان پیش بینی عملکرد غشاهای اسمز معکوس با استفاده از مدل سازی ریاضی و شبکه عصبی توانستند عملکرد این غشاها را پیش بینی نمایند. در این مطالعه، ب عملکرد غشاهای اسمز معکوس را با استفاده از فاکتور جداسازی، شارحلال خالص عبوری و کل شار عبوری از غشاء بر پایه مدل شبکه عصبی پایه شعاعی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش کارایی سیستم را می تواند پیش بینی نماید. [۳]

اسماعیلی سلامی شهید در سال ۱۳۹۲ رفتار فیلترهای SW30-2540 را با شبکه عصبی بررسی نمود. او نتایج نشان داد که با وارد نمودن داده ها و میزان غلظت ها سایر پارامترهای آب ورودی توسط کاربر مانند TDS خروجی را می توان کاملاً کنترل نمود. [۴]



## فصل ۳:

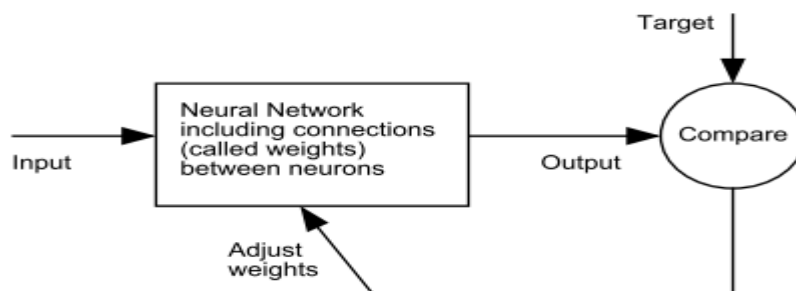
### الگوریتم های هوش مصنوعی

## ۳-۱- مقدمه

در این بخش تئوری حاکم بر مدل سازی آورده شده است در بخش اول به بیان تئوری شبکه عصبی و در بخش دوم به بیان تئوری الگوریتم ژنتیک می پردازیم.

## ۳-۲- شبکه عصبی

شبکه های عصبی از عناصر عملیاتی ساده ای ساخته می شوند که به صورت موازی در کنار هم عمل می کنند. این عناصر از سیستم های عصبی زیستی الهام گرفته شده اند. در طبیعت، عملکرد شبکه های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می شود. بنابراین ما می توانیم یک ساختار مصنوعی به تبعیت از شبکه های طبیعی بسازیم و با تنظیم مقادیر هر اتصال، تحت عنوان وزن اتصال، نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین نماییم. [۱] پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاس خاصی می شود. همانطور که در شکل زیر دیده می شود، شبکه بر مبنای تطابق و همسنگی بین ورودی و هدف سازگار می شود تا اینکه خروجی شبکه و خروجی مورد نظر ما (هدف) بر هم منطبق گردند. عموماً تعداد زیادی از این زوج های ورودی و خروجی به کار گرفته می شوند تا در این روند که از آن تحت عنوان یادگیری نظارت شده یاد می شود، شبکه آموزش داده شود. [۱]



شکل (۳-۱) نحوه عملکرد شبکه های عصبی [۱]

از شبکه‌های عصبی برای پیاده‌سازی توابع پیچیده در زمینه‌های مختلف از جمله تشخیص الگو، تشخیص هویت، طبقه‌بندی، پردازش صحبت و تصویر و سیستم‌های کنترلی استفاده می‌شود. که در این رابطه در بخش‌های بعدی توضیحات بیشتری خواهیم داد. امروزه شبکه‌های عصبی را برای حل مسائل دشواری که حل آن‌ها با روش‌های معمول دشوار می‌باشد، استفاده می‌کنند. تأکید این پژوهش بیشتر بر نمونه‌های کاربردی از شبکه‌های عصبی در مهندسی، امور مالی و سایر کاربردی‌های عملی می‌باشد.

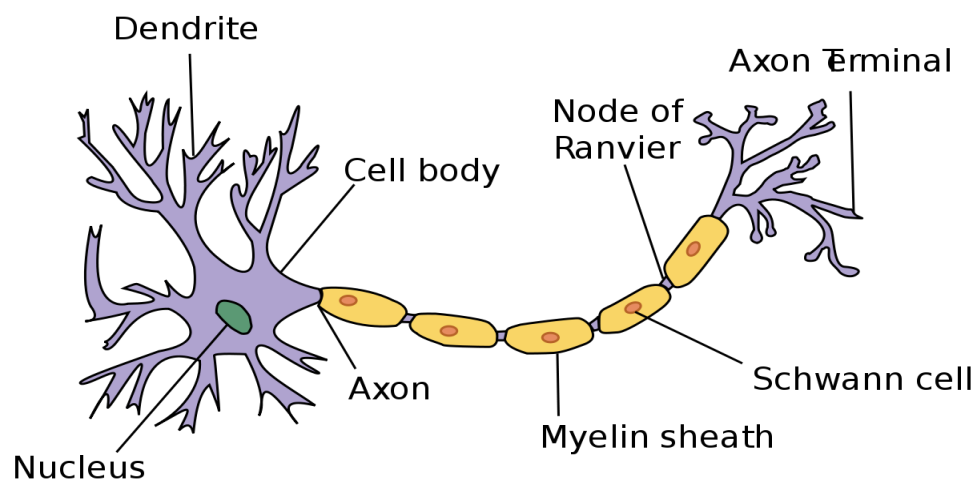
عموماً برای آموزش شبکه‌های عصبی از روش‌های نظارت شده استفاده می‌شود اما می‌توان شبکه‌ها را با روش‌های آموزش غیر نظارتی آموزش داد که کاربرد آن‌ها عموماً در تشخیص خوشه‌های داده‌ای می‌باشد. گونه‌های خاصی از شبکه‌های عصبی مثل هاپفیلد و شبکه‌های خطی به صورت مستقیم توسط طراح، طراحی می‌شوند. به‌طور خلاصه می‌توان گفت روش‌های مختلفی برای طراحی تکنیک‌های یادگیری موجود می‌باشد و کاربر در انتخاب روش دارای انتخاب‌های زیادی می‌باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای تاریخ ۵۰ ساله می‌باشند. [3] اما کاربرد آن‌ها در مسائل عملی به ۱۵ سال گذشته بر می‌گردد و این زمینه هم اکنون به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد. بنابراین تفاوت زیادی بین این علم با علوم مثل کنترل، بهینه‌سازی، ریاضیات پایه که مشترکاً سال‌های زیادی است که به صورت علمی و عملی دارای کاربرد می‌باشند، وجود دارد. نگاه ما به جعبه ابزار شبکه‌های عصبی به صورت مجموعه‌ای از رویه‌های ابتدایی نمی‌باشد. بلکه ما به‌عنوان مجموعه‌ای از ابزار مفید در صنعت، آموزش و تحقیق و پژوهش به آن نگاه می‌کنیم. از آنجا که این زمینه و ابزار آن نو و جدید می‌باشد، در این پژوهش ما رویه‌ها را

به طور کامل شرح داده و نحوه استفاده از آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم و به اثبات نقاط قوت و ضعف آن‌ها با استفاده از مثال‌های کاربردی می‌پردازیم. فهم دقیق این نمونه مثال‌ها برای یادگیری نحوه استفاده از ابزار موجود الزامی می‌باشد البته این مسئله صبر و تحمل و پشتکار خواننده را طلب می‌کند.

### ۳-۲-۲- الهام از طبیعت

شبکه‌های عصبی مصنوعی که در این پژوهش به شرح آن خواهیم پرداخت رابطه دوردوری با نقطه مقابل طبیعی خود دارد. در این قسمت مختصراً برخی از خصوصیات توابع مغزی که از آن‌ها در راستای توسعه شبکه‌های عصبی مصنوعی الهام گرفته شده را برخواهیم شمرد. مغز انسان شامل بیش از ۱۰۱۱ نورون عصبی می‌باشد که از طریق حدود ۱۰۴ اتصال به ازای هر نورون به هم متصل شده‌اند. به طور کلی و متناسب با کاربرد مورد نظر ما می‌توان سه قسمت اصلی برای نورون‌ها در نظر گرفت: دندريت، بدنه سلول و آکسون. دندريت‌ها دریافت‌کننده‌های بدنه سلول این سیگنال‌ها را جمع کرده و یک حد آستانه بر روی آن‌ها اعمال می‌کند. در نهایت آکسون یک فیبر عصبی بلند است که این سیگنال‌ها را از بدنه سلول به نورون‌های دیگر منتقل می‌کند. به نقطه اتصال بین آکسون یک سلول عصبی با دندريت سلول‌های عصبی دیگر سیناپس گفته می‌شود. نحوه چینش نورون‌ها و قدرت سیناپس‌ها - که در واقع بناکننده تابع شبکه‌های عصبی می‌باشند - باتوجه به فرآیندهای پیچیده شیمیایی معین می‌گردد. شکل ۳-۲ یک طرح ساده از دو نورون عصبی را نشان می‌دهد: [1-3]



شکل (۲-۳) نورون عصبی زیستی [۲]

برخی از ساختارهای عصبی در هنگام تولد تعریف می‌شوند و برخی دیگر در طول زندگی و از طریق فرآیند یادگیری توسعه می‌یابند. در واقع یادگیری عبارتست از ایجاد اتصالات جدید و یا قطع کردن برخی اتصالات عصبی قدیمی. توسعه این روند در مراحل اولیه زندگی بسیار قابل توجه است. روند تغییر ساختارهای عصبی در طول زندگی ادامه می‌یابد. تغییرات بعدی که در طول زندگی در ساختارهای عصبی ایجاد می‌شوند عمدتاً متأثر از قدرت و ضعف اتصالات سیناپسی هستند. به عنوان مثال ثابت شده است که حافظه انسان با توجه به قدرت سیناپتیک شکل می‌گیرد. بنابراین فرآیند یادگیری چهره یک دوست جدید با تغییر در قدرت چندین سیناپس ممکن می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی فعلی هرگز به پیچیدگی مغز انسان نیستند. اما به هر حال دو شباهت اساسی بین شبکه‌های عصبی زنده و مصنوعی وجود دارد. شباهت اول در این است که ساختار هر دو، از یک ابزار محاسباتی ساده (البته شبکه‌های عصبی مصنوعی خیلی ساده‌تر از گونه زنده آن می‌باشند) با به هم پیوستگی بسیار بالا تشکیل شده‌اند. شباهت دوم این است که در هر دو مورد اتصالات بین نورونها تعیین‌کننده تابع شبکه می‌باشند. هدف اصلی در این پژوهش تعیین نحوه برقراری اتصالات

مناسب در جهت حل مسائل خاص می باشد.

حتی با اینکه نورون های زنده در مقایسه با مدارات الکتریکی بسیار کند می باشند (۱۰۶ مرتبه کندتر هستند) اما مغز در انجام امور مختلف بسیار سریعتر از کامپیوترهای فعلی می باشد. علت این امر را می توان در ساختار موازی شبکه های عصبی زنده جستجو کرد. در واقع همه نورون ها در یک زمان و به صورت موازی عمل می کنند. شبکه های عصبی مصنوعی نیز می توانند این ساختار موازی را فراهم کنند. اگرچه بیشتر شبکه های عصبی مصنوعی در حال حاضر در قالب کامپیوترهای دیجیتال معمول پیاده سازی شده اند اما ساختار موازی، از آن ها یک ساختار ایده آل برای پیاده سازی در قالب VLSI، ابزارهای نوری و پردازشگرهای موازی فراهم آورده است.

### ۳-۲-۳- کاربردهای شبکه های عصبی

بد نیست در اینجا به معرفی برخی از کاربردهای شبکه های عصبی در علوم مختلف پردازیم تا به این ترتیب با اهمیت این ساختار مصنوعی الهام گرفته از طبیعت، در علوم مختلف بیشتر آشنا شود. لیست برخی از کاربردها در شاخه های علوم مختلف در ادامه آمده است:

#### هوا و فضا

- خلبان خودکار هواپیما با کارایی بالا
- شبیه سازی مسیر پرواز
- سیستم های کنترلی هواپیما
- بالا بردن کارایی خلبان خودکار

- شبیه سازی اجزای هواپیما

- تشخیص خطا در اجزای هواپیما

### حمل و نقل

- سیستم راهنمای اتوماتیک اتومبیل

- تحلیل گارانتی

- سیستم های ترمز کامیون ها

- زمان بندی وسایل نقلیه

- سیستم های مسیریابی

### بانکداری

- ابزار خودکار خواندن چک و سایر اسناد

- کاربردهای ارزیابی کارت های اعتباری

### امور دفاعی

- راهبری سلاح ها

- تعقیب اهداف متحرک

- تشخیص اشیا

- تشخیص صورت

- انواع جدید حس گر ها

- رادار

- پردازش سیگنال های تصویری و رادار با فشرده سازی داده ها

- استخراج ویژگی ها و حذف نویزها

- تشخیص تصاویر و سیگنال ها

### الکترونیک

- پیش بینی ترتیب کد

- طراحی مدارات مجتمع

- کنترل فرایند

- تحلیل نقص مدارات مجتمع

- بینایی ماشین

- تولید صدا

- مدل سازی غیرخطی

### سرگرمی

- انیمیشن

- جلوه های ویژه تصویری

- پیش بینی بازار

### امور مالی

- ارزیابی ملک

- مشاور وام

- آزمایش رهن

- درجه بندی شرکت ها

- تحلیل کاربرد خطوط اعتباری

- برنامه های تجارت سهام

- تحلیل مالی شرکت ها

- پیش بینی قیمت ها

### بیمه

- ارزیابی سیاست های کاربردی

- بهینه سازی تولید

### ساخت و تولید

- کنترل فرایند ساخت



- تحلیل و طراحی تولید
- تشخیص فرایند و ماشین
- تشخیص اجزا بلادرنگ
- سیستم های بصری بازرسی کیفیت
- تحلیل کیفیت جوشکاری
- مدیریت و طرح ریزی
- پیش بینی کیفیت کاغذ
- تحلیل کیفیت چیپ های کامپیوتری
- تحلیل و طراحی تولیدات شیمیایی
- تحلیل استقرار ماشین
- پیشنهاد پروژه
- مدل سازی پویا از فرایندهای شیمیایی

### پزشکی

- تحلیل سلول های سرطانی پستان
- تحلیل EEG و ECG
- طراحی پروتز
- بهینه سازی زمان جراحی
- کاهش هزینه بیمارستان ها
- بهبود کیفیت بیمارستان ها

## نفت و گاز

- اکتشاف

## رباتیک

- کنترل خط سیر

- ربات بالابر

- سیستم های بینایی

## گفتار

- تشخیص گفتار

- فشرده سازی گفتار

- طبقه بندی اصوات

- ایجاد گفتار از روی متن

## ۳-۳- نحوه کار و مدل سازی شبکه عصبی

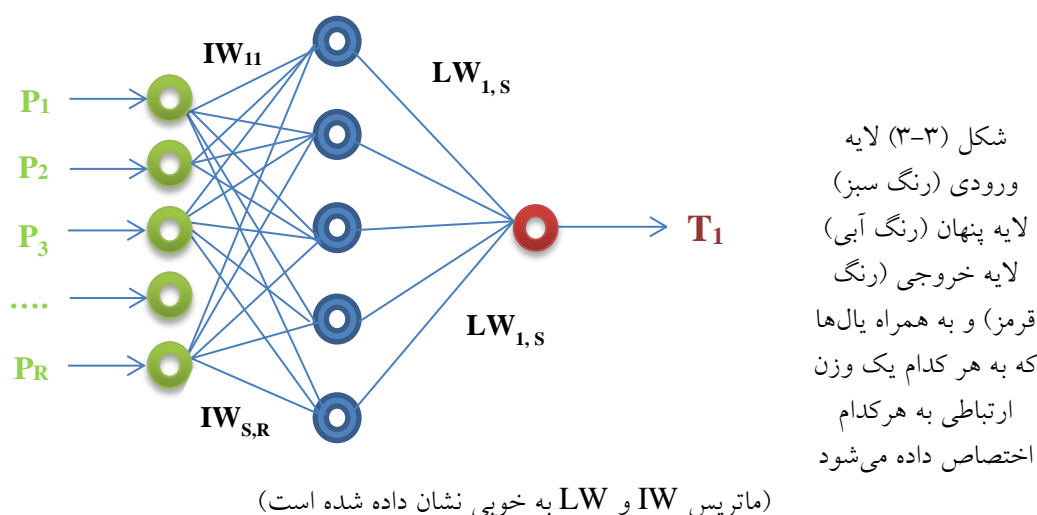
روابط ارائه شده در این بخش مربوط به شبکه عصبی پر سپترون چندلایه باز پرسخور<sup>۱</sup> است. عموماً شبکه عصبی از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان تشکیل شده است. برای پیاده سازی شبکه عصبی نیاز به یک سری داده های آزمایشگاهی، یا داده های معتبر از یک بانک اطلاعاتی است. عموماً این داده ها به شکل جدول زیر هستند.

<sup>1</sup> Multi layer Feed Forward Back Propagation

جدول (۱-۳) جدول داده ها مورد استفاده برای مدل سازی به کمک شبکه عصبی

شماره داده	داده ورودی			داده خروجی
۱	p1	p2	.....	$p_R$
۲	q1	q2	.....	$q_R$
.....	.....	.....	.....	.....
Ne	U1	U2	.....	$U_R$
$T_{Ne}$				

مطابق جدول بالا R تعداد نوع داده ورودی و Ne تعداد کل نمونه های آزمایشگاهی است در ایجاد شبکه عصبی همیشه تعداد نرون ها در لایه ورودی برابر با R در نظر گرفته می شود. بنابراین در لایه ورودی R نرون مطابق شکل زیر خواهیم داشت. تعداد نرون ها در لایه پنهان بطور دلخواه توسط کاربر انتخاب میشود (به تعداد S).



اتصال بین گره های لایه ورودی و لایه پنهان توسط یال های مطابق شکل بالا (شکل ۳-۳) نشان داده شده است. هر کدام از این یال ها وزن مشخصی دارند. همانطور که در شکل واضح است تعداد یال های بین لایه ورودی و لایه پنهان برابر است با  $(S \times R)$  بنابراین به تعداد  $S \times R$  وزن خواهیم داشت که آن ها را به ترتیب در ماتریس وزن IW قرار می دهیم (مطابق ماتریس (۱-۳) که در ادامه آمده است)

$$IW_{S \times R} = \begin{bmatrix} IW_{11} & IW_{12} & \dots & IW_{1R} \\ IW_{21} & IW_{22} & \dots & IW_{2R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ IW_{S1} & IW_{S2} & \dots & IW_{SR} \end{bmatrix}_{S \times R} \quad (1-3)$$

ماتریس (۱-۳) به ماتریس وزن لایه ورودی معروف است. ماتریس  $\cdot$  ماتریس وزن

لایه پنهان است. درایه های هر دو ماتریس همگی مجهول هستند و در طی فرآیند آموزش

شبکه، به دست می آیند.

$$LW_{1 \times S} = [IW_{11} \quad IW_{12} \quad \dots \quad IW_{1,S}]_{1 \times S}$$

در ادامه ماتریس بایاس لایه ورودی ( $b_1$ ) و ماتریس بایاس لایه پنهان ( $b_2$ ) آورده شده

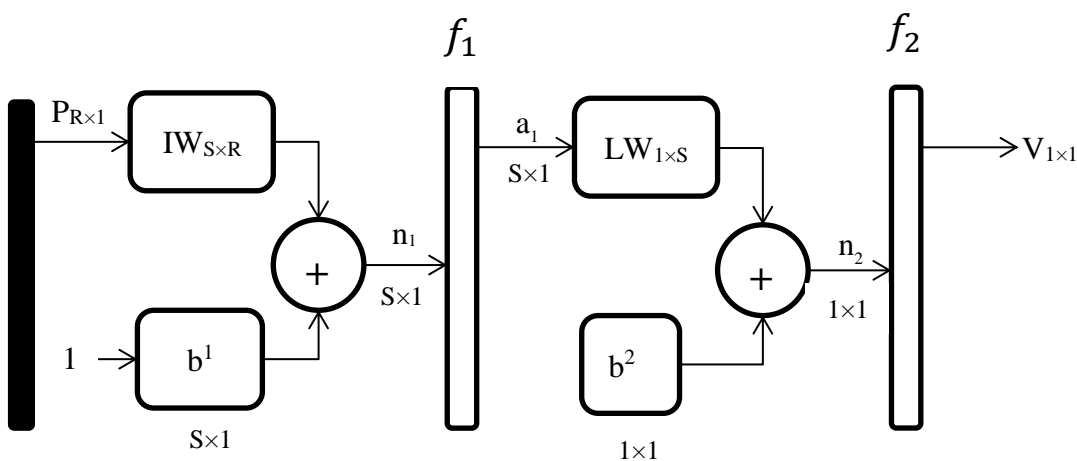
است.

$$b^1 = \begin{bmatrix} b_1^1 \\ b_2^1 \\ \dots \\ b_s^1 \end{bmatrix}_{S \times 1} \quad (2-3)$$

$$b^2 = [b_1^2]_{1 \times 1} \quad (3-3)$$

در شکل (۴-۳) ارتباط بین لایه های ورودی و خروجی به کمک ماتریس وزن  $IW$  و

$LW$  و همچنین ماتریس بایاس  $b^1$  و  $b^2$  نشان داده شده است.



شکل (۴-۳) ارتباط بین داده ورودی و داده خروجی به کمک ماتریس وزن و بایاس بین لایه ها

همچنین توابع انتقال بین لایه ها ( $f_1$  و  $f_2$ ) در شکل (۳-۴) نشان داده شده اند.  $V$  متغیر خروجی شبکه عصبی می باشد. در این شکل نحوه کار شبکه عصبی با معادلات زیر به سادگی نشان داده شده است. ماتریس ( $3 \times 4$ ) ماتریس داده های ورودی به شبکه عصبی را نشان می دهد همانطور که مشاهده می کنید  $P_R$  یک ماتریس ستونی ( $1 \times R$ ) می باشد. که  $R$  مطابق جدول (۳-۱) تعداد نوع داده های ورودی به شبکه عصبی است.  $P_1$  و  $P_2$  تا  $P_R$  داده های ورودی به شبکه عصبی هستند. (مطابق جدول (۳-۱) و شکل (۳-۳)).

$$P_R = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_R \end{bmatrix}_{R \times 1} \quad (4-3)$$

بعد از تعاریف ماتریس های مختلف به بیان ارتباط ریاضی بین آن ها می پردازیم و در واقع نحوه محاسبه خروجی شبکه را به کمک ورودی ها نشان می دهیم در جدول (۳-۲) خلاصه ای از ماتریس ها و علائم مورد استفاده آورده شده است.

$$n_1 = IW \times P_R + b^1 \quad (5-3)$$

$$a_1 = f_1(n_1) \quad (6-3)$$

$$n_2 = LW \times a_1 + b^2 \quad (7-3)$$

$$V_{1 \times 1} = f_2(n_2) \quad (8-3)$$

جدول (۳-۲) علائم مورد استفاده در بیان مبانی شبکه عصبی مصنوعی

نمایش	توضیح	نمایش	توضیح
$LW_{1 \times S}$	ماتریس وزن لایه پنهان	$IW_{S \times R}$	ماتریس وزن لایه ورودی
$b^2$	ماتریس بایاس لایه پنهان	$b^1$	ماتریس بایاس لایه ورودی
$S$	تعداد نرون در لایه خروجی	$R$	تعداد نوع داده ورودی (معلوم)
$T_1$ $T_2$ $T_{Ne}$	داده ی خروجی آزمایشگاهی (معلوم)	$p_1, p_2, \dots, p_R$ $q_1, q_2, \dots, q_R$ $U_1, U_2, \dots, U_R$	داده های ورودی آزمایشگاهی (معلوم)
$V$	داده خروجی شبکه عصبی	$Ne$	تعداد نمونه های آزمایشگاهی
$f_2$	تابع انتقال لایه دوم (معلوم)	$f_1$	تابع انتقال لایه اول (معلوم)

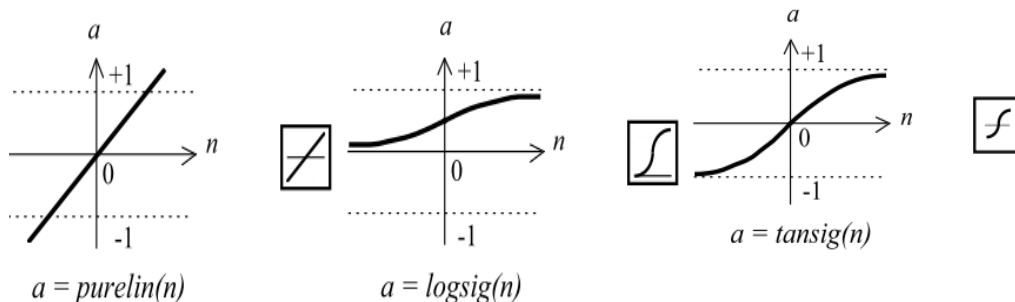
### ۳-۳-۱- توابع انتقال

تابع انتقال یک تابع خطی و یا غیرخطی می باشد. که آن را تابع تبدیل و فعالسازی نیز می نامند. تابع انتقال همانند تمام توابع ریاضی یک ورودی ( $x$ ) می گیرد و یک خروجی تحویل می دهد انواع مختلفی از توابع انتقال وجود دارند، از قبیل تابع فعالسازی آستانه ای، خطی چند تکه ای، گوسین و تابع تانژانت هایپربولیک، سیگموئید، خطی ولی از توابع فعالسازی تانژانت هایپربولیک، سیگموئید و خطی بیشتر استفاده می شود. این توابع از روابط زیر محاسبه می شوند. و شماتیک آن ها در شکل (۳-۵) آورده شده است.

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad \text{تانژانت هایپربولیک:} \quad (۳-۹)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad \text{سیگموئید:} \quad (۳-۱۰)$$

$$f(x) = x \quad \text{خطی:} \quad (۳-۱۱)$$



خطی

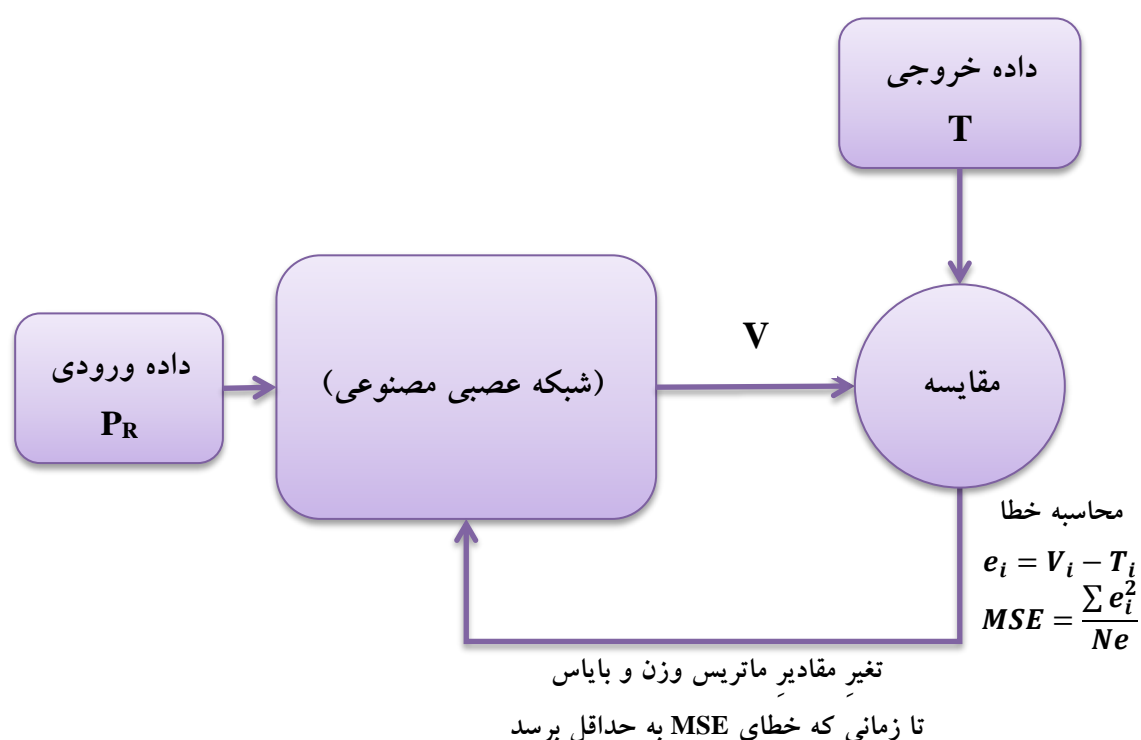
سیگموئید

تانژانت هایپربولیک

شکل (۳-۵) توابع انتقال پر کاربرد در شبکه عصبی (توابع انتقال  $f1$  به  $f2$  بین لایه اول و دوم)

### ۳-۳-۲- نحوه آموزش شبکه عصبی

همانطور که در جدول (۳-۲) مشاهده می کنید تمامی پارامترها مشخص می باشند بجز مقادیر ماتریس وزن و بایاس که جز مجهولات هستند. برای به دست آوردن این مجهولات لازم است شبکه عصبی به کمک داده های آزمایشگاهی (داده های یک بانک اطلاعاتی) آموزش دیده شود. در حین آموزش مقادیر وزن و بایاس آنقدر تغییر می کند تا خروجی  $V$  و خروجی آزمایشگاهی ( $T$ ) بر هم منطبق شوند.



شکل (۳-۶) نحوه کارکرد شبکه عصبی در یک نگاه به صورت خلاصه

لازم بذکر است خروجی  $V$  همان خروجی شبکه عصبی می باشد. به عبارت دیگر مقادیر وزن و بایاس آنقدر تغییر می کند تا اختلاف پیش بینی شبکه و مقدار واقعی آزمایشگاهی بسمت صفر پیش رود ( $Error = V_i - T_i$ ) تابع خطا برای کل داده ها به صورت زیر (معادله (۳-۱۲))

تعریف می شود. به MSE میانگین مربعات خطا گفته می شود. در رابطه ی زیر  $T_i$  و  $V_i$  و Ne به ترتیب داده ی خروجی شبکه، داده خروجی واقعی، تعداد کل داده ها است.

$$MSE = \sum_{i=1}^{Ne} \frac{(V_i - T_i)^2}{Ne} \rightarrow 0 \quad (۱۲-۳)$$

### ۳-۳-۳- الگوریتم آموزش شبکه عصبی

آموزش فرایندی است که در آن پارامترهای آزاد شبکه (وزن ها و بایاس ها) به شاخص های بهینه ی خود نزدیک می شوند. عموماً از الگوریتم لونیبرگ مارگوت برای آموزش شبکه عصبی استفاده می شود. در این الگوریتم ها شبکه قادر است با استفاده از ورودی ها و خطاها (تفاوت میان خروجی و پاسخ مطلوب) آموزش ببیند. بدین ترتیب اجزای آموزش عبارتند از ورودی، پاسخ مطلوب، خطا الگوریتم لونیبرگ مارگوت با تغییر وزن ها در تکرارهای مختلف میزان خطا را کاهش می دهد. منظور از خطا، اختلاف بین خروجی شبکه و خروجی واقعی (آزمایشگاهی) است.

ضعف الگوریتم پسخور آن است که ممکن است گرفتار حداقل محلی شود. یعنی الگوریتم فکر می کند که به بهترین مجموعه ممکن از وزن ها رسیده است در حالی که احتمالات بهتری نیز وجود دارد. همچنین این الگوریتم کند است و گاهی وزن های اضافی تولید می کند. در نهایت نرخ آموزش را در این الگوریتم باید به صورت اکتشافی تعیین نمود. به همین دلیل ممکن است نیاز باشد تا با الگوریتم های دیگر مانند الگوریتم ژنتیک ازدحام پرندگان هیبرید شوند تا گرفتار بهینه محلی نگردد. موضوع دیگر، انتخاب وزن های آغازین است. اگر در مورد مسئله، اطلاعات و تجربه ی قبلی نداریم باید وزن های آغازین را به صورت



تصادفی انتخاب کنیم. به طور کلی، آموزش فرایندی است که به وسیله آن شبکه‌ی عصبی خود را با یک محرک سازگار می‌کند، به نحوی که بعد از تعدیل مناسب پارامترهای شبکه، پاسخ مطلوب را ارائه دهد.

هنگامی که خروجی واقعی همان خروجی مطلوب گردد، آموزش شبکه خاتمه می‌یابد و به اصطلاح، شبکه دانش را فرا گرفته است. شیوه‌ی آموزش به نحوه‌ی اتصالات نرون‌های مصنوعی برای نمونه‌های مختلفی که تاکنون ارائه شده است بستگی دارد.

### ۳-۴- الگوریتم ژنتیک و تاریخچه آن

در پنجاه سال اخیر به طور گسترده از کامپیوتر در علوم مختلف استفاده می‌شود. در اواسط قرن بیستم برخی از دانشمندان علوم کامپیوتر کار بر روی سیستم‌های تکاملی را به امید آنکه بتوان از آن به عنوان مکانیسمی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده نمود، آغاز نمودند. در دهه هفتاد میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام جان هالند ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی‌های مهندسی مطرح کرد، به علاوه دانشجویان و همکارانش با همکاری هم این الگوریتم را توسعه دادند [۷ و ۹].

از الگوریتم ژنتیک بواسطه قدرت و کفایت و سادگی آن، در رشته‌های مختلف علمی استفاده شده است. برای مثال از آن برای حل مسائلی که تابع هدف پیچیده و تعداد متغیر مستقل زیاد دارند به وفور استفاده می‌شود. به طور کلی، در بیست سال اخیر، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک تکنیک بهینه برای توابع پیچیده مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. [۷ و ۹].

الگوریتم ژنتیک سرآمد روش های تکاملی است و الگوریتم های جستجو الهام گرفته از تکامل بیولوژیکی میباشد [۳ و ۴]. الگوریتم ژنتیک در مسایلی که ما با فضای بزرگی برای یافتن بهترین جواب رو به رو هستیم بهترین کارایی را دارند. البته این نکته قابل ذکر است که الگوریتم ژنتیک برای هر مسئله قابل پیاده سازی است. و بر خلاف دیگر روش های بهینه سازی که اغلب نیازمند داشتن مشتق تابع هدف نیز هستند این روش هیچ گونه نیازی به اطلاعات اضافه ندارد و پیاده سازی آن بسیار ساده است. در ادامه به مفاهیم آن و روش کار این الگوریتم پرداخته می شود.

### ۳-۴-۱- تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن

الگوریتم ژنتیک بر اساس نظریه تکاملی داروین بنا نهاده شده است و جواب مساله ای که از طریق الگوریتم ژنتیک به دست می آید گام به گام بهبود می یابد. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه از جواب ها که جمعیت نامیده میشود کار خود را شروع می کند. در واقع این مجموعه جواب ها جمعیت<sup>۱</sup> نام دارد. به عبارت دیگر جمعیت از تعداد مشخصی از نفرات تشکیل شده است. که هر نفر نماینده یک جواب مسئله است. ما بدنبال یافتن بهترین نفر (بهترین جواب) در طی فرآیند بهینه سازی هستیم.

در این الگوریتم جواب های مربوط به یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می شوند. الگوریتم روند کاوش و جستجوی خود را به امید یافتن جواب های بهتر نسل به نسل ادامه می دهد تا زمانی که به یکی از شرایط توقف خود برسد. در این فرآیند امید است که

<sup>1</sup> Population

جمعیت جدید (فرزندان)<sup>۱</sup> نسبت به جمعیت قبلی (والدین)<sup>۲</sup> بهتر باشند. در هر نسل جواب های جدیدی ساخته می شود که می بایست بهینه بودن آنها مورد بررسی قرار گیرد. میزان بهینه بودن یک جواب به کمک تابع هدف سنجیده می شود. به عبارت دیگر جوابهای جدید (فرزندان) به کمک والدین شایسته از نسل قبل ساخته می شوند. والدینی که بر اساس تابع هدف از شایستگی مناسبی برخوردار نیستند رفته رفته حذف می شوند و در فرآیند تولید فرزند مورد استفاده قرار نمی گیرند. مطابق با آنچه گفته شد طبیعی است که جوابهای مناسب تر شانس بیشتری برای تولید فرزند دارند. این فرآیند تا برقراری شرایط توقفی که از قبل تعیین می شود (مانند تعداد جمعیت ها یا میزان بهبود جواب) ادامه پیدا خواهد کرد. در ادامه جدولی جهت تعریف مفاهیم پایه الگوریتم ژنتیک آورده شده است.

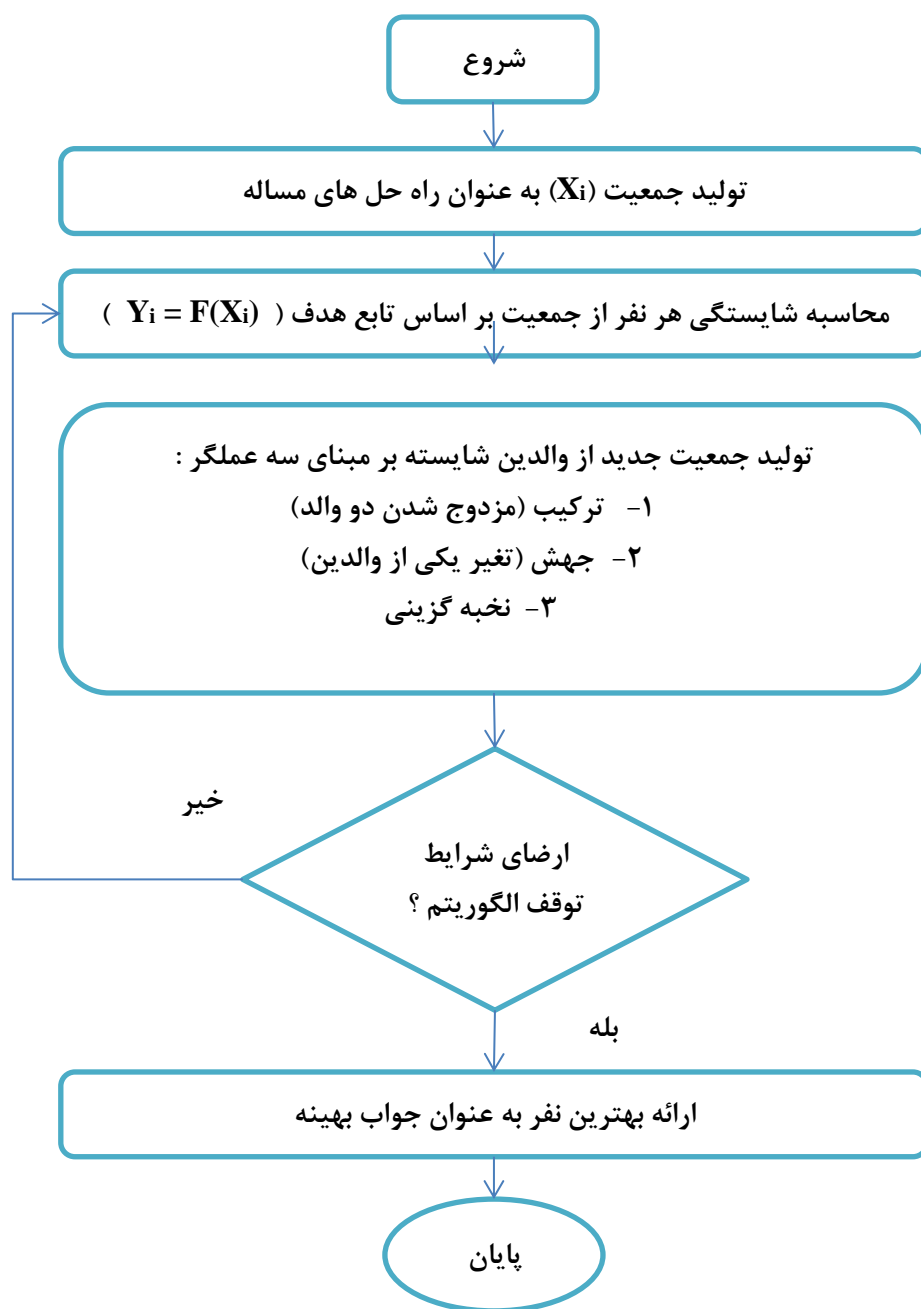
### ۳-۴-۲- روند اجرا در الگوریتم ژنتیک

در شکل زیر نمای کلی الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، اصول پایه ای الگوریتم ژنتیک بسیار عمومی است و می توان از آن برای انواع مسایل بهینه سازی مهندسی استفاده کرد و تنها تفاوت، به کار گرفتن توابع هدف مختلف بنا بر نیاز مساله ای است.

---

<sup>1</sup> Offspring

<sup>2</sup> parents



شکل (۷-۳) فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل مختلف بهینه سازی

مطابق شکل (۷-۳) سه عملگر مهم برای تولید جواب های جدید از جواب های نسل

قبل وجود دارد این سه عملگر بسیار مهم و پایه ای الگوریتم ژنتیک عملگرهای ترکیب<sup>۱</sup> و

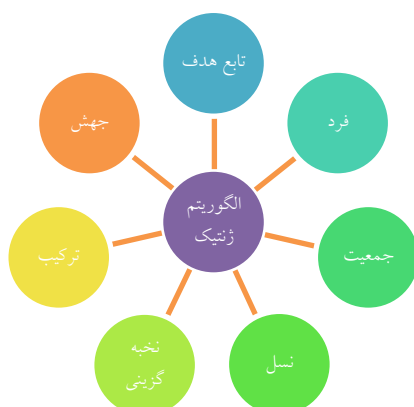
<sup>1</sup> Cross over

جهش<sup>۱</sup> و نخبه گزینی<sup>۲</sup> هستند. سوال بعدی این است که برای ترکیب والدین به منظور ایجاد فرزندان جدید والدین چگونه انتخاب شوند؟ این کار به روشهای مختلفی میتواند صورت گیرد. اما ایده اصلی در تمام آنها این است که والدین بهتر (والدین شایسته) انتخاب شوند به این امید که والدین بهتر باعث ایجاد فرزندان بهتر شوند. برای عملگر دوم یعنی جهش نیز از والدین شایسته برای تولید فرزندان استفاده می شود مساله ای که در این جا مورد سوال می باشد این است که اگر جمعیت جدید تنها از طریق فرزندان جدید ایجاد شود، این فرآیند منجر به حذف والدین نسل قبل می گردد. برای جلوگیری از این پدیده، همیشه بهترین جواب نسل قبل بدون هیچ تغییری به نسل جدید منتقل می شود (عملگر نخبه گزینی).

### ۳-۴-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک

در شکل (۳-۸) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک به اختصار آمده است. که در

بخشهای بعدی به تفسیر هر کدام از آنها توضیح داده می شود.



شکل (۳-۸) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک

<sup>1</sup> Mutation

<sup>2</sup> Elite

### ۳-۴-۱- تابع هدف (تابع شایستگی)

یکی از مراحل الگوریتم ژنتیک ارزیابی جواب های به دست آمده در هر مرحله است. در واقع ارزش جواب های به دست آمده در هر مرحله تعیین می شود. مناسب بودن یا نبودن جواب با معیاری که از تابع هدف به دست میاید، سنجیده میشود. هرچه که یک جواب مناسبتر باشد مقدار شایستگی بیشتری دارد که با استفاده از محدوده دانش مسئله به کار برده می شود. برای آن که شانس بقای چنین جوابی بیشتر شود احتمال بقای آن متناسب با مقدار برازندگی آن در نظر گرفته می شود. بنابراین رشته ای که برازنده تر است با احتمال بیشتری در تولید فرزندان شرکت می کند و دنباله های بیشتری را به وجود می آورد. با ارزش ترین جواب ها در هر مرحله مانند قویترین موجودات در یک جمعیت می باشند. در تکثیر، رشته های با میزان تطبیق کم، از جمعیت حذف می شوند و رشته های با میزان تطبیق زیاد، تأثیر بیشتری در تولید جمعیت بعدی خواهند داشت.

### ۳-۴-۲- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک

یک فرد عبارت است یک راه حل مسئله. مقدار شایستگی به ازای هر فرد، امتیاز آن فرد تلقی می شود. به عنوان مثال تابع هدف به صورت معادله زیر را در نظر بگیرید که  $x_1$  و  $x_2$  دو متغیر مستقل مسئله باشند. در این مثال هدف از بهینه سازی مینیمم کردن این تابع هدف است.

$$F(x_1, x_2) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 \quad (۳-۱۳)$$

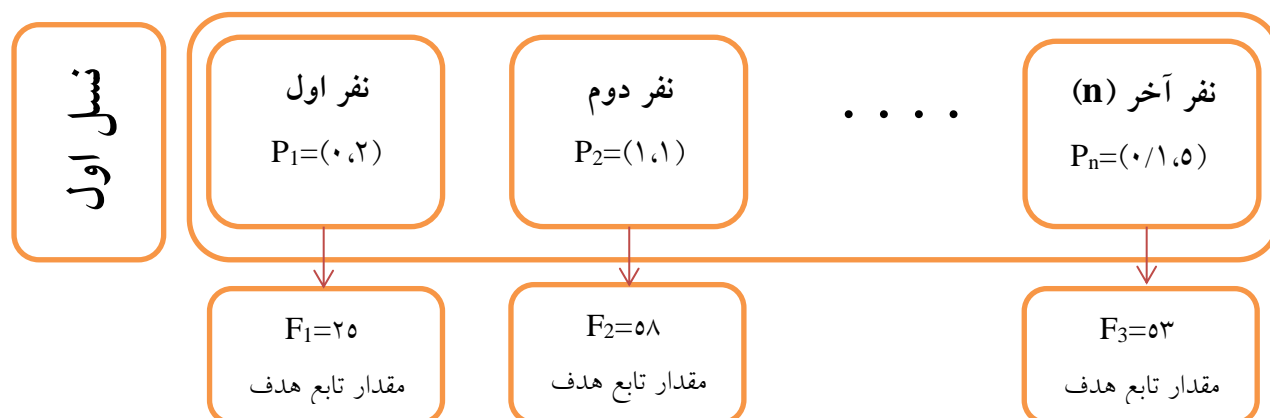
بردار  $(x_1, x_2) = (0, 2)$  یک فرد تلقی می شود. مقدار شایستگی یک فرد نیز به کمک تابع

هدف محاسبه می گردد،  $F(0, 2) = 25$  بردار  $(1, 1)$  نیز یک راه حل ممکن می تواند باشد (نفر

دوم) که در واقع مقدار تابع هدف آن برابر است با  $F(1,1)=58$ . نفر اول از نفر دوم شایسته تر است زیرا  $(25 < 58)$  در واقع نفر اول مقدار تابع هدف کوچکتری دارد و از آنجا که هدف مینیم کردن است بنابراین هرچه قدر مقدار تابع هدف کوچکتر باشد امتیاز آن فرد بالاتر است. از آنجا که جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک مینیمم تابع شایستگی را تعیین می کند، بهترین مقدار شایستگی برای کوچکترین مقدار تابع هدف از کل جمعیت می باشد.

### ۳-۴-۳- جمعیت و نسل ها

جمعیت یک آرایه از افراد است. یک فرد ممکن است چندین بار در یک جمعیت تکرار شود. در هر تکرار، الگوریتم ژنتیک یک سری محاسبات روی جمعیت حاضر انجام داده و جمعیت جدید را تولید می کند. این جمعیت جدید تحت عنوان یک نسل جدید شناخته می شود.



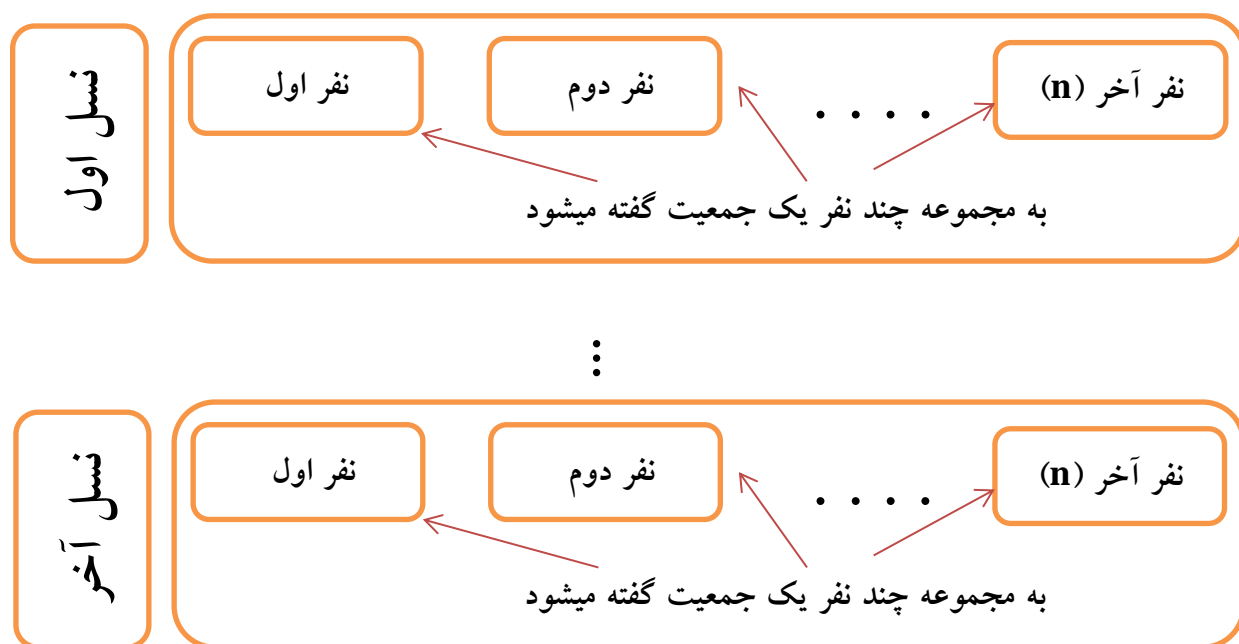
به مجموعه چند نفر یک جمعیت گفته میشود

در بین این سه نفر، نفر اول بیشترین امتیاز، نفر دوم کمترین امتیاز را دارد زیرا:  $(25 < 53 < 58)$

شکل (۳-۹) در شکل بالا مفهوم نفر و جمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است

### ۳-۴-۳-۴- والدین و فرزندان

برای تولید نسل بعدی، الگوریتم ژنتیک تعداد خاصی از افراد جمعیت حاضر را که از آن‌ها تحت عنوان والدین یاد می‌شود، انتخاب می‌کند. والدین برای تولید افراد نسل بعدی که از آن تحت عنوان فرزندان یاد می‌شود، استفاده می‌گردند. الگوریتم ژنتیک تمایل به انتخاب افرادی تحت عنوان والدین دارد که مقدار شایستگی بهتری (بر مبنای تابع هدف) نسبت به سایرین داشته باشند. از این میان نیز، تعداد افراد با بهترین مقدار شایستگی در جمعیت حاضر، که بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند فرزندان نخبه نامیده می‌شوند. در شکل زیر شماتیک نسل، جمعیت، نفر، والدین و فرزندان آورده شده است.



تذکر: افراد نسل جدید فرزندان نسل قبلی محسوب میشوند

شکل (۳-۱۰) تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان



### ۳-۴-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک دارای روند تکراری بوده که جستجو را با جمعیتی از راه حل های اولیه تصادفی آغاز می کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، عملگرهای ژنتیک در تولید نسل بعدی به کار گرفته می شوند تا جمعیت به روز شود. این الگوریتم از سه عملگر نخبه گزینی<sup>۱</sup>، ترکیب<sup>۲</sup> و جهش<sup>۳</sup> برای تولید افراد نسل بعدی استفاده می نماید. والدینی که مقدار تابع هدف بهتری دارند شانس انتخاب شدن بیشتری برای تولید نسل بعدی دارند. برای تضمین اینکه همواره بهترین اعضا در نسل بعدی حضور خواهند داشت معمولاً ۲ تا ۵ درصد جمعیت که دارای بهترین مقادیر شایستگی هستند با عنوان فرزندان نخبه، بدون تغییر به نسل بعد منتقل می شوند. عملیات ترکیب الگوریتم را قادر می سازد تا بهترین ژن ها را از افراد مختلف استخراج کرده و آن ها را در قالب فرزندان ممتازتر دوباره ترکیب کنند. عملیات جهش منجر به افزایش گوناگونی در جمعیت می شود. گوناگونی سبب می گردد الگوریتم ناحیه ی بزرگتری را مورد جستجو قرار دهد و در نتیجه کارایی الگوریتم افزایش یابد. بدون جهش الگوریتم تنها قادر به تولید فرزندان است که ژن های آن ها زیر مجموعه ای از ژن های جمعیت آغازین هستند. این وابستگی بالا به جمعیت آغازین باعث کاهش کارایی الگوریتم در بهینه سازی خواهد شد. انجام عمل جهش همچنین، مانع از همگرا شدن الگوریتم و ورود آن به نواحی مینیم محلی مسئله می شود. در ادامه توضیحات مختصری در مورد عملگر ترکیب و جهش و نخبه گزینی

---

<sup>1</sup> Bettr elite

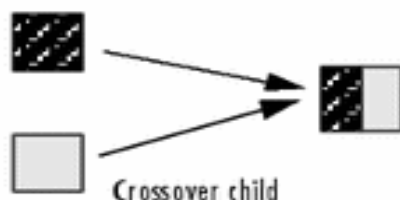
<sup>2</sup> Crossover

<sup>3</sup> Mutation

در ادامه توضیح داده می شود.

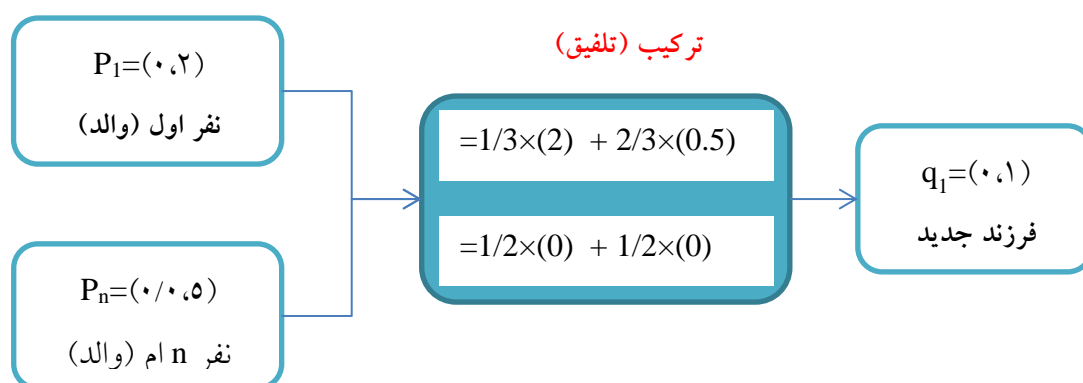
### ۳-۴-۱- عملگر ترکیب (تلفیق)

در واقع عملگر ترکیب یک روش برای اشتراک اطلاعات مابین نفرات می باشد. این عملگر خصیصه های والدین را برای ساختن فرزندان ترکیب می کند تا این که فرزندان بهتری ایجاد شوند. ممکن است فرزندان بهتری تولید شود و یا ممکن است و دو فرزند برای هر جفت تولید می شود. عملگر ترکیب می تواند روی چندین والد نیز عمل کند که در این صورت خصیصه های بیش از دو والد را برای تولید فرزندان ترکیب می کند. علاوه براین عملگر ترکیب می تواند بیش از دو فرزند را برای هر گروه از والدین تولید کند. وظیفه اصلی این عملگر بهبود شایستگی جمعیت می باشد. برای فهم بهتر مثالی آورده شد. نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که عملگر ترکیب ممکن است منجر به ایجاد فرزند بهتر نشود.



شکل (۳-۱۱) عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته

فرض کنید در مثال قبل بخواهیم به با استفاده از نفر اول ( $p_1$ ) و نفر دوم ( $p_2$ ) و به کمک عملگر ترکیب فرزندی تولید کنیم. یکی از ساده ترین روش ها این است. که میانگین وزن دار از دو نفر بگیریم.



شکل (۱۲-۳) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

مطابق شکل (۱۲-۳) به کمک دو والد در نسل قدیم یک فرزند در نسل جدید ایجاد شد.

این کار از طریق میانگین وزن دار صورت گرفت. روش های مختلفی برای ترکیب کردن

وجود دارد که نمونه ای از آن در بالا توضیح داده شد

### ۳-۴-۴-۲- جهش

بعد از اعمال عملگر ترکیب به منظور اجتناب از همگرایی به بهینه محلی و ایجاد تنوع و

گوناگونی در جمعیت با استفاده از عملگر جهش می توان تغییر کوچکی در تعدادی از والدین

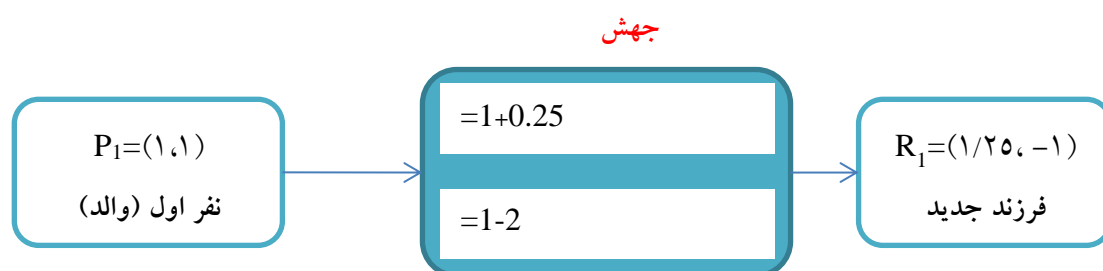
شایسته تا فرزندان جدیدی حاصل شود. با این عمل نفرات جدیدی در کل جمعیت به وجود

می آید. که ممکن است فرزندان شایسته تر از والدین با شد و یا بالعکس. در مثالی که در بخش

های آتی آ این عملگر نیز توضیح داده می شود.



شکل (۱۳-۳) عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته



شکل (۳-۱۴) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

همانطور که مشاهده میکنید اپراتور جهش مقداری مثبت یا منفی به والدین نسل قبلی

اضافه می کند. به عنوان مثال فرزند ایجاد شده به کمک جهش در مثال قبل  $R_1 = (1/25, -1)$

نسبت به والدین خود شایسته تر است و به جواب بهینه نزدیکتر است زیرا میزان تابع هدف

آن  $(F(1/25, -1) = 13/25)$  است که نسبت به دیگر نفرات قبلی و وضعیت مطلوب تری دارد

(مینیمم تر است). عملگر جهش نسل به نسل سبب تولید نفرات جدید می شود که ممکن

است وضعیت بهتری نسبت به والد خود داشته باشد.

به طور خلاصه، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می کند، که

طرح کلی آن به این صورت است:

۱- الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین که به صورت تصادفی تولید می شوند کار خود

را آغاز می کند.

۲- سپس در ادامه یک ترتیب از جمعیت جدید را ایجاد می نماید (نسل ها). در هر گام

الگوریتم با به کارگیری سه روش از افراد موجود در نسل حاضر برای تولید افراد نسل

بعدی استفاده می نماید برای تولید نسل جدید الگوریتم ژنتیک مراحل زیر را انجام

می دهد:

- به هر عضو از جمعیت حاضر یک امتیاز اختصاص می‌دهد این کار با محاسبه‌ی مقدار شایستگی هر یک از افراد حاضر در جمعیت انجام می‌شود.
  - امتیازهای شایستگی به دست آمده به کمک مقیاس بندی به محدوده‌ی قابل استفاده‌تری از مقادیر تبدیل می‌شوند.
  - والدین بر اساس میزان شایستگی‌های اختصاص یافته به افراد انتخاب می‌شوند. در واقع از افراد شایسته‌تر به عنوان والدین استفاده می‌شود.
  - فرزندان به کمک والدین تولید می‌گردند. فرزندان با ایجاد تغییر تصادفی روی یکی از والدین (جهش) و یا با ترکیب بردارهای مربوط به هر دوی والدین (تلفیق) تولید می‌شوند.
  - جمعیت حاضر با فرزندان جایگزین می‌شوند و نسل بعدی شکل می‌گیرد.
- ۳- الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از شرایط توقف محقق شود.

### ۳-۴-۵- توابع عملیاتی الگوریتم‌های ژنتیک

همانطور که گفته شد الگوریتم ژنتیک به رویه تکراری می‌باشد که شامل یک جمعیت با اندازه ثابت است. هر یک از افراد این جمعیت با توجه به یک رشته محدود سمبول‌ها ارائه می‌شوند که از آن‌ها تحت عنوان ژنوم یاد می‌شود. هر یک از ژنوم‌ها یک راه حل ممکن در فضای مسئله را کد می‌کنند. از فضای مسئله به فضای جستجو تعبیر می‌شود که این فضا تمام راه حل‌های ممکن مسئله را در بر می‌گیرد. عموماً از الگوریتم ژنتیک در مورد مسائلی استفاده می‌شود که فضای جستجوی آن‌ها بسیار بزرگ بوده و روش‌های جستجو معمول در مورد

آن‌ها کاربردی ندارد. یک الگوریتم ژنتیک استاندارد به صورت زیر عمل می‌کند:

ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی و یا اکتشافی فراهم آورده می‌شود. هر مرحله‌ی تکاملی یک نسل نامیده می‌شود، هر یک از افراد جمعیت حا ضر بر مبنای یک تابع هدف از پیش تعریف شده ارزیابی می‌شوند و نتیجه کار تحت عنوان میزان شایستگی فرد شناخته می‌شود.

برای شکل‌گیری یک جمعیت جدید (نسل بعدی) افراد بر مبنای میزان شایستگی شان انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلفی برای انجام این انتخاب وجود دارند که ساده‌ترین آن‌ها که توسط هالند مطرح شده انتخاب متناسب با شایستگی می‌باشد. در این روش افراد با احتمالی متناسب با میزان شایستگی شان انتخاب می‌شوند. به این ترتیب افراد شایسته‌تر چندین بار برای حضور در جمعیت جدید انتخاب شده و به این ترتیب شانس بیشتری برای تولیدمثل خواهند داشت. این در حالی است که افراد با شایستگی کمتر محو شده و شانسی برای انتخاب و تولیدمثل پیدا نمی‌کنند. بنابراین از نزدیک شدن به جواب محلی جلوگیری می‌شود. فرآیند انتخاب بر اساس ارزیابی صلاحیت مدل فردی است. صلاحیت یک مدل فردی مرتبط با هدف تابع می‌باشد و این تابع برای مثال می‌تواند در نتیجه مجموع مربع خطاها مرتبط با اندازه‌گیری تعریف شود. روال انتخاب به تنهایی نمی‌تواند هیچ فرد جدیدی را به جمعیت اضافه کند و به طبع هیچ نقطه‌ی جدیدی را در فضای جستجو پیدا نمی‌کند. بلکه این کار با استفاده از عملگرهای دیگر الهام گرفته از طبیعت از جمله تلفیق<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> انجام می‌شود. این

---

<sup>۱</sup> Crossover

<sup>۲</sup> Mutate

دو عملگر ژنتیکی در الگوریتم ژنتیک جهت تولید جمعیت جدید بکار می‌روند [۵]. تلفیق با توجه به یک احتمال تحت عنوان احتمال تلفیق و یا نرخ تلفیق بین دو فرد انتخاب شده انجام می‌شود. از این دو فرد تحت عنوان والدین یاد می‌شود. عملیات تلفیق از طریق مبادله‌ی اجزای ژنوم دو والد انجام می‌شود و به این ترتیب دو فرد جدید به وجود می‌آیند که از آن‌ها تحت عنوان فرزند یاد می‌شود. عملگر تلفیق باعث می‌شود تا عملیات جستجو به مناطق جدیدی در فضای جستجو گسترش یابد. عملگر جهش در راستای جلوگیری از همگرایی زودرس در مینیمم‌های محلی به کار گرفته می‌شود. این عملگر نقاط جدیدی را به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌کند. الگوریتم ژنتیک یک فرآیند تکراری مبتنی بر شانس است که همگرایی را تضمین نمی‌کند. شرط پایان این الگوریتم با توجه به تعداد نسل‌ها و یا میزان شایستگی مطلوب تعیین می‌گردد. در جدول (۳-۳) شبه کد مربوط به یک الگوریتم ژنتیک استاندارد آمده است:

جدول (۳-۳) شبه کد الگوریتم ژنتیک [۶]

مرحله	توضیحات
۱	تولید تصادفی نفرات به عنوان راه حل مسئله
۲	ارزیابی شایستگی هر نفر با استفاده از تابع هدف
۳	مراحل زیر تکرار شود
۴	انتخاب نفرات برتر برای عملیات ترکیب و جهش و انتقال مستقیم
۵	انجام عملیات ترکیب برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۶	عملیات جهش برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۷	انتقال مستقیم بهترین والدین به نسل جدید
۸	تکرار مراحل ۴ تا ۷ تا زمانیکه شرایط توقف حاصل شود

### ۳-۴-۶- مزایای الگوریتم ژنتیک

یکی از نقاط قوت الگوریتم های ژنتیک که در ابتدا یک کمبود به نظر می رسید این است که: GA ها هیچ چیزی در مورد مسائلی که حل می کنند نمی دانند و اصطلاحاً به آنها «ساعت ساز نابینا» می گوئیم. آنها تغییرات تصادفی را در راه حل های کاندید شان می دهند و سپس از تابع برازش برای سنجش این که آیا آن تغییرات پیشرفتی ایجاد کرده اند یا نه، استفاده می کنند. مزیت این تکنیک این است که به GA اجازه می دهد تا با ذهنی باز شروع به حل مسائل کند. از آنجایی که تصمیمات آن اساساً تصادفی است، بر اساس تئوری همه راه حل های ممکن به روی مسئله باز است، ولی مسائلی که محدود و به اطلاعات هستند باید از راه قیاس تصمیم بگیرند و در این صورت بسیاری از راه حل های نو و جدید را از دست می دهند.

یکی دیگر از مزایای الگوریتم این است که آنها می توانند چندین پارامتر را همزمان تغییر دهند. بسیاری از مسائل واقعی نمی توانند محدود به یک ویژگی شوند تا آن ویژگی ماکسیمم شود و باید چند جنبه در نظر گرفته شوند. GA ها در حل این گونه مسائل بسیار مفیدند، و در حقیقت قابلیت موازی کار کردن آنها این خاصیت را به آنها می بخشد. و ممکن است برای یک مسئله ۲ یا چند راه حل پیدا شود، که هر کدام با در نظر گرفتن یک پارامتر خاص به جواب رسیده اند.

به طور خلاصه مزایای الگوریتم ژنتیک را می توان در موارد زیر برشمرد:

- ۱- با متغیرهای پیوسته و هم گسسته می تواند عمل بهینه سازی را انجام دهد.
- ۲- نیازی به محاسبه مشتق توابع ندارد.
- ۳- بطور همزمان می تواند تمامی ناحیه جستجو شونده وسیع تابع هزینه را جستجو کند.



- ۴- قادر به بهینه سازی مسائل با تعداد متغیرهای زیاد می باشد.
- ۵- قابل اجرا از طریق کامپیوترهای موازی است.
- ۶- توابع هزینه ای که بسیار پیچیده باشند نیز از این طریق قابل بهینه سازی می باشند و الگوریتم در اکستریم محلی به دام نمی افتد.
- ۷- قادر است تا چند جواب بهینه را بطور همزمان به دست آورد نه فقط یک جواب.
- ۸- الگوریتم های ژنتیک بر روی مجموعه ای از راه حل ها اعمال می شوند و نه بر روی یک راه حل خاص.
- ۹- قادر است تا متغیرها را کد بندی نموده و بهینه سازی را با متغیرهای کد بندی شده انجام دهد. کد بندی سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش می دهد.
- ۱۰ الگوریتم توانایی کار کردن یا داده های عددی تولید شده و داده های تجربی را علاوه بر توابع تحلیلی دارد.
- ۱۱- فرآیند ارائه شده توسط الگوریتم های ژنتیک بر روی فضایی از مجموعه نمایندگان یا همان کروموزوم ها اعمال می گردد و نه بر روی خود فضای راه حل ها.
- ۱۲- الگوریتم های ژنتیک از قوانین انتقالی احتمالی بجای قوانین انتقالی قطعی استفاده می کنند، بدین معنا که حرکت آن در هر نقطه از الگوریتم کاملاً احتمالی بوده و بر اساس قطعیت صورت نمی پذیرد. این امر از مزایای مهم این روش بوده و از افتادن سیستم در کمینه محلی جلوگیری می نماید. البته میزان احتمال به گونه ای است که احتمال حرکت به سمت مسئله بیشتر از احتمال حرکت آن به سمت مخالف جواب می باشد.
- ۱۳- تنها ملاک ارزشیابی و سنجش میزان شایستگی هر راه حل توسط الگوریتم های

ژنتیک، مقدار تابع شایستگی آن در فضای کروموزوم ها می باشد و نه معیارهای مورد نظر در سطح فضای راه حل ها.

۱۴- برای حل برخی از مسائلی از رده NP-Hard نیز استفاده می شود.

۱۵- این الگوریتم بیشتر در مسائل بهینه سازی و موارد مشابه بکار می رود.

### ۳-۴-۷- محدودیتهای الگوریتم ژنتیک

۱- حجم محاسباتی بالا

۲- سرعت همگرایی پایین در استخراج جواب ( زمان اجرای طولانی)

## فصل ۴:

## مدلسازی

## ۴-۱- مقدمه

مهمترین هدف این پژوهش در وهله اول پیش‌بینی عملکرد پلنت‌های شیرین‌سازی اسمز معکوس<sup>۱</sup> با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی است. در این راستا درصد حذف نمک<sup>۲</sup> (RE) و دبی (فلاکس جرمی) آب تصفیه شده<sup>۳</sup> (PF) به کمک شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه<sup>۴</sup> (MLP) پیش‌بینی شدند. از شاخص‌های آماری متداول مانند میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (MSE) و ضریب رگرسیون<sup>۶</sup> ( $R^2$ ) و میزان درصد میانگین خطای مطلق<sup>۷</sup> (MAPE) برای محاسبه خطا و میزان دقت مدل شبکه عصبی استفاده خواهد شد.

در این پژوهش از داده‌های تجربی که در ادامه توضیح داده میشود بمنظور ساخت و ایجاد مدل ریاضی شبکه عصبی استفاده می‌شود. مدل شبکه عصبی یک مدل داده محور است بنابراین بدون داده تجربی قادر به استفاده نخواهد بود. در واقع از داده تجربی جهت آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود.

بعد از آموزش شبکه عصبی با ارزیابی میزان خطای مدلسازی به کمک داده‌های تست، می‌توان از عملکرد مدل شبکه عصبی اطمینان خاطر حاصل کرد، سپس در وهله بعد می‌توان به کمک مدل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، پارامتر خروجی شبکه عصبی را بهینه نمود و

---

<sup>1</sup>RO (Reverse Osmosis)

<sup>2</sup>Rejection Factor

<sup>3</sup>Permeate Flux

<sup>4</sup>Multi Layer Perceptron (MLP)

<sup>5</sup>Mean Square Error

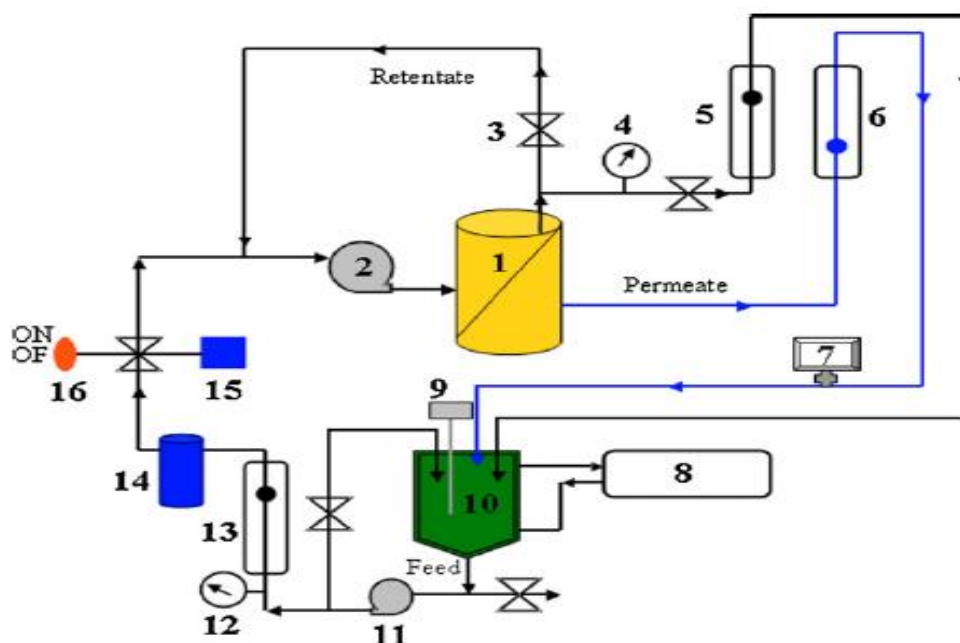
<sup>6</sup>Corroleation Coefficient

<sup>7</sup>Mean Absoulte Percentage Error

شرایط کارکرد بهینه را برای پلنت آب شیرین کن اسمز معکوس بدست آورد. در این پژوهش منظور از بهینه سازی در واقع به حداکثر رساندن درصد حذف نمک (RE) و به حداکثر رساندن دبی آب تصفیه شده (PF) بطور همزمان است. لازم بذکر است این دو تابع هدف ما با یکدیگر در تضاد هستند و بهبود در مقدار یکی، سبب نامطلوب شدن تابع هدف دیگری، می شود بنابراین لازم است تا یک بهینه سازی دو هدفه انجام گیرد تا بطور همزمان هر دو تابع هدف بهینه گردد.

#### ۴-۲- بانک اطلاعاتی

ستاپ آزمایشگاهی جمع آوری داده از واحد اسمز معکوس در زیر ارائه شده است. از نتایج این آزمایش ها جهت ایجاد مدل شبکه عصبی استفاده گردید.



شکل (۴-۱) شماتیک سیستم شیرین سازی اسمز معکوس در مقیاس آزمایشگاهی

پارامترهای زیادی بر عملکرد یک غشای اسمز معکوس موثر هستند. ۴ مورد از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر روی عملکرد پلنت اسمز معکوس، دمای خوراک، غلظت نمک در خوراک ورودی، دبی خوراک و فشار خوراک می باشد. این چهار متغیر، بر روی فلاکس ماده تراوشی (PF) و درصد حذف (RE) تاثیر گزار هستند. عوامل مختلفی بر روی این دو تابع هدف می توانند اثرگذار باشند، لیکن در این پژوهش فقط اثر این ۴ متغیر نامبرده شده مورد بررسی قرار گرفته است. بازه تغییرات این متغیرهای ورودی و خروجی در جدول زیر ارائه شده است. تعداد کل داده ها جهت مدلسازی ۶۲ است که این داده ها به صورت تصادفی به ۳ دسته آموزش، صحنه سنجی و تست تقسیم بندی شده اند.

جدول (۱-۴) جدول داده های ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی به همراه بازه تغییرات آن

	Parameters	Measures	Min	Max
<b>Input variables</b>	Feed Concentration ( $g/L$ )	C	12.3	48.1
	Feed Temperature ( $^{\circ}C$ )	T	19.4	40.1
	Feed Flow rate ( $L/h$ )	Q	120	230
	Feed pressure (bar)	P	6.5	13.5
<b>Output variables</b>	Permeation Flux ( $kg/m^2h$ )	PF	27.1	511
	Rejection factor (%)	RE	65	96

نحوه تقسیم بندی داده های تجربی برای ایجاد مدل شبکه عصبی به شکل زیر است.

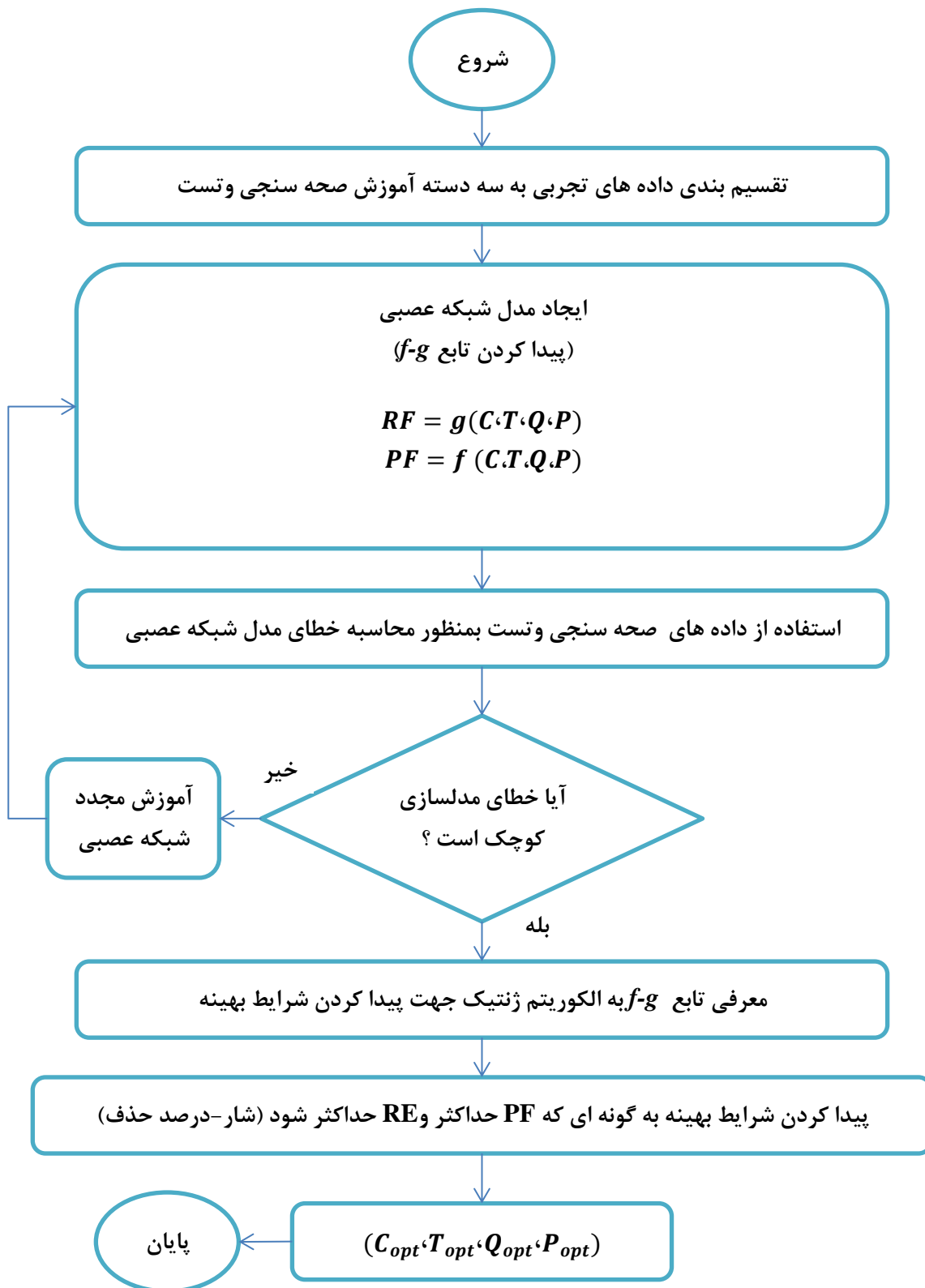
جدول (۲-۴) تقسیم بندی کل داده های تجربی جهت استفاده برای ایجاد مدل شبکه عصبی به منظور پیش بینی شار PF و درصد حذف RE

Divide data randomly		
training ratio	70%	44 samples
validation ratio	15%	9 samples
test ratio	15%	9 samples

## ۴-۳- روش کار

در این پژوهش، ۳ هدف اصلی مطابق بندهای زیر دنبال می شود. در ادامه، گام به گام به پیاده سازی مراحل زیر پرداخته و نتایج هر بخش در انتهای همان بخش ارائه می گردد.

- هدف ۱: ساخت مدل شبکه عصبی جهت پیش بینی شار عبوری (PF)
  - هدف ۲: ساخت مدل شبکه عصبی جهت پیش بینیدرصد حذف نمک (RE)
  - هدف ۳: بهینه کردن ۲ هدفه PF و RE به کمک دو مدل بالا
- در دیاگرام زیر خلاصه ای از روش کار ارائه شده است. مطابق شکل ابتدا به کمک داده تجربی ۲ مدل شبکه عصبی جهت پیش بینی PF و RE ساخته می شود سپس به کمک الگوریتم ژنتیک هر ۲ بهینه می شوند. بدیهی است بدلیل دو هدفه بودن مساله بهینه سازی جواب بهینه بجای یک نقطه، یک منحنی بنام جبهه پارتو است.



شکل (۲-۴) مراحل مدلسازی و بهینه سازی توابع هدف مورد بررسی در این پژوهش



پس از ساخت مدل شبکه عصبی، عملکرد و دقت آن در پیش بینی به کمک شاخص های آماری زیر محاسبه میگردد. معادله محاسبه خطا به کمک هر کدام از شاخص های زیر در ادامه ارائه شده است.

جدول (۳-۴) شاخص های آماری مورد استفاده در بررسی میزان دقت شبکه عصبی در پیش بینی شار و درصد حذف نمک

تعریف	شاخص آماری
میانگین مطلق خطا	$MAE$
میانگین مجذور خطا	$MSE$
جذر میانگین مجذور خطا	$RMSE$
میانگین درصد خطای نسبی	$MAPE$
ضریب همبستگی	$R^2$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - p_i) \quad (۱-۴)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - p_i)^2}{N} \quad (۲-۴)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{t_i - p_i}{t_i} \right| \quad (۳-۴)$$

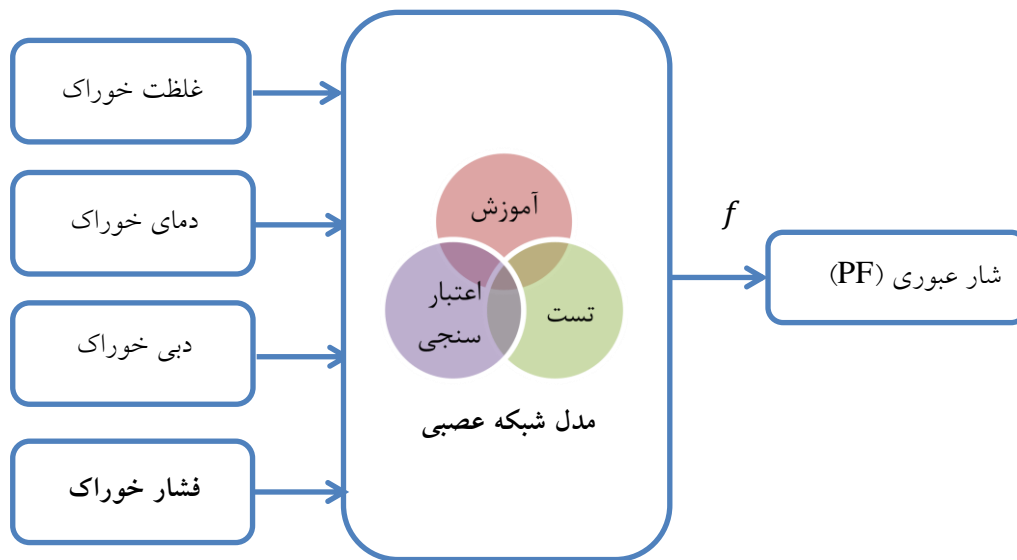
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - p_i)^2}{N}} \quad (۴-۴)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - t_m)^2} \quad (۵-۴)$$

#### ۴-۳-۱- مدلسازی فلاکس به کمک شبکه عصبی

از شبکه عصبی به عنوان یک ابزار مدلسازی اصلی در پیش بینی فلاکس خروجی (PF) استفاده شد. غلظت خوراک، دمای خوراک دبی خوراک، فشار خوراک جزء متغیرهای ورودی

(متغیرهای مستقل) به شبکه‌ها و فلاکس خروجی (PF) متغیر خروجی مدلسازی می‌باشد.

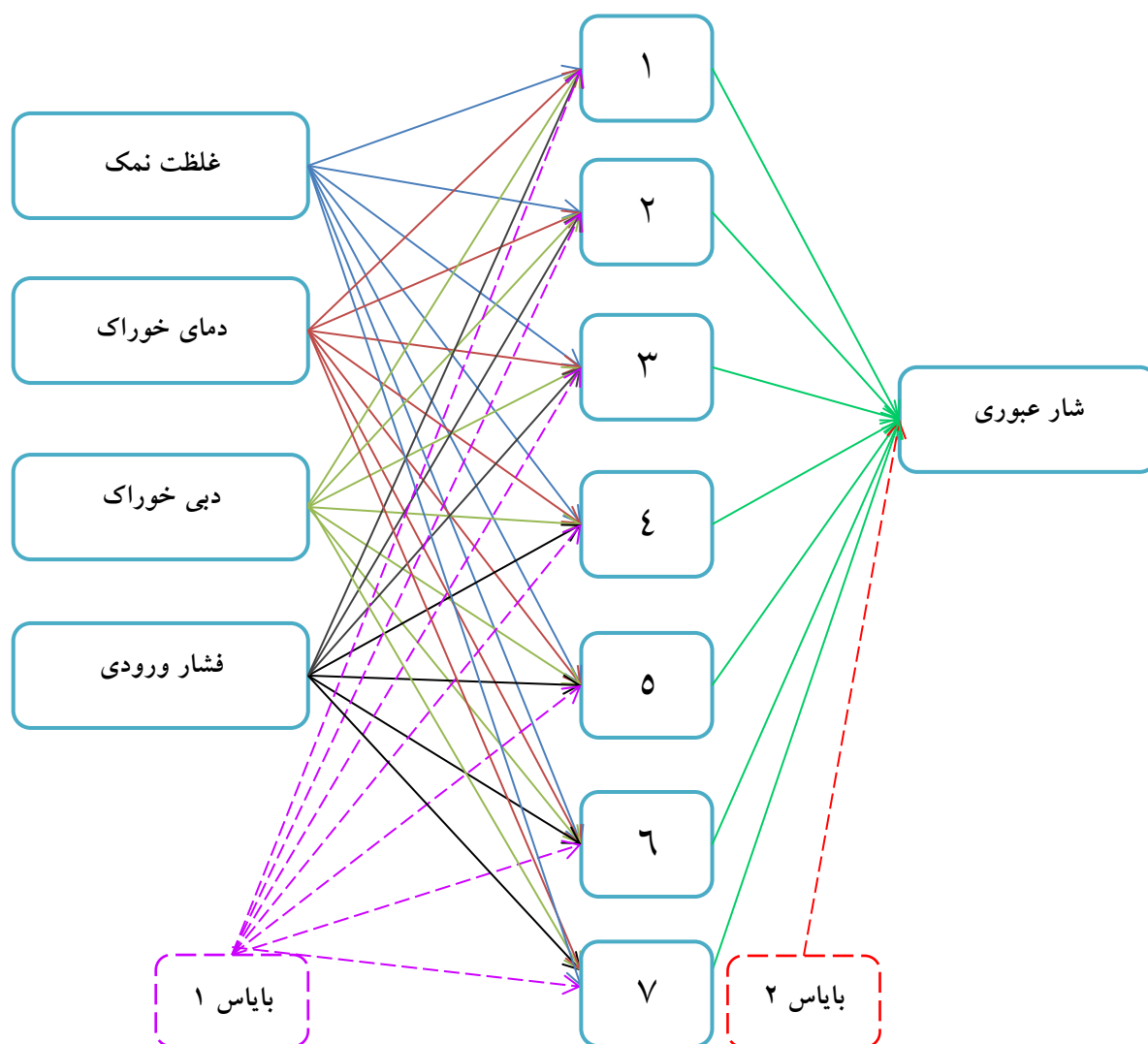


شکل (۳-۴) متغیرهای ورودی و خروجی مدلسازی به کمک شبکه عصبی جهت پیش بینی شار عبوری PF برای مدل شبکه عصبی زیر، تعداد نورون‌های لایه مخفی ۶ در نظر گرفته شد، ساختار شبکه‌ها مورد بررسی در شکل زیر شکل (۴-۴) و شکل (۴-۱۳) آورده شده است. رابطه ریاضی معادل این ساختار به شکل معادله زیر است. در واقع، مدل شبکه عصبی برای محاسبه شار عبوری PF به شکل زیر است.

$$PF_{NN} = [LW]_{1 \times 7} \times \tanh \left( [IW]_{7 \times 4} \times \begin{bmatrix} C \\ T \\ Q \\ P \end{bmatrix}_{4 \times 1} + [b_1]_{7 \times 1} \right) + [b_2]_{1 \times 1} \quad (۴-۶)$$

در حین آموزش، وزن‌ها و بایاس‌های شبکه به طور سیستماتیک به روز شده تا داده خروجی از شبکه عصبی با مقدار تجربی بدست آمده از نتایج آزمایشگاه بر هم منطبق شوند. (منظور از وزن‌ها ماتریس  $IW$  و  $LW$  و منظور از بایاس ماتریس  $b^1$  و  $b^2$  است) به عبارت دیگر در حین آموزش در تکرارهای مختلف تابع خطا به حداقل می‌رسد. چنانکه در قبل گفته شد، هدف از مدلسازی به کمک شبکه عصبی، ساخت سیستمی است که به طور کارآمد قادر

به پیش بینیداده های خروجی (PF و RE) به کمک داده های ورودی (C-T-Q-P) باشد. زمانیکه تابع خطا به حداقل مقدار خود رسید آموزش شبکه عصبی اتمام می یابد و از این لحظه به بعد از شبکه عصبی می توان برای پیش بینی متغیر خروجی به کمک متغیرهای ورودی استفاده کرد.



شکل (۴-۴) ساختار شبکه عصبی جهت پیش بینی شار خروجی آب

#### ۴-۴-۲ نتایج مدل سازی فلاکس خروجی به کمک شبکه عصبی

در این قسمت نتایج مدل سازی به کمک شبکه عصبی با نتایج واقعی برای فلاکس

خروجی با یکدیگر مقایسه می شوند. تعداد کل داده های مورد استفاده در مدلسازی ۶۲ عدد می باشد. که از این تعداد ۷۰٪ آن ها برای آموزش، ۱۵٪ برای نظارت و مابقی برای تست شبکه در نظر گرفته شد. مطابق معادلات جدول (۴-۳) سنجش بعضی از پارامترهای آماری مهم در آموزش، صحنه سنجی و تست، برای داده های فلاکس نفوذ محاسبه شده است و در زیر ارائه می گردد:

جدول (۴-۴) شاخص های آماری بدست آمده از مدلسازی فلاکس خروجی به کمک شبکه عصبی مصنوعی (داده نرمال)

	Training	Validation	Test
<b>MSE</b>	0.00016	0.00019	<b>0.00031</b>
<b>RSME</b>	0.01279	0.01386	<b>0.01773</b>
<b>MAE</b>	0.00975	0.01088	<b>0.01256</b>
<b>MAPE</b>	0.01106	0.01370	<b>0.00950</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.999	0.999	0.999

جدول (۴-۴) عملکرد شبکه های عصبی مصنوعی را به شکل متوسط درصد خطا

(MPE)، میانگین جذر خطا (MSE)، ریشه ی میانگین مجذور خطا (RMSE)، متوسط

خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بین مقادیر واقعی و خروجی های شبکه

عصبی نشان می دهد. به طور اختصار، اگر MPE،  $R^2$ ، MAE، MSE و RMSE به ترتیب

نزدیک به مقادیر ۰، ۱، ۰، ۰ و ۰ باشند، پیش بینی های ANN بهترین و دقیق ترین حالت

ممکن خواهد بود. در ادامه نتایج مدلسازی شار عبوری به ترتیب نشان داده شده است. این

نتایج، شامل مقایسه داده های واقعی و مدلسازی برای کل داده ها، داده های آموزش، داده های

صحنه سنجی و داده های تست و نیز نمودار خطا برای هر ۳ دسته داده (آموزش، صحنه سنجی

و تست) است. و نمودار رگرسیون داده های مدل و واقعی نیز برای هر ۳ دسته داده شده است.

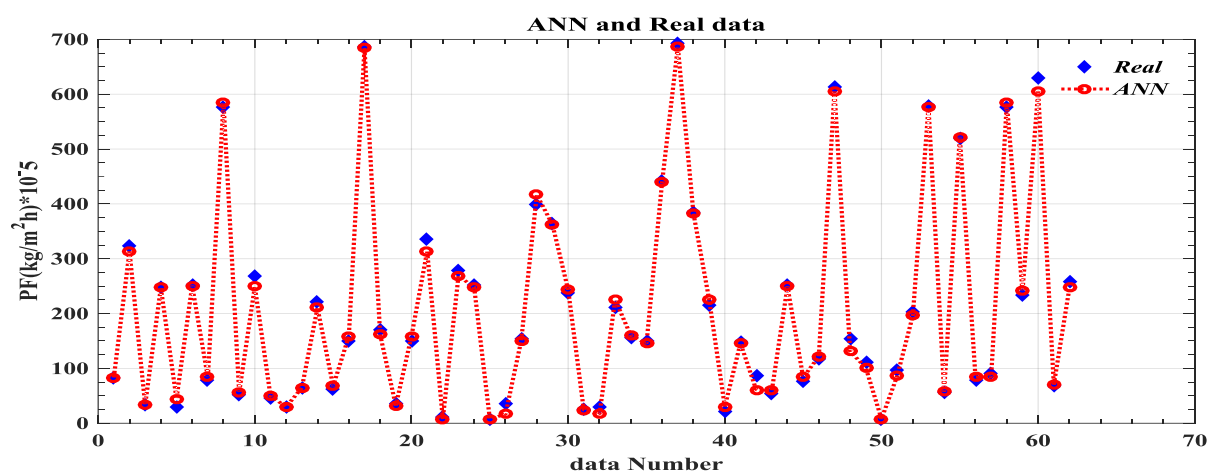
#### ۴-۴-۱- نتایج پیش بینی مدل برای کل داده ها (شار عبوری)

در نمودار زیر نتایج مدلسازی به کمک شبکه عصبی و نتایج واقعی بصورت مقایسه ای

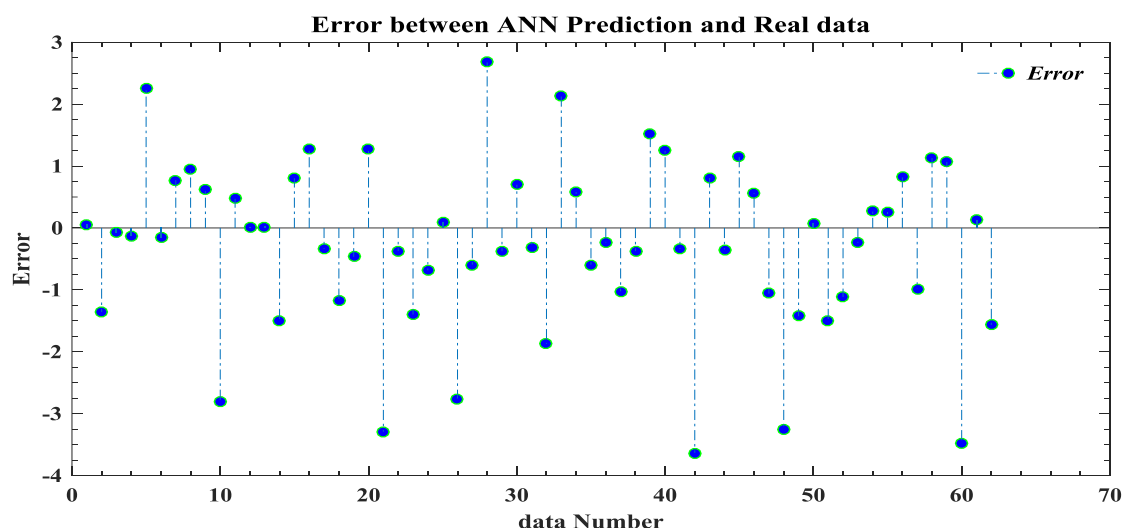
برای کل داده ها (۶۲ داده) رسم شده است. همانطور که مشاهده میکنید تطابق خوبی بین

نتایج مدل و نتایج واقعی وجود دارد. میزان خطا در پیش بینی در نمودار بعدی (شکل (۴-۶))

نشان داده شده است.



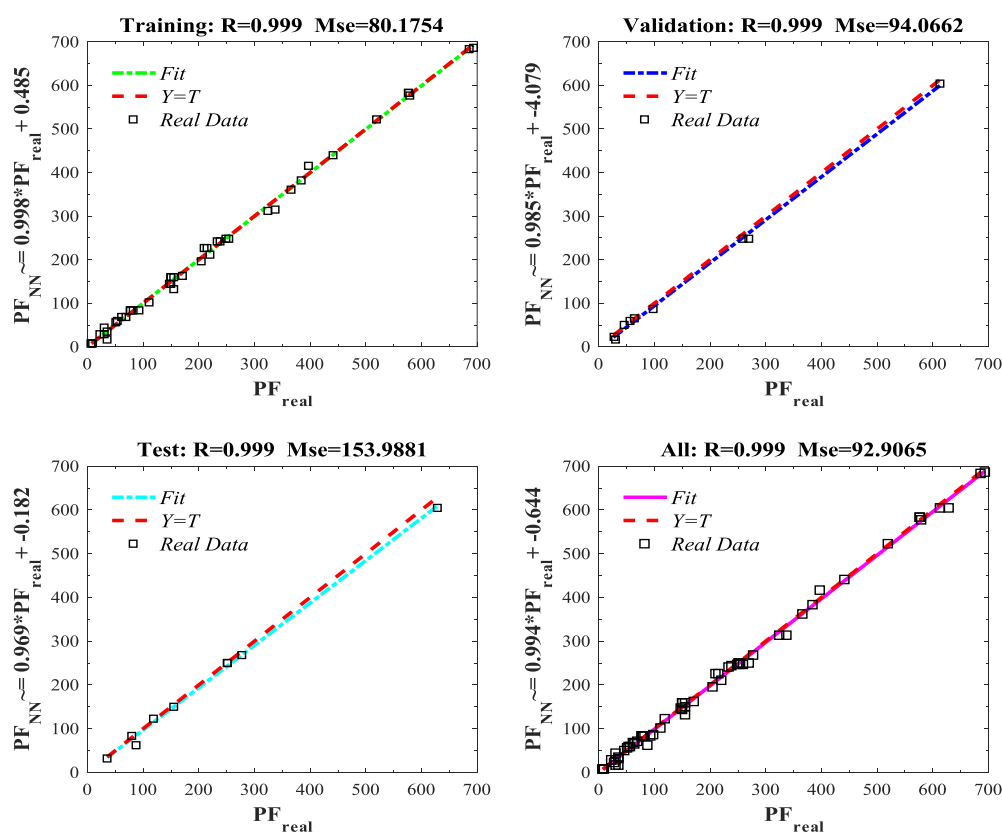
شکل (۴-۵) مقایسه نتایج مدل و شبکه برای شار عبوری



شکل (۴-۶) درصد خطای بی بعد شده مدلسازی به کمک شبکه عصبی

## ۴-۴-۲- نمودار رگرسیون برای فلاکس عبوری PF

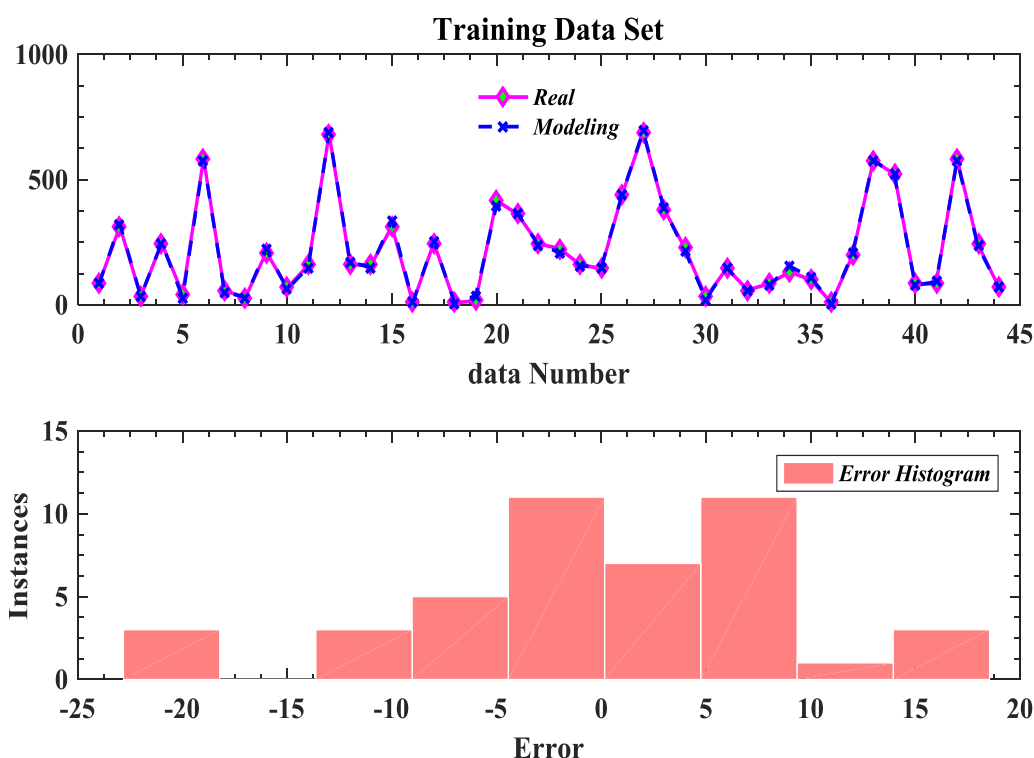
نمودار رگرسیون برای داده های  $PF_{real}$  و  $PF_{model}$  رسم شده است. محور افقی داده های واقعی شار ( $X$ ) و محور عمودی داده های مدلسازی ( $Y$ ) می باشد (منظور از داده مقدار شار عبوری ( $PF$ ) است). در حالت ایده آل، زمانیکه خطای پیش بینی شبکه عصبی صفر است، داده واقعی با داده مدل بر هم منطبق اند ( $PF_{model} = PF_{real}$ ) بنابراین نقاط بر روی خط نیمساز ربع اول و سوم ( $Y=X$ ) قرار می گیرند. همانطور که ملاحظه می کنید به دلیل وجود اندکی خطا، داده نسبت به خط  $Y=X$  انحراف دارند. معادله بهترین خط عبورکننده از بین داده ها در شکل های زیر ارائه شده است



شکل (۴-۷) نمودار رگرسیون داده مدل و داده واقعی

### ۴-۳- نمودار مقایسه ای و هیستوگرام خطا

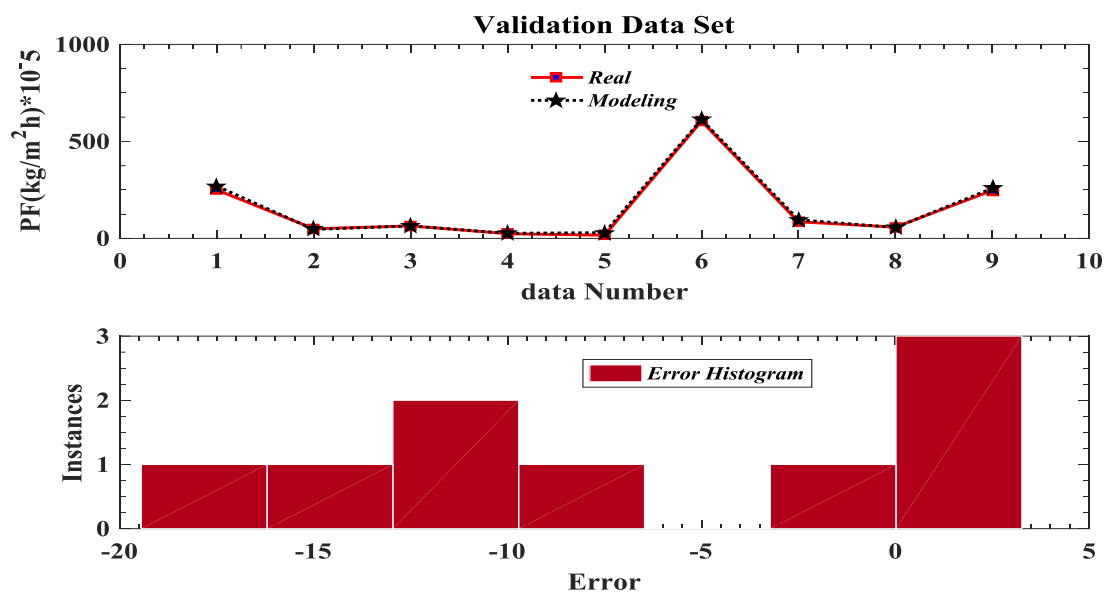
برای هر سه داده‌ی آموزش صحنه سنجی و تست نمودار واقعی و مدلسازی و هیستوگرام خطا رسم گردیده است. همانطور که در نمودار مشخص است تعداد داده‌های آموزش ۴۴ عدد است. و نتایج مدلسازی تطابق خوبی با داده‌های واقعی دارند میزان خطا ناچیز و دقت مدلسازی مطلوب است. نمودار بعدی که در زیر آن رسم شده است توزیع خطا را در ۱۰ زیربازه نشان می‌دهد و هیستوگرام خطا نامیده می‌شود. نحوه توزیع خطای برای ۴۴ داده به شکل یک زنگوله است. مطابق نمودار هیستوگرام خطا ۱۸ داده خطای در حد صفر دارد همانطور که مشاهده می‌کنید تعداد فراوانی با افزایش میزان خطا کاهش می‌یابد و در حالت ایده آل نمودار هیستوگرام خطا تقریباً شبیه به یک زنگوله است.



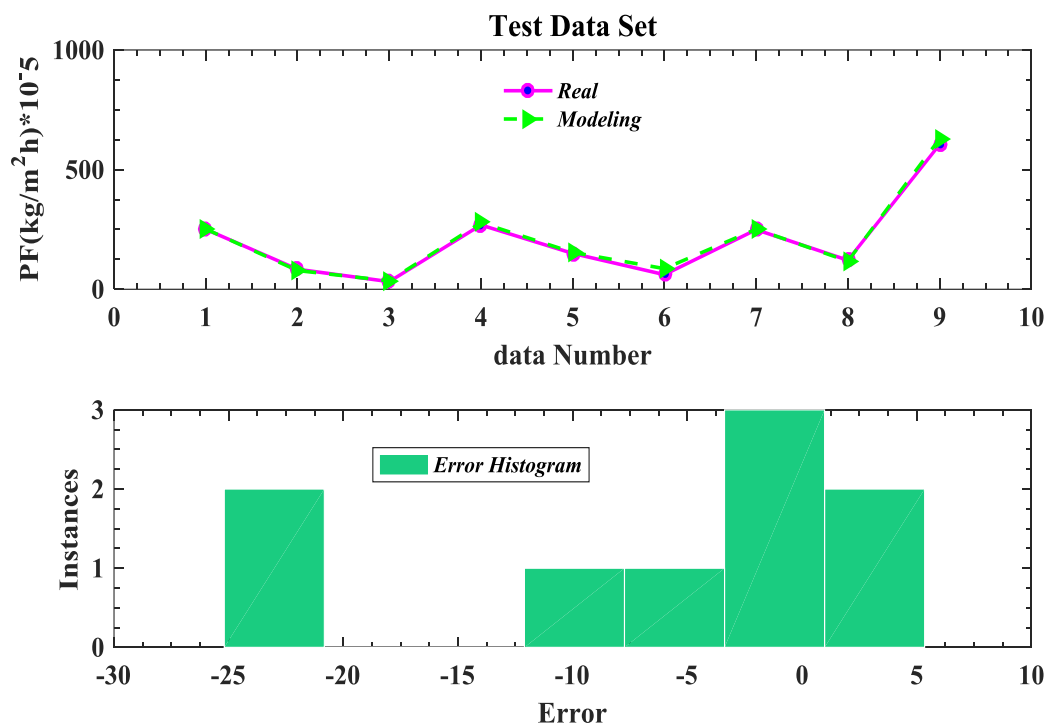
شکل (۴-۸) نمودار مقایسه‌ای داده‌های مدل و داده تجربی برای دسته‌ی آموزش

در ادامه نمودارهای مقایسه‌ای و هیستوگرام خطا برای داده صحه سنجی و تست ارائه

شده است



شکل (۴-۹) نمودار مقایسه‌ای داده‌های مدل و داده تجربی برای دسته صحه سنجی

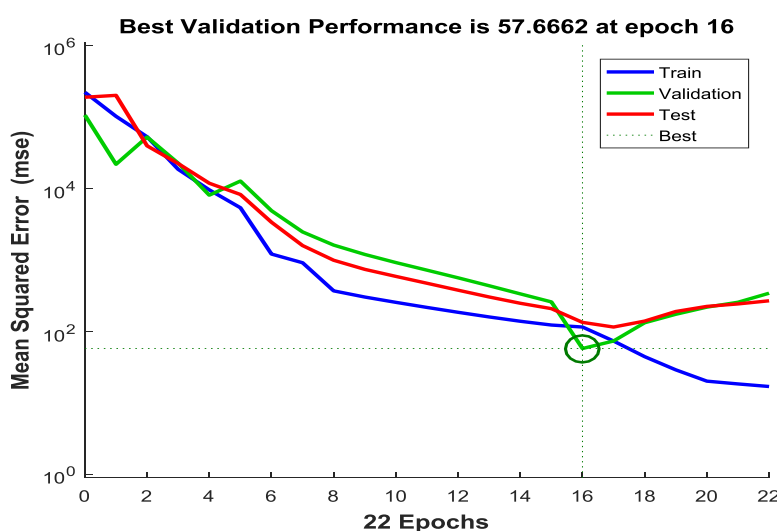


شکل (۴-۱۰) نمودار مقایسه‌ای داده‌های مدل و داده تجربی برای دسته تست



## ۴-۴-۴- نمودار همگرایی در روند آموزش

خطای میانگین مجموع مربعات برای داده آموزش، صحنه سنجی و تست در زیر برای تکرارهای مختلف رسم شده است (محور افقی تعداد تکرار الگوریتم در فرآیند آموزش شبکه است). روند آموزش شبکه عصبی بصورت تکراری است در هر مرحله مقادیر ماتریس وزن و بایاس بگونه ای تغییر می کند تا خروجی شبکه بر مقدار واقعی منطبق شود. رفته رفته خطا کاهش میابد. مقدار خطا در شروع آموزش (در تکرارهای اولیه) مقدار بزرگی است. در تکرارهای بعدی مقدار خطا روند کاهشی دارد. در تکرار شماره ۱۶ میزان خطا برای داده صحنه سنجی به حداقل مقدار خود میرسد از تکرار ۱۶ تا تکرار ۲۲ میزان خطای صحنه سنجی متوالیاً روند صعودی دارد ولیکن خطای داده آموزش (training) همچنان رو به کاهش است. برای اینکه مدل عمومیت داشته باشند باید از آموزش بیش از اندازه پرهیز کرد. آموزش بیش از اندازه منجر به پدیده ی **overfitting** می گردد بنابراین الگوریتم بصورت پیش فرض، زمانی که مقدار خطای صحنه سنجی در ۶ تکرار متوالی صعودی باشد دستور توقف میدهد.



شکل (۴-۱۱) نمودار مقایسه‌ای داده‌های مدل و داده‌های تجربی برای دسته تست

مطابق شکل (۴-۱۱) الگوریتم در تکرار ۲۲ متوقف شده است زیرا در ۶ تکرار متوالی میزان خطای صحنه سنجی صعودی بوده است. در تکرار ۱۶ کمترین خطای داده صحنه سنجی بدست آمده است بنابراین این تکرار به عنوان جواب مساله انتخاب میگردد زیرا مدل در این تکرار حداکثر generalization را داراست.

مدلی که شبکه عصبی برای پیش بینی فلاکس شار بر حسب متغیرهای مستقل ارائه داده است به شکل زیر است

$$PF_{NN} = \left( [LW]_{1 \times 7} \times \tanh \left( [IW]_{7 \times 4} \times \begin{bmatrix} C \\ T \\ Q \\ P \end{bmatrix}_{4 \times 1} + [b_1]_{7 \times 1} \right) + [b_2]_{1 \times 1} \right) \quad (۴-۷)$$

که در رابطه ی بالا C,T,Q,P به ترتیب اندازه فشار، دبی، دما و غلظت نمک است و ماتریس  $IW, LW, b^1, b^2$  به شرح زیر است.

مقادیر ماتریس های مذکور در طی فرآیند آموزش شبکه با داده های واقعی بدست آمد

جدول (۴-۵) ماتریس وزن و بایاس شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش جهت پیش بینی راندمان استخراج

IW	LW	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
شکل (۴-۶)	جدول (۴-۸)	جدول (۴-۷)	جدول (۴-۹)

جدول (۴-۶) ماتریس IW (وزن لایه ورودی) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

-0.016846006	-2.54707744	-0.044143671	-9.253062586
0.572064149	-0.014837797	0.168777932	-0.507399728
1.166248199	0.33879966	0.8002546	2.0369695
3.93039094	4.702405425	-4.355574588	-5.491371341
10.66242776	-2.767816318	-9.237024795	1.434929768
-0.919657629	-0.69127035	-0.968277846	0.429490598
-0.016846006	-2.54707744	-0.044143671	-9.253062586

جدول (۷-۴) ماتریس b1 (بایاس لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

-0.10839
-0.99868
-1.91523
-5.96864
4.509739
-0.06418
-0.10839

جدول (۸-۴) ماتریس LW (وزن لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

0.003759188	1.511206	0.016082633	0.0243839	0.02249332	-0.036989	0.003759188
-------------	----------	-------------	-----------	------------	-----------	-------------

جدول (۹-۴) ماتریس b2 بایاس لایه آخر شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

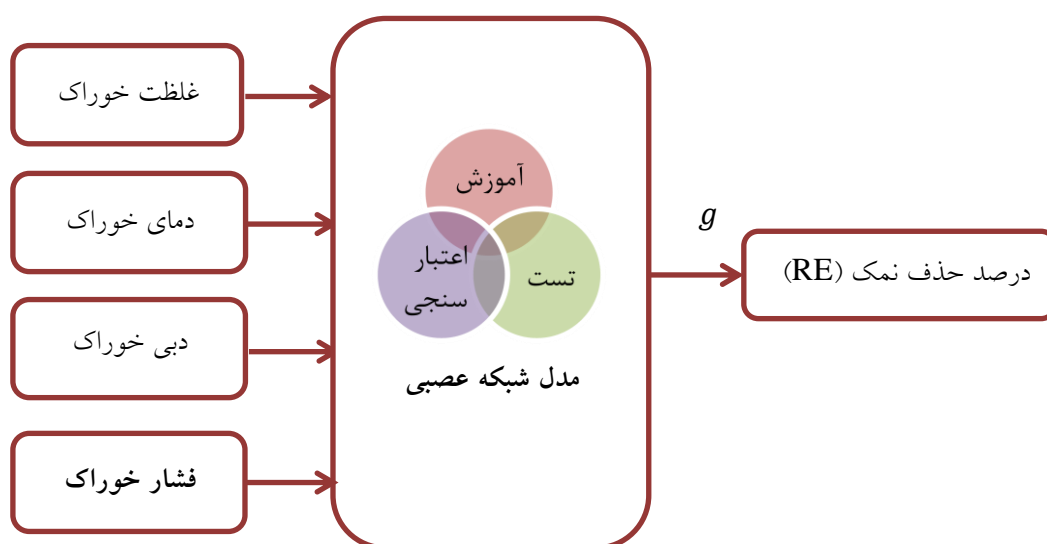
0.5516
--------

#### ۴-۴-۵- مدلسازی درصد حذف به کمک شبکه عصبی

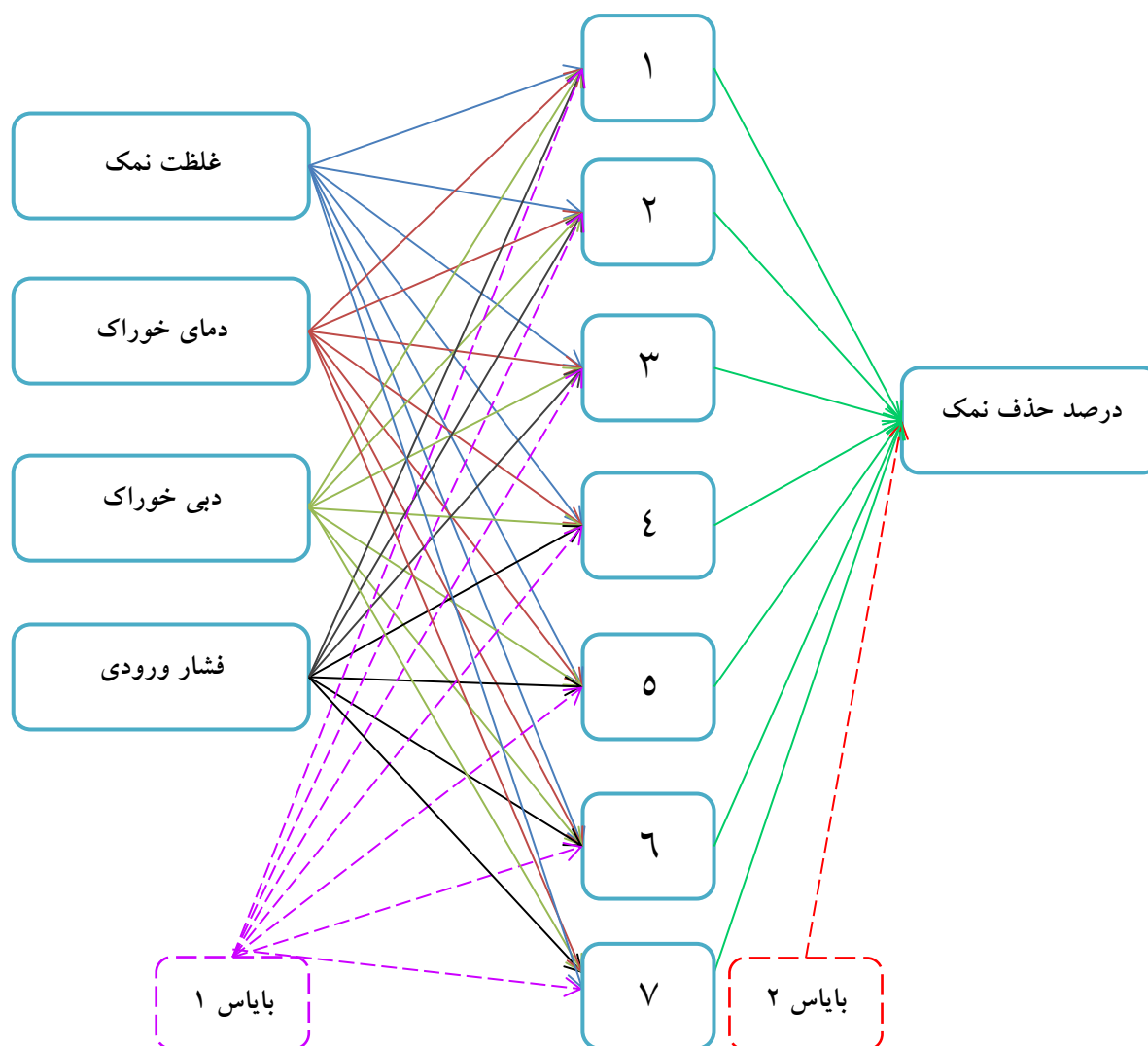
از شبکه عصبی به عنوان یک ابزار مدلسازی جهت پیش بینی درصد حذف نمک (RE)

استفاده شد. غلظت خوراک، دمای خوراک دبی خوراک، فشار خوراک جزء اجزای ورودی

(متغیرهای مستقل) به شبکه‌ها، و درصد حذف نمک (RE) خروجی مدلسازی می‌باشد



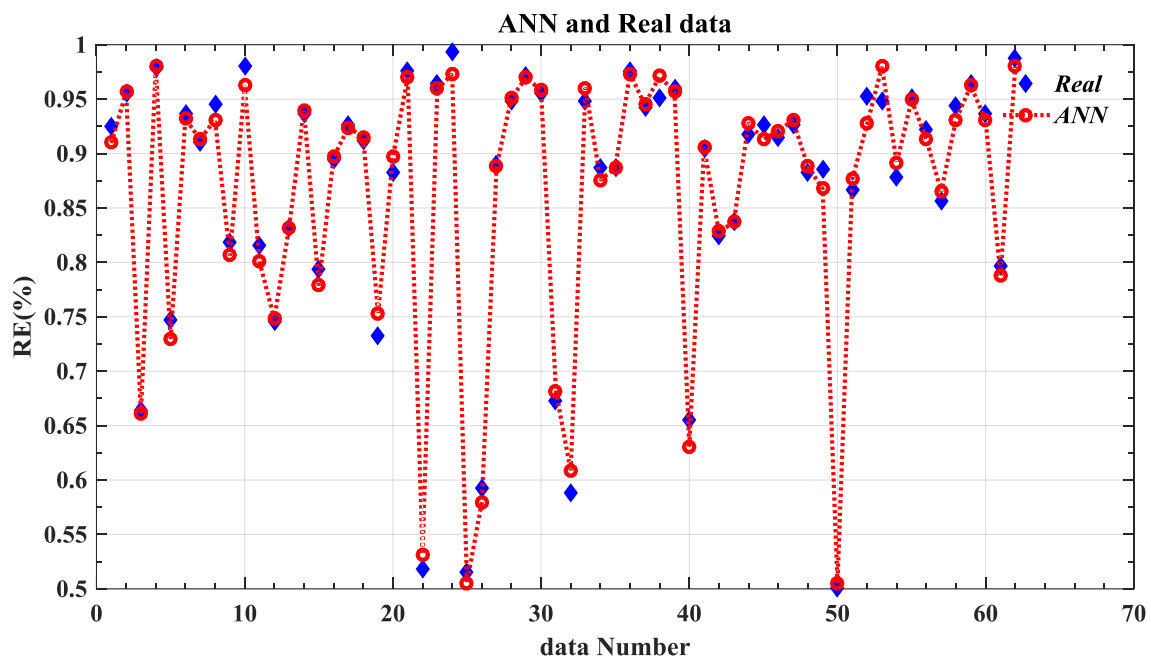
شکل (۱۲-۴) متغیرهای ورودی و خروجی مدلسازی به کمک شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک RE



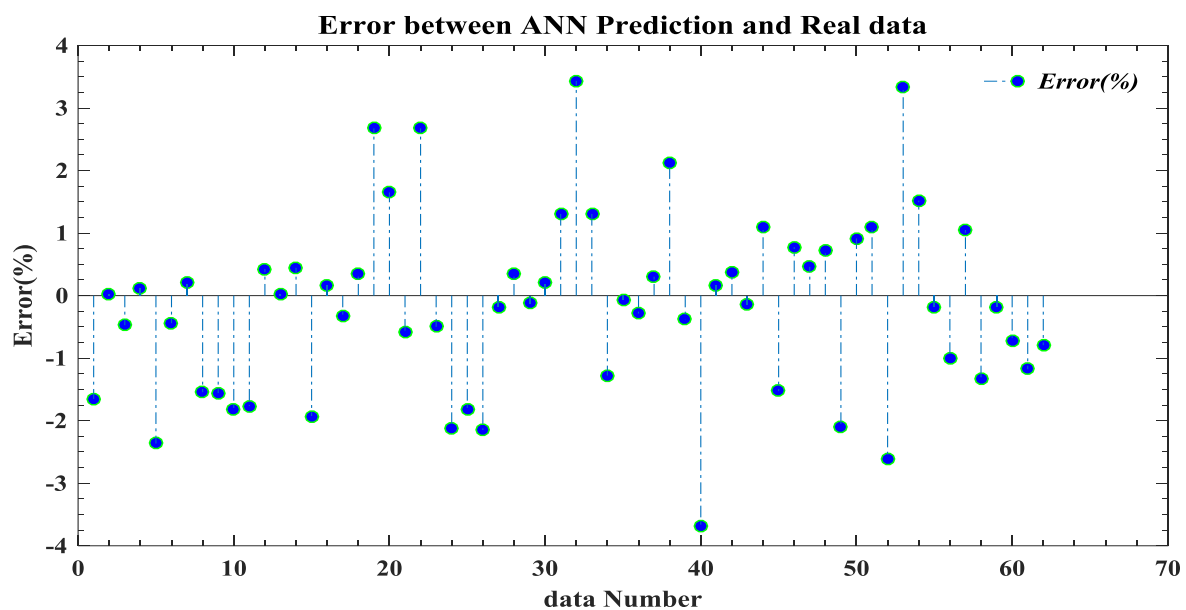
شکل (۴-۱۳) ساختار شبکه عصبی جهت پیش بینی درصد حذف نمک خروجی

#### ۴-۵- نتایج مدل سازی مربوط به درصد حذف

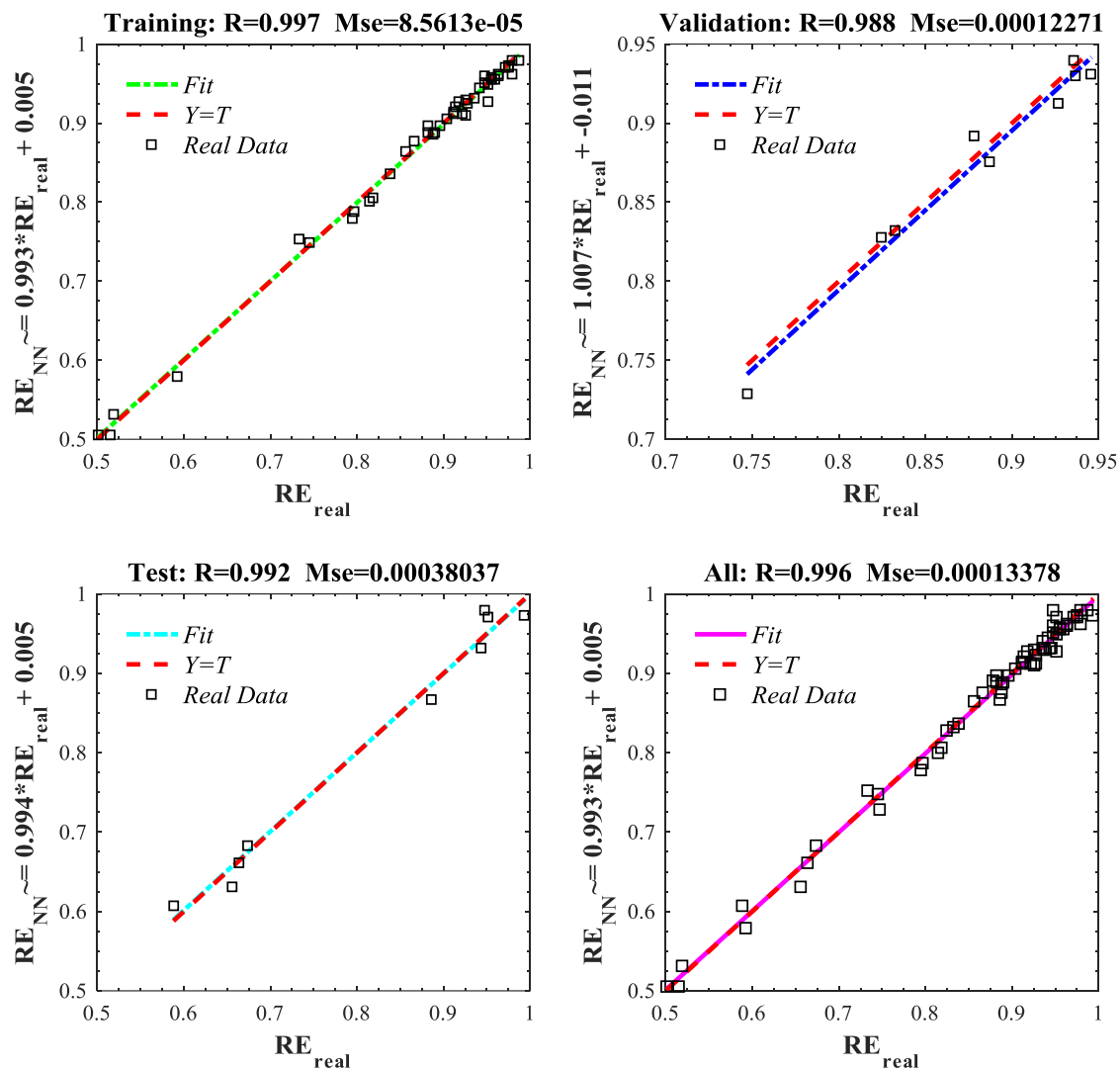
مطابق با مدل سازی صورت گرفته برای فلاکس خروجی ، مدل سازی برای متغیر درصد حذف نمک نیز صورت گرفت. در این بخش نتایج مربوط به شاخص های آماری مربوط به پیش بینی درصد حذف نمک ارائه شده است. همانطور که مشاهده می کنید میزان خطا اندک است. و با اطمینان بالایی میتوان از مدل شبکه عصبی در دیگر مدلسازی ها و یا برای مقاصد بهینه سازی استفاده نمود.



شکل (۴-۱۴) نتایج بدست آمده از مدلسازی و مقایسه آن با نتایج واقعی برای درصد حذف نمک



شکل (۴-۱۵) اختلاف نتایج مدلسازی و نتایج (Error=target-output) واقعی بصورت نمودار ساقه ای برای درصد حذف نمک



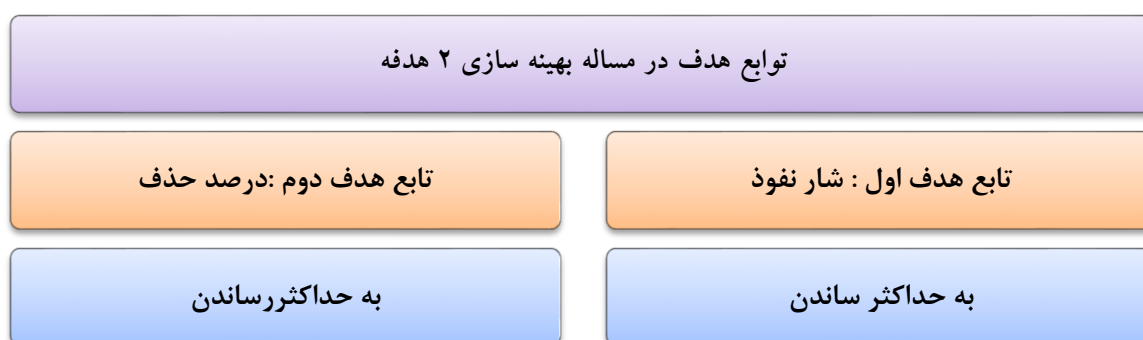
شکل (۴-۱۶) نمودار رگرسیون داده پیش بینی شده برای مدل و داده واقعی برای متغیر درصد حذف نمک

جدول (۴-۱۰) شاخص های آماری بدست آمده از مدلسازی درصد حذف نمک به کمک شبکه عصبی مصنوعی

	Training	Validation	Test
<b>MSE</b>	0.00009	0.00012	<b>0.00038</b>
<b>RSME</b>	0.00925	0.01108	<b>0.0195</b>
<b>MAE</b>	0.00712	0.00947	<b>0.01779</b>
<b>MAPE</b>	0.87313	1.08777	<b>2.20985</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.997	0.9880	0.992

## ۴-۶- بهینه سازی دو هدفه

بعد از ارائه مدل شبکه عصبی، جهت پیش بینی شار عبوری و درصد حذف نمک و اطمینان از دقت این مدل، می توان به کمک الگوریتم ژنتیک به بهینه سازی این دو متغیر خروجی (بینی شار عبوری و درصد حذف نمک) پرداخت. در این بخش به کمک الگوریتم ژنتیک و مدل شبکه عصبی، دو تابع هدف (شار نفوذ و درصد حذف نمک) بهینه خواهد شد. برای پیاده سازی بهینه سازی، یک برنامه به زبان متلب نوشته شد. از ۲ مدل شبکه عصبی که در بخش های قبل توسعه داده شد برای پیش بینی فلاکس نفوذ و درصد حذف نمک استفاده می شود. این دو مدل هزاران بار توسط الگوریتم ژنتیک فراخوانده می شود. سپس، به جستجوی راه حل های بهینه در بین راه حلها می پردازد، تا متغیرهای عملیاتی بهینه را بیابد. مطابق شکل زیر، بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک، از طریق بیشینه سازی تابع شار خروجی (PF) و بیشینه سازی درصد حذف (RE) انجام میگیرد.



شکل (۴-۱۷) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه

متغیرهای مستقل و توابع هدف در مساله بهینه سازی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۴-۱۱) توابع هدف درصد حذف و شار عبوری و متغیرهای مستقل

توضیحات	نمایش	متغیر مستقل و وابسته	
شار جرمی	PF	Permeation Flux ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )	توابع هدف
درصد حذف	RE	Rejection factor (%)	
غلظت خوراک	C	Feed Concentration	
دمای خوراک	T	Feed Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	متغیرهای مستقل
دبی خوراک	Q	Feed Flow rate ( $\text{L/h}$ )	
فشار خوراک	P	Feed pressure (bar)	

شکل زیر یک طرح شماتیک از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بمنظور یافتن

جواب بهینه است. الگوریتم ژنتیک راه حل های مختلف را تولید میکند سپس به عنوان

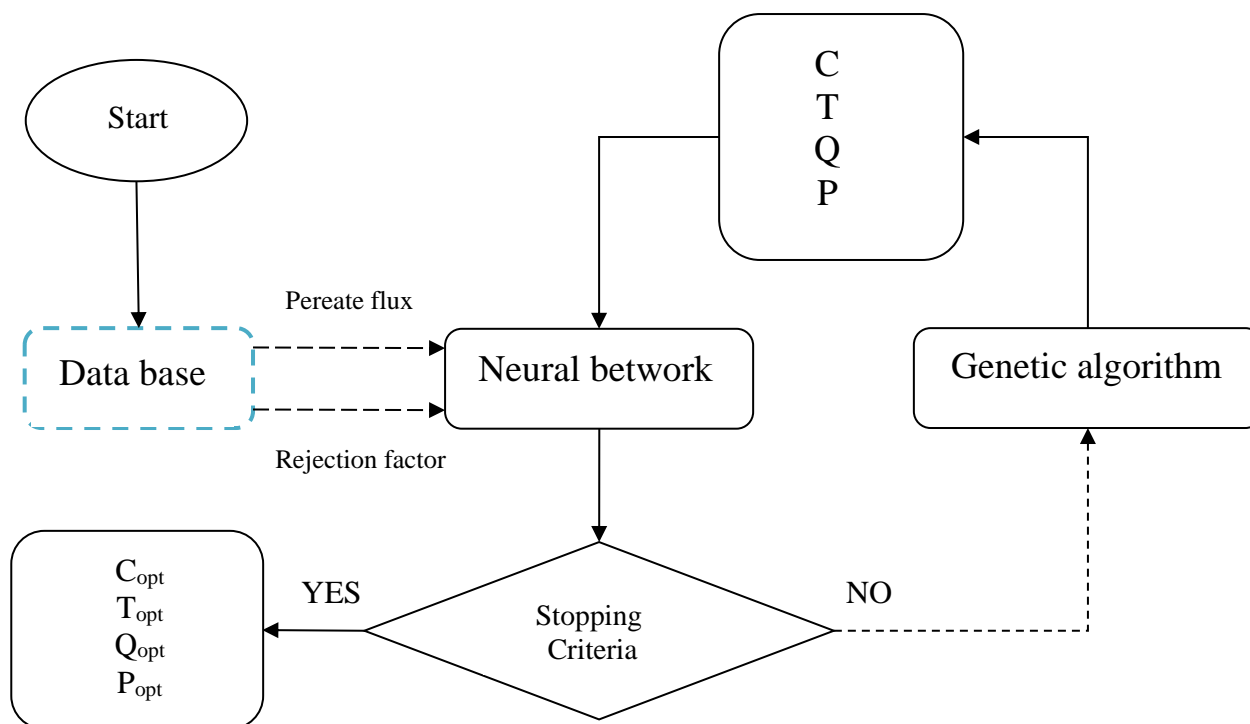
ورودی به شبکه عصبی ارسال میکند. خروجی های شبکه (فلاکس و درصد حذف) به الگوریتم

ژنتیک بازگردانده میشود این عملیات هزاران بار تکرار میشود تا نهایتاً جواب بهینه ای که

منجر به حداکثر فلاکس و حداقل درصد حذف نمک میشود پیدا گردد. در شکل زیر

فلوچارت پیدا کردن پاسخ بهینه ارائه شده است.





شکل (۴-۱۸) بهینه سازی به کمک مدلسازی با شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

هر مساله بهینه سازی یکسری قیود میتواند داشته باشد. در این پژوهش قیود نامساوی بر

روی بازه تغییرات متغیرهای مستقل مساله است.

جدول (۴-۱۲) قیود مساله بهینه سازی (حد بالا و حد پایین متغیرهای مستقل)

Decision variable	نماد	حد بالا	حد پایین
Feed Concentration ( $g/L$ )	C	12.3	48.1
Feed Temperature ( $^{\circ}C$ )	T	19.4	40.1
Feed Flow rate ( $L/h$ )	Q	120	230
Feed pressure (bar)	P	6.5	13.5

از نرم افزار متلب<sup>۱</sup> ورژن ۲۰۱۷ جهت مدلسازی به کمک شبکه عصبی و بهینه سازی به

کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بعد از ایجاد مدل شبکه عصبی و اطمینان از صحت

پیش بینی خروجی، از الگوریتم ژنتیک بمنظور بهینه کردن داده خروجی استفاده خواهیم کرد.

<sup>۱</sup>MATLAB

## ۴-۷- پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک

به کمک الگوریتم ژنتیک، هزاران راه حل مختلف ارزیابی میگردد و از بین راه حل ها ، راه حلی که بهینه تر است انتخاب میگردد. الگوریتم ژنتیک مانند دیگر الگوریتم ها نیازمند یک سری تنظیمات اولیه می باشد تعداد جمعیت تعداد نسل و ضریب ترکیب جز پارامترهای اصلی تنظیمی الگوریتم ژنتیک هستند که مقادیر آنها دلخواه مطابق جدول زیر دلخواه انتخاب میگردد. بدیهی است هر اندازه تعداد جمعیت و تعداد نسل بیشتر باشد الگوریتم راه حل های بیشتری را ارزیابی می کند و دستیابی به بهینه مطلق شانس بیشتری دارد ولیکن حجم محاسباتی بیشتر خواهد شد

جدول (۴-۱۳) پارامترهای تنظیمی الگوریتم ازدحام ذرات

پارامتر تنظیمی	جمعیت در هر نسل	تعداد نسل	ضریب ترکیب
مقدار	۸۰	۲۰۰	۰/۸۵

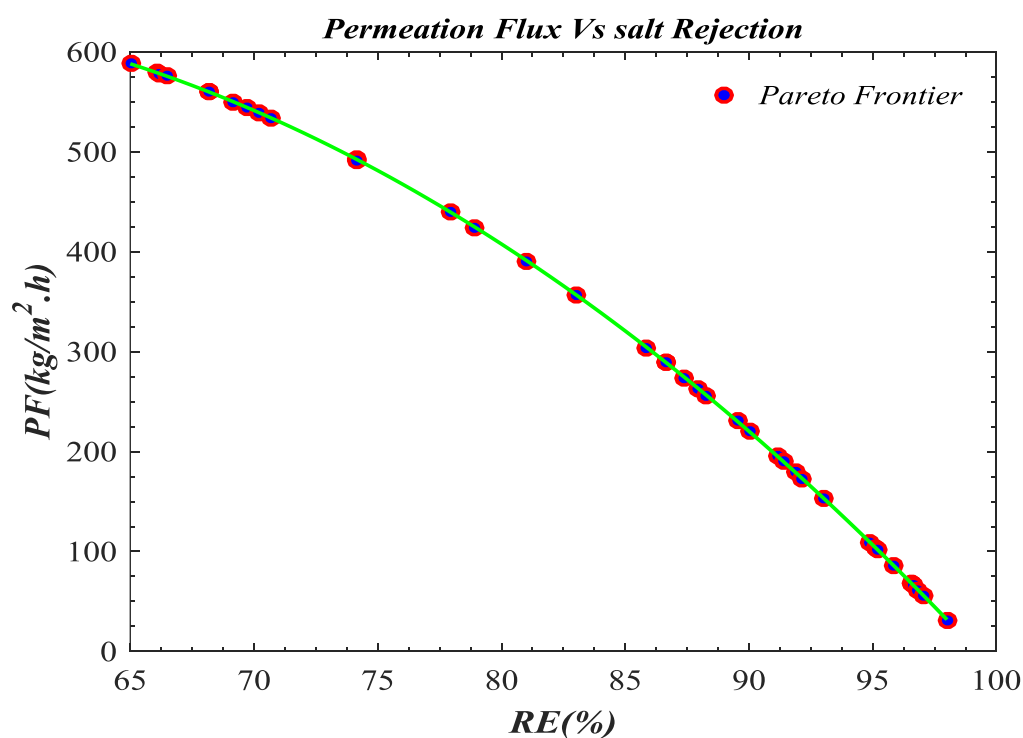
مطابق جدول (۴-۱۳) الگوریتم ژنتیک در هر تکرار ۸۰ راه حل را ارزیابی میکند و با ترکیب بهترین راه حل ها، جمعیت نسل بعدی رامی سازد. این کار به تعداد ۲۰۰ بار تکرار میشود بنابراین ۱۶۰۰۰ راه حل ارزیابی میگردد و از بین آنها بهترین راه حل که منجر به بهترین جواب (هزینه کم آنتروپی کم) می گردد انتخاب میشود.

## ۴-۸- نتایج مساله بهینه سازی دو هدفه بصورت جبهه پارتو

بعد از ارائه مدل شبکه عصبی، به کمک الگوریتم ژنتیک، متغیرهای عملیاتی (یعنی دما، غلظت، دبی، و فشار)، برای دست یابی به حداکثر شار عبوری و حداکثر در صد حذف بهینه

سازی شدند. الگوریتم ژنتیک الگوریتم برای پیش‌بینی PF و RE از شبکه عصبی استفاده میکند. برخلاف مساله بهینه سازی تک هدفه که یک نقطه بهینه دارد مساله بهینه سازی دو هدفه به جای یک راه حل بهینه بی نهایت راه حل بهینه دارد که تشکیل یک منحنی میدهند این منحنی به جبهه پارتو معروف است. همان گونه که در نمودار شکل زیر مشاهده میکنید راه حل بهینه یک منحنی است (بی نهایت راه حل بهینه موجود است) و همچنین مطابق شکل زیر بهبود یک تابع هدف، سبب نامطلوب شدن تابع هدف دیگری می‌شود.

یک تضاد آشکار بین RE و PF مشخص است. به عبارت دیگر تلاش بمنظور افزایش شار عبوری سبب کاهش درصد حذف نمک می‌گردد و بالعکس تلاش برای افزایش درصد حذف نمک، سبب کاهش شار عبوری میگردد. این بدلیل ماهیت متضاد این دو تابع هدف در سیستم های شیرین سازی اسمز معکوس است.



شکل (۴-۱۹) جبهه بهینه پارتو برای حداکثر سازی فلاکس نفوذ و کمینه سازی درصد حذف نمک

## ۴-۹- تعریف شاخص عملکرد برای یک واحد اسمز معکوس

دو تابع هدف قبل را می‌توان در یکدیگر ادغام کرد و به یک شاخص کارایی برای عملکرد واحد اسمز معکوس دست یافت. شاخص کارایی از حاصلضرب شار عبوری در درصد حذف نمک مطابق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\text{performance index} = PI = PF \left( \frac{kg}{m^2 h} \right) \times RE(\%) \quad (۸-۴)$$

در رابطه بالا  $PI$  شاخص کارایی واحد  $RO$  و  $PF$  شار خروجی تصفیه شده بر حسب  $\frac{kg}{m^2 h}$  و  $RE$  درصد حذف نمک از آب بر حسب درصد می‌باشد. مقادیر بهینه شاخص کارایی در جدول زیر ارائه میشود.

جدول (۴-۱۴) جدول مقادیر بهینه متغیرهای مستقل به همراه مقدار بهینه شاخص  $PI$

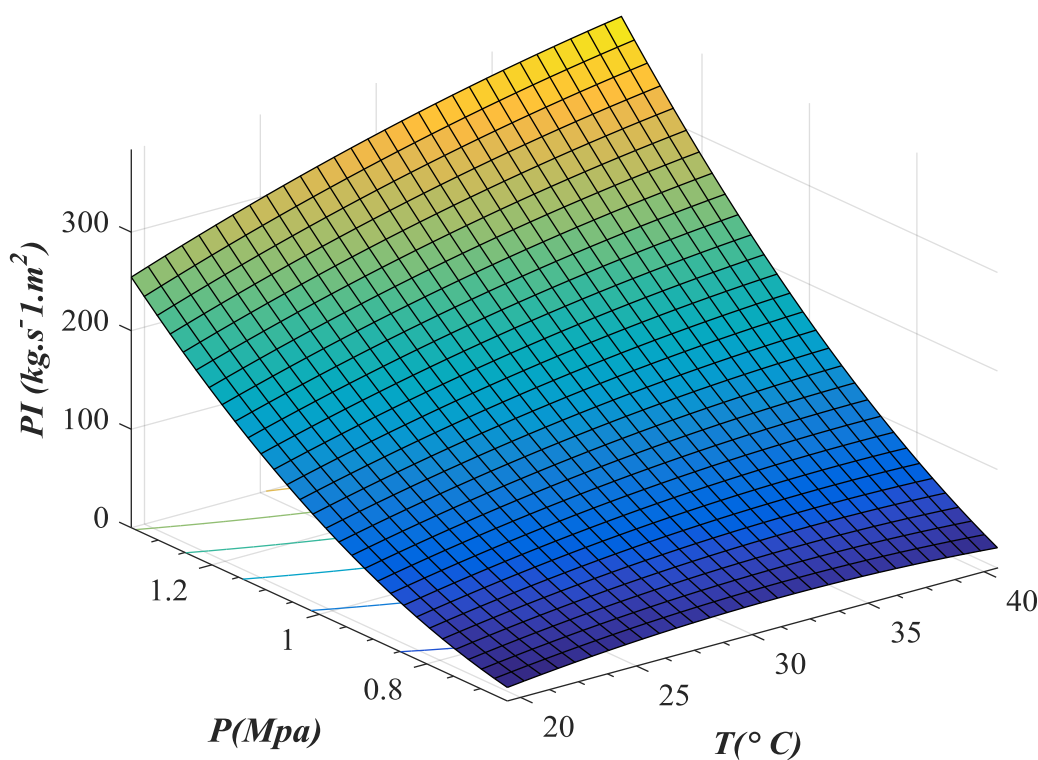
Decision variables				objective functions
C(g/L)	T(°C)	Q(L/h)	P(bar)	PI = PF × RE
5	37.5	215.5	12.5	598.1 × 10 <sup>5</sup>

در ادامه اثر تغییر متغیرهای مستقل (غلظت، دما، دبی و فشار) را بر شاخص کارایی ( $PI$ ) به کمک نمودارهای زیر بدست می‌آوریم.

مطابق شکل (۴-۲۰)، نتایج بدست آمده نشان داد افزایش دما و فشار خوراک، شاخص عملکرد  $PI$  را برای واحد اسمز معکوس افزایش می‌دهد. ولیکن اثر فشار در این مورد بسیار بیشتر از اثر دما است. (شیب افزایش شاخص عملکرد  $PI$ ، با افزایش فشار  $P$ ، زمانیکه که دما ثابت است نسبتاً بزرگ است)

افزایش دما، سبب کاهش ویسکوزیته سیال شده و اندکی نفوذ و خاصیت تراوش را

بهبود می‌بخشد بنابراین فلاکس شار با افزایش دما اندکی بهبود می‌یابد و شاخص  $PI$  افزایش می‌یابد. لازم بذکر است نتایج گراف زیر، به کمک شبکه عصبی بدست آمده است برای رسم نمودار زیر مقدار دو متغیر دیگر (غلظت نمک و دبی خوراک) ثابت فرض شد (در رسم نمودار مقدار غلظت نمک و دبی خوراک به صورت متو سط حد بالا و حد پایین در نظر گرفته شد ( $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$  و  $C_{ave}=20 \text{ g/L}$ ) و متغیر دما و فشار خوراک، در بازه مجاز خود تغییر داده شدند). مطابق نتایج بدست آمده اثر دما در فشارهای بالاتر بیشتر است.



شکل (۴-۲) اثر دما و فشار خوراک ورودی بر روی شاخص  $PI$  واحد اسمز معکوس پیلوت ( $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$  و  $C_{ave}=20 \text{ g/L}$ )

در ادامه اثر غلظت نمک خوراک و فشار ورودی بر روی شاخص عملکرد  $PI$  به کمک

شبکه عصبی بررسی شد. اثر غلظت نمک موجود در خوراک نزدیک به اثر فشار است افزایش

غلظت نمک خوراک سبب کاهش شاخص  $PI$  میشود در حالیکه افزایش فشار خوراک ورودی

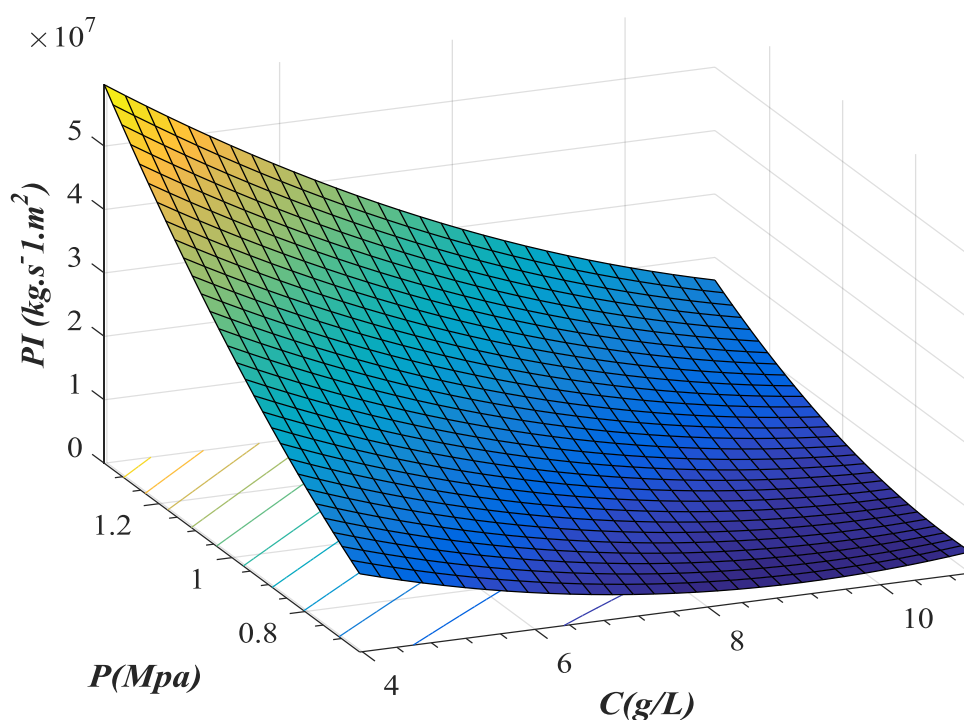
سبب بهبود شاخص عملکرد می‌گردد. (بدیهی است در فشارهای بالاتر فلاکس شار خروجی افزایش می‌یابد) بنابراین، سیستم RO در غلظت نمک کم و فشار بالا بهتر عمل می‌کند. لازم بذکر است در ترسیم نمودار زیر مقدار دبی و دما ثابت فرض شده است (  $T_{ave}=29.8$  و  $Q_{ave}=175$  L/h )

مطابق شکل زیر اثر فشار بر روی شاخص PI در غلظت‌های پایین‌تر نمک، بیشتر است.

به عبارت دیگر  $\left[ \frac{\partial(PI)}{\partial P} \right]_{C=4 \text{ g/L}} > \left[ \frac{\partial(PI)}{\partial P} \right]_{C=10 \text{ g/L}}$  از طرفی دیگر، اثر غلظت نمک

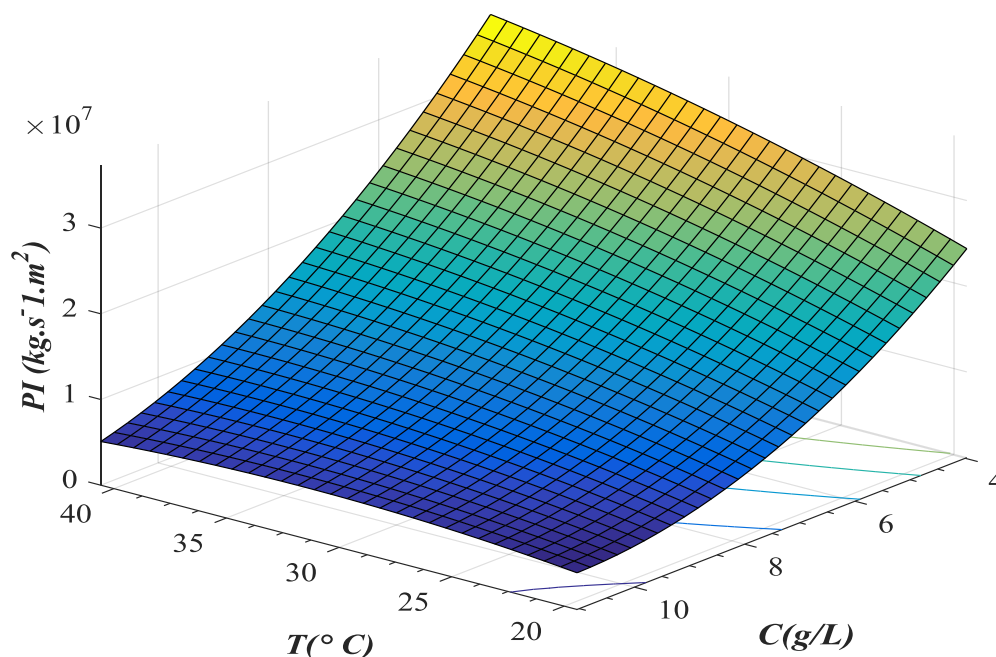
بر روی شاخص PI در فشارهای بالاتر، بیشتر است  $\left[ \frac{\partial(PI)}{\partial C} \right]_{P=1.4 \text{ Mpa}} >$

$$\left[ \frac{\partial(PI)}{\partial C} \right]_{P=0.6 \text{ Mpa}}$$



شکل (۴-۲۱) اثر غلظت و فشار خوراک ورودی بر روی شاخص PI واحد اسمز معکوس (  $T_{ave}=29.8$  C و  $Q_{ave}=175$  L/h )

مطابق شکل (۴-۲۲)، نتایج بدست آمده نشان داد افزایش دما شاخص عملکرد PI را برای واحد اسمز معکوس افزایش می دهد (افزایش دما سبب کاهش ویسکوزیته شده و خاصیت تراوشی افزایش یافته و شاخص PI بهبود پیدا می کند) از طرفی دیگر افزایش غلظت نمک سبب کاهش شاخص PI می گردد و اثر معکوس دارد. همانطور که در شکل زیر مشخص است اثر غلظت نمک بر روی شاخص PI، نسبت به اثر دما بر روی شاخص PI بیشتر است. (شیب کاهش شاخص عملکرد PI، با افزایش غلظت نمک، زمانیکه که دما ثابت است نسبتاً بزرگ است) نتایج گراف زیر، به کمک شبکه عصبی بدست آمده است برای رسم نمودار زیر مقدار دو متغیر دیگر (فشار و دبی خوراک) ثابت فرض شد (در رسم نمودار مقدار فشار و دبی خوراک بصورت متوسط حد بالا و حد پایین در نظر گرفته شد ( $P_{ave}=10 \text{ bar}$  و  $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$ ) و متغیر دما و غلظت نمک ددر خوراک، در بازه مجاز خود تغییر داده شدند). مطابق نتایج بدست آمده اثر دما در غلظت های پایین تر بیشتر است.



شکل (۴-۲۲) اثر دما و غلظت ورودی بر روی شاخص PI واحد اسمز معکوس پایلوت ( $P_{ave}=10 \text{ bar}$  و  $Q_{ave}=175 \text{ L/h}$ )

## فصل ۵:

### جمع بندی و ارائه پیشنهادات



## ۵-۱- جمع بندی

در این مطالعه، عملکرد پلنت‌های شیرین سازی اسمز معکوس<sup>۱</sup> با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به صورت عددی مطالعه گردید. در وهله اول یک مدل سازی عددی به کمک شبکه عصبی مصنوعی انجام گرفت تا دو متغیر فلاکس (PF) و درصد حذف نمک (RE) را تخمین زد. این مدل توسط داده های تست مورد بررسی قرار گرفت و صحت و توانایی این مدل در تخمین شار خروجی و درصد حذف نمک تایید شد. مدل شبکه عصبی یک مدل داده محور است بنابراین جهت ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی از ۶۲ داده تجربی در ۳ دسته آموزش صحنه سنجی و تست استفاده شد. (داده های بانک اطلاعاتی شامل ۴ ستون داده ورودی و ۲ ستون داده خروجی است. دما، فشار، داده های ورودی )

در گام بعدی به کمک ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، متغیر فلاکس (PF) و درصد حذف نمک (RE) به صورت توامان بهینه شدند. نتایج بهینه سازی در قالب جبهه پارتو و یک جدول ارائه شد. در این پژوهش منظور از بهینه سازی در واقع به حداکثر رساندن درصد حذف نمک (RE) و به حداکثر رساندن دبی آب تصفیه شده (PF) است.

## ۵-۲- جمع بندی

نتایج بدست آمده از مدل سازی و بهینه سازی دو هدفه به صورت خلاصه در زیر ارائه میگردد.

○ مدل سازی به کمک شبکه عصبی ، دارای مزایای زیادی، از جمله سادگی، دقت مطلوب،

<sup>1</sup>RO (Reverse Osmosis)

عمومیت پذیری و سرعت بالا می‌باشد مدل شبکه عصبی یک روش مناسب، برای مدل سازی سیستم‌های پیچیده، مانند فرآیندهای شیرین سازی به کمک روش اسمز معکوس است.

○ دقت پیش بینی به کمک شبکه عصبی مطلوب بوده خطای مدلسازی مقدار فلاکس خروجی به کمک مدل شبکه عصبی کمتر از  $6/6$  درصد بدست آمد نتایج نشان داد شبکه عصبی به خوبی قادر است دبی فلاکس خروجی (PF) را در یک شرایط بهره برداری تعیین شده (دما، فشار، دبی، غلظت نمک) تخمین بزند.

○ دقت پیش بینی به کمک شبکه عصبی مطلوب بوده خطای مدلسازی درصد حذف نمک به کمک مدل شبکه عصبی کمتر از  $2/2$  درصد بدست آمد نتایج نشان داد شبکه عصبی به خوبی قادر است درصد حذف نمک (RE) را در یک شرایط بهره برداری تعیین شده (دما، فشار، دبی، غلظت نمک) تخمین بزند.

○ ساختارهای مختلفی می‌توان برای شبکه عصبی متصور شد ولیکن ساختار بهینه ای که منجر به پایین ترین خطا شد یک ساختار با ۶ نرون در لایه پنهان است. ساختار بهینه شبکه عصبی به روش سعی و خطا انتخاب گردید

○ از داده های تست بمنظور بررسی عملکرد مدل استفاده شد. تعداد ۹ عدد داده تست بصورت رندوم از بانک اطلاعاتی انتخاب شد. میزان مربعات خطا (MSE) برای مدلسازی شار عبوری و درصد حذف به ترتیب  $12/4$  و  $0/19$  همچنین ضریب رگرسیون به ترتیب  $0/999$  و  $0/992$  بدست آمد. خطای میانگین مدلسازی شار عبوری و درصد حذف نمک به ترتیب  $6/6\%$  و  $2/2\%$  بدست آمد.

○ دو تابع هدف مساله (فلاکس خروجی و درصد حذف نمک) با یکدیگر در تضاد هستند و

بهبود در مقدار یکی، سبب نامطلوب شدن تابع هدف دیگری می شود بنابراین لازم است تا یک بهینه سازی دو هدفه انجام گیرد تا بطور همزمان هر دو تابع هدف بهینه گردد. جبهه‌ی پارتو برای شار خروجی PF و درصد حذف RE رسم گردید. این جبهه، بهینه ترین حالت ممکن را برای پلنت شیرین سازی به روش اسمز معکوس ارائه میکند

○ مقدار فلاکس شار و درصد حذف در یکدیگر ادغام شد و یک شاخص کارایی برای عملکرد واحد اسمز معکوس تعریف شد  $(PI = PF(\frac{kg}{m^2h}) \times RE(\%))$  مقادیر حداکثر شاخص کارایی به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آمد  $(PI_{max} = 598.1 \times 10^5)$  که به ازای غلظت نمک ۵ g/L و دمای ۳۷/۵ °C و دبی ۲۱۵/۵ L/h و فشار ۱۲/۵ bar به حداکثر مقدار این شاخص PI دست پیدا خواهیم کرد

○ نتایج بدست آمده نشان داد افزایش دما و فشار خوراک، شاخص عملکرد PI را برای واحد اسمز معکوس افزایش می دهد. ولیکن اثر فشار در این مورد بسیار بیشتر از اثر دما است. (شیب افزایش شاخص عملکرد PI، با افزایش فشار P، زمانیکه که دما ثابت است نسبتاً بزرگ است)

○ افزایش دما، سبب کاهش ویسکوزیته سیال شده و اندکی نفوذ و خاصیت تراوش را بهبود می بخشد بنابراین فلاکس شار با افزایش دما اندکی بهبود می یابد و شاخص PI افزایش می یابد. لازم بذکر مطابق نتایج بدست آمده اثر دما در فشارهای بالاتر بیشتر است.

○ نتایج نشان داد اثر غلظت نمک موجود در خوراک نزدیک به اثر فشار است افزایش غلظت نمک خوراک سبب کاهش شاخص PI میشود در حالیکه افزایش فشار خوراک ورودی سبب بهبود شاخص عملکرد میگردد. (بدیهی است در فشارهای بالاتر فلاکس شار خروجی افزایش

- می یابد) بنابراین، سیستم RO در غلظت نمک کم و فشار بالا بهتر عمل می کند
- اثر فشار بر روی شاخص PI در غلظت های پایین تر نمک، بیشتر است. به عبارت دیگر
- $$\left(\left[\frac{\partial(PI)}{\partial P}\right]_{C=4 \text{ g/L}} > \left[\frac{\partial(PI)}{\partial P}\right]_{C=10 \text{ g/L}}\right)$$
- از طرفی دیگر، اثر غلظت نمک بر روی شاخص
- $$\left(\left[\frac{\partial(PI)}{\partial C}\right]_{P=1.4 \text{ Mpa}} > \left[\frac{\partial(PI)}{\partial C}\right]_{P=0.6 \text{ Mpa}}\right)$$
- PI در فشارهای بالاتر، بیشتر است
- نتایج بدست آمده نشان داد افزایش غلظت نمک سبب کاهش شاخص PI می گردد و اثر معکوس دارد. اثر غلظت نمک بر روی شاخص PI، نسبت به اثر دما بر روی شاخص PI بیشتر است. (شیب کاهش شاخص عملکرد PI، با افزایش غلظت نمک، زمانیکه که دما ثابت است نسبتاً بزرگ است) مطابق نتایج اثر دما در غلظت های نمک پایینتر، بیشتر است

### ۵-۳- پیشنهادات برای آیند

- جهت ارتقا کمی و کیفی این پژوهش، موارد زیر بصورت خلاصه ارائه می گردد
- استفاده از دیگر مدل های هوش مصنوعی مانند انفیس (ترکیب مدل فازی لاجیک و شبکه عصبی) جهت پیش بینی توابع هدف شار خروجی و درصد حذف نمک
  - اضافه کردن متغیرهای ورودی به جز ۴ متغیر بحث شده در این پژوهش (به عنوان مثال اضافه کردن، TDS، و PH)
  - افزایش تعداد نمونه ها جهت بالا بردن دقت شبکه عصبی (شبکه عصبی یک مدل داده محور است بنابراین هر اندازه از یک بانک اطلاعاتی قویتری استفاده شود دقت پیش بینی بالاتر خواهد بود)
  - بکارگیری مدل هوشمند بردارهای پشتیبان ماشین به جای شبکه عصبی جهت پیش بینی شار و

## درصد حذف

- استفاده از الگوریتم بهینه سازی کوچ پرندکان و الگوریتم کلونی مورچگان جهت بهینه سازی توابع هدف شار و مقاومت
- شبیه سازی فیلتر UF به کمک نرم افزار فلوئنت و کام سول و مقایسه نتایج خروجی ما مدل های داده محور مانند شبکه عصبی

## مراجع

- [۱] Demuth, H. and Beale, M., 1992. Neural Network Toolbox. For Use with MATLAB. The MathWorks Inc, 2000.
- [۲] Arbib, M.A. ed., 2003. The handbook of brain theory and neural networks. MIT press.
- [۳] Mitchell, M., 1998. An Introduction to Genetic Algorithms. Published by: A Bradford Book, 221 p.
- [۴] Holland, J.H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press (Ann Arbor).
- [۵] Reformat, M., 1997. Application of Genetic Algorithms in Control Design for Advanced Static VAR Compensator at ac/dc Interconnection. University of Manitoba Press, 129 p.
- [۶] Milidiu, R.L., Duarte, J.C., Santos, C.N., 2007. Evolutionary TBL template generation, J. Braz. Comp. Soc., Vol. 13, No. 4, pp. 39-50.
- [9] Degremont, 1991, Water Treatment Handbook, 6th ed., volumes 1&2, Lavoisier publishing France.
- [10] Everett, D.H., 1974, Fundamentals of Water Desalination, Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- [11] Nguyen Cong Thanh, 2000, Water Quality Criteria & Standards, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [12] Mallevalle, J., P.E., Odendaal, M.R., Wiesner, 1996, Water Treatment Membrane Processes, AWWA, McGraw-Hill, Water Research Commission of South Africa.
- ۱- شیر، مجتبی، مدلسازی فرآیند اسمز معکوس با استفاده از شبکه عصبی و بهینه سازی آن توسط الگوریتم ژنتیک، پایان نامه ، فوق لیسانس، چاپ نشده دانشگاه رازی، شهرپور ۱۳۸۹
  - ۲- حسین پور، محمد حسین، همدان، همایش ملی پژوهش های محیط زیست ایران ، دانشگاه شهید مفتح ، ۱۳۹۲.
  - ۳- مرادی ، علی ، تهران، همایش و نمایشگاه تخصصی محیط زیست انرژی و صنعت پاک ، ۱۳۹۲.
  - ۴- سلامی شهید، اسماعیل ، تهران، همایش تخصصی نمک زدایی آبهای شور لب شور و تصفیه پساب، دانشگاه صنعت آب و برق ، ۱۳۹۱.
  - ۵- علی پور، میکائیل، ۱۳۹۶، فناوری های نوین در تصفیه آب و پساب، انتشارات پادینا، تهران.
  - ۶- ادیب فر، اکبر؛ ۱۳۸۹؛ شیرین سازی آب، مبانی و روش ها؛ انتشارات پندار پارس؛ شرکت مدیریت پروژه های نیروگاهی ایران (مپنا)
  - ۷- بایرن، وس؛ خاکسار، مجید (مترجم)؛ ۱۳۸۳؛ تئوری اسمز معکوس ؛ چاپ اول ؛ انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی
  - ۸- بیکر، ریچارد، مقدسی، عبدالرضا ( مترجم)، ۱۳۹۶، فناوری غشایی و کاربردهای آن، چاپ اول، انتشارات دانشگاه اراک .
  - ۹- جمشیدی، نیما، ۱۳۸۷، راهنمای کاربردی متلب، چاپ چهارم، انتشارات عابد مهرگان قلم، تهران.
  - ۱۰- کیا، سید مصطفی، ۱۳۹۳، محاسبات نرم در متلب، چاپ سوم، انتشارات دانشگاهی کیان، تهران.

پیوست ها



پیوست (۱-۱) داده‌های واقعی برای مدلسازی در شبکه عصبی

واحد/ردیف	C	T	Q	P	RE	PF
	g/L	C	L/h	Bar	%	kg/m2h
1	3.97	19.43	227.9	0.65	92.5	83.1
2	7.5	37.5	137.5	1.25	95.6	322.7
3	10	30	212.5	0.75	66.4	34.1
4	3.97	19.43	175	1	97.9	248
5	7.5	37.5	227.9	0.65	74.7	28.9
6	10	37.5	212.5	1.35	93.6	251.8
7	3.97	19.43	137.5	0.65	91.1	78.4
8	5	37.5	175	1.35	94.6	577.4
9	10	19.43	227.9	1	81.9	51.7
10	5	30	212.5	1	98	268.7
11	7.5	22.5	175	0.75	81.5	46.4
12	7.5	22.5	175	0.65	74.5	30
13	10	22.5	137.5	1	83.2	64.3
14	10	30	227.9	1.35	93.6	220.7
15	7.5	37.5	227.9	0.75	79.4	62.2
16	3.97	40.58	137.5	0.65	89.5	150
17	3.97	40.58	175	1.35	92.7	686.3
18	10	30	212.5	1.25	91.2	169.5
19	7.5	30	212.5	0.65	73.3	35.2
20	3.97	40.58	137.5	0.65	88.2	149.9
21	3.97	30	212.5	1	97.6	336.4
22	11.04	40.58	137.5	0.65	51.8	10.3
23	7.5	30	212.5	1.25	96.4	278.4
24	3.97	19.43	227.9	1	99.4	252.8
25	11.04	40.58	175	0.65	51.5	7.3
26	10	19.43	175	0.65	59.2	35.5
27	5	37.5	175	0.75	89	154.1
28	7.5	40.58	212.5	1.35	94.8	398.1
29	5	19.43	212.5	1.25	97.1	364.7
30	7.5	22.5	212.5	1.25	95.6	238.3
31	10	19.43	227.9	0.75	67.3	26.2
32	10	19.43	212.5	0.65	58.8	29.5

33	7.5	19.43	227.9	1.25	94.8	210.5
34	3.97	40.58	175	0.65	88.7	155.8
35	3.97	37.5	175	0.65	88.7	149.6
36	5	30	227.9	1.25	97.6	442.2
37	3.97	40.58	227.9	1.35	94.2	693.4
38	5	22.5	175	1.25	95.1	385.1
39	7.5	19.43	175	1.25	96	215.1
40	10	40.58	175	0.75	65.5	21.5
41	3.97	37.5	137.5	0.65	90.4	148.3
42	10	30	137.5	1	82.5	86.4
43	10	19.43	137.5	1	83.8	53.7
44	10	40.58	212.5	1.35	91.8	251.5
45	3.97	19.43	137.5	0.65	92.7	75.8
46	7.5	22.5	212.5	1	91.4	117.5
47	3.97	30	175	1.35	92.6	612.6
48	11.04	37.5	137.5	1.25	88.2	153.9
49	11.04	22.5	212.5	1.25	88.6	110.9
50	11.04	40.58	175	0.65	50.1	7.4
51	5	30	212.5	0.65	86.7	96.3
52	3.97	37.5	212.5	0.75	95.2	204
53	3.97	37.5	137.5	1.25	94.8	578
54	5	19.43	212.5	0.65	87.8	56.1
55	5	40.58	175	1.25	95.1	520.3
56	3.97	19.43	137.5	0.65	92.2	78
57	5	30	137.5	0.65	85.6	91.4
58	5	37.5	175	1.35	94.4	576.1
59	7.5	22.5	227.9	1.25	96.4	233.7
60	3.97	30	175	1.35	93.7	629.3
61	7.5	37.5	137.5	0.75	79.7	68.9
62	3.97	19.43	175	1	98.8	258

## **Abstract:**

In this study, the effect of reverse osmosis desalination plants was studied numerically using artificial neural network method. Then the function of this unit was optimized using the genetic algorithm. Two variables of flux (PF) and salt removal percentage (RE) were selected as output variables and feed temperature, salt concentration in feed, feed flow and feed pressure were selected as independent variables. For constructing artificial neural network model, 62 experimental data were used in 3 accreditation and testing training groups. The results showed that the prediction accuracy is favorable when the neural network is used, and the magnitude of the mean square error (MSE) for the modeling of the flux and the percentage of the removal is 12.4 and 0.19 respectively. The regression coefficient was also obtained 0.999 and 0.992, respectively. the mean error of flux model and percentage of salt removal was 6.6% and 2.2%, respectively. The two-objective optimization results show that the two objective functions (output flux and percentage of salt removal) are in conflict with each other. The Pareto front was drawn for the flux (PF) output and percentage (RE) of removal). This front provides the most optimal possible way for a reverse osmosis desalination plants. Then the amount of flux and the removal percentage were merged and an efficiency indicator for the reverse osmosis unit was defined ( $PI = PF \text{ (kg / (m}^2 \text{ h))} \times RE \text{ (\%)}$ ).

Maximum values for efficiency indexes were obtained using the genetic algorithm ( $PI \text{ max} = 598.1 \times 105$ ), which is obtained for the salt concentration of 5(g/l), temperature 37/5(c), flow rate 215/5 (L/H) and maximum pressure 12/5 (bar) to the maximum values of this index. The results showed that the increase in feed temperature and pressure increased the PI performance index for a reverse osmosis unit, but the effect of pressure in this case was much higher than the effect of temperature. the temperature increase reduces the viscosity of the fluid and improves the penetration and leakage properties, so the flux increases slightly with increasing temperature and therefore the PI index goes up. It should be noted that according to results, the effect of temperature is higher at higher pressures. The results also indicated that the effect of salt concentration in the feed is close to the effect of the pressure, and the fact the increase in the salt concentration of feed leads to a decreases in the PI index.

**keywords:** Reverse Osmosis desalination Plant - Neural Network - Genetic Algorithm - modeling



**Energy Institute For Higher Education**  
**Faculty Of Engineering**  
**Department Of Mechanical Engineering – Energy Conversion**  
**Thesis For**  
**Degree Of Master Of Science ( M.Sc )**

**Title:**  
**Purity Prediction and Investing Parameters**  
**Affecting Reverse Osmosis Water Treatment**  
**Using Artificial Neural Network and Genetic**  
**Algorithms**

**Supervisor:**  
**Arezoo ghfari**

**Advisor:**  
**Heydar madah**

**By:**  
**Mickail alipour**

October/2018