# A Design Algorithm for the Water Treatment by Electrode Ionization Method

*Attarchi, M.F.(M.Sc.) Fallah, N.(M.Sc.)*

*MATN Co., Industrial Processes Planning Department*

**Abstract**

In this paper at first, the effective design parameters in a water treatment are presented by electrode ionization method. Nominal capacity, feed water characteristics, product quality and nominal recovery are as the most effective design parameters in an EDI system are used by designer as basic design parameters. Other effective design parameters in an EDI system are staging, cell pair number, spacer characteristics, membranes and electrodes dimensions, ion exchange resins characteristics and pressure drop in compartments. After description of the effective design parameters, the design algorithm of an EDI system described.

# ارائه الگوریتم طراحی سیستم تصفیه آب به روش یون‌زدایی الکتریکی (EDI)

(دریافت ۸۱/۸/۱۶ پذیرش ۸۲/۱/۲۱)

میرفرید عطارچی* ناصر فلاح*

**چکیده**

**در این مقاله ابتدا عوامل موثر در طراحی یک سیستم تصفیه آب به روش یون‌زدایی الکتریکی (EDI) تشریح می‌گردد. از مهم‌ترین عوامل اولیه موثر در طراحی یک سیستم EDI، ظرفیت مورد نیاز سیستم، خصوصیات آب ورودی به سیستم، کیفیت آب خروجی از سیستم و میزان بازیابی اسمی مورد نیاز می‌باشند، که در واقع طراحی با توجه به اطلاعات فوق پایه‌گذاری می‌شود. از دیگر عوامل موثر در طراحی یک سیستم EDI می‌توان به نحوه مرحله‌بندی، تعداد جفت سل‌ها، مشخصات جداکننده‌ها، ابعاد غشاها، ابعاد الکترودها، مشخصات رزین‌های تعویض یونی، افت فشار در محفظه‌ها و ... اشاره نمود. پس از تشریح عوامل موثر در طراحی، ارتباط بین این عوامل به وسیله الگوریتم‌های طراحی، مشخص می‌گردد.**

**واژه‌های کلیدی : یون‌زدایی الکتریکی[1]- استاک[2]- جداکننده[3]- غشا**

## مقدمه

طراحی فرآیندهایی نظیر یک فرایند تصفیه آب، مستلزم در اختیار داشتن روش‌های از پیش تعیین شده طراحی می‌باشد. این روش‌ها توسط مراجع معتبر و براساس سال‌ها مطالعات تئوریک و تجربی ارائه شده‌اند. طراحان مختلف، با در اختیار داشتن اطلاعات لازم، می‌توانند به سادگی از روش‌های مذکور استفاده نموده و پارامترهای طراحی فرآیند را به دست آورند. بدیهی است که در روش‌های ارائه شده طراحی، پارامترهایی وجود دارند که از مطالعات تجربی به دست آمده و به عنوان اعداد ثابت یا محدوده‌ای از اعداد عرضه شده و در طراحی تجهیزات مورد استفاده واقع می‌شوند [۱].

در فرآیندهای نوین نظیر تصفیه آب به روش یون‌زدایی الکتریکی (EDI)، هر چند طراحی سیستم براساس تعیین پارامترهای هیدرولیکی و الکتروشیمیایی انجام می‌شود، و در این رابطه می‌توان مطالعات تئوریک انجام داد، ولی منابع منتشره از سوی سازندگان تجهیزات مربوطه نه تنها فاقد روش‌های طراحی بوده، بلکه پارامترهای مبتنی بر مطالعات تجربی را نیز در بر ندارند. به این دلیل پس از طراحی تفصیلی فرایند EDI براساس منابع تئوریک و نیز منابع به دست آمده از سازندگان، می‌بایست نتایج حاصله را به وسیله مطالعات تجربی مورد ارزیابی قرار داد [۱]. لازم به ذکر است طراحی تفصیلی سیستم EDI با یک استاک منفرد، که در بخش طرح‌ریزی فرآیندهای صنعتی شرکت متن انجام شده است، هم اکنون به وسیله مطالعات تجربی در حال ارزیابی می‌باشد.

* شرکت متن- بخش طرح‌ریزی فرآیندهای صنعتی

[1] Electrodeionization
[2] Stack
[3] Spacer



**سیستم EDI و کاربرد آن در تصفیه آب نیروگاه‌ها**

در حالی که سیستم تصفیه آب برای نیروگاه‌های بخاری، به صورت سنتی، براساس فناوری تعویض یون بنا شده است، تولیدکنندگان نیرو به منظور تهیه آبی با کیفیت پایدار، که همیشه با وجود سیستم‌های احیای ستون‌های تعویض یونی قابل تأمین نمی‌باشند، به دنبال جایگزین‌هایی برای روش یون‌زدایی بوده‌اند. هدف از این جایگزینی، کاهش یا حذف کاربرد مواد شیمیایی و عملیات دفع آن‌ها در بهره‌برداری و نیز کاهش نیروی انسانی مورد نیاز و هزینه‌های نگهداری است. روش ترکیبی یون‌زدایی الکتریکی (EDI)، به عنوان یک جایگزین امیدبخش برای نیل به اهداف مذکور مطرح شده است. در روش ترکیبی یون‌زدایی الکتریکی، که یک فرآیند یون‌زدایی پیوسته می‌باشد، به منظور تولید آب با خلوص بالا و بی‌نهایت پایدار، بدون نیاز به مواد شیمیایی، از کاربرد مرکب غشاهای الکترودیالیز و رزین‌های مختلط تعویض یونی در یک مجموعه واحد که تحت نیروی الکتریکی قرار دارد، استفاده می‌گردد. این روش در صنایع تولید نیرو که دارای بیشترین مصرف رزین‌های تعویض یونی برای تصفیه آب می‌باشند، به میزان قابل ملاحظه‌ای مورد قبول واقع شده است، به طوری که هم اکنون در برخی نیروگاه‌های آمریکا و کشورهای اروپایی از سیستم مذکور استفاده به عمل آمده و نتایج حاصله بنا به ادعای بهره‌برداران آن‌ها رضایت‌بخش بوده است [۲].

## عوامل مؤثر در طراحی یک سیستم EDI

تجهیزات یک سیستم EDI، به طور کلی شامل استاک[1]، منبع نیرو، یکسو کننده، پمپ و ... می‌باشند. از مهم‌ترین عوامل موثر در طراحی یک سیستم EDI، می‌توان به ظرفیت مورد نیاز سیستم، خصوصیات آب ورودی به سیستم، کیفیت آب مورد نیاز خروجی از سیستم، میزان بازیابی اسمی مورد نیاز سیستم، نحوه مرحله‌بندی، تعداد جفت سل‌ها، مشخصات جداکننده‌ها، ابعاد غشاها، ابعاد الکترودها، مشخصات رزین‌های تعویض یونی، افت فشار در محفظه‌ها و ... اشاره نمود [۱] که در این مقاله عوامل فوق توضیح داده شده‌اند.

[1] استاک شامل مجموعه‌ای از غشاها، رزین‌ها، جداکننده‌ها و الکترودها بوده که فرآیند خالص‌سازی آب در آن صورت می‌گیرد.

### ظرفیت مورد نیاز

از آنجا که بر اثر عبور آب از یک استاک EDI، بیش از ۹۹درصد مواد معدنی حذف می‌شوند، لذا در یک سیستم EDI، از چندین استاک که عموماً به صورت موازی قرار داده می‌شوند، استفاده به عمل آمده و بنابراین برای طراحی یک سیستم با ظرفیت مورد نیاز، می‌توان با استفاده از تعداد معینی از استاک‌ها، ظرفیت مورد نظر را حاصل نمود [۱].

### خصوصیات آب ورودی و کیفیت آب مورد نیاز خروجی

بررسی‌های انجام شده نشان داده است که آب خوراک ورودی به یک سیستم EDI، عموماً باید خروجی از یک سیستم اسمز معکوس و یا آبی با خصوصیات معادل آن باشد. لازم به توضیح است که به منظور تولید آب با کیفیتی معادل با محدوده مقاومت الکتریکی ۱-۱۸Mohm-cm، باید هدایت الکتریکی آب خوراک حداکثر حدود ۶۰μS/cm باشد [۱، ۳ و ۴].

### بازیابی اسمی مورد نیاز

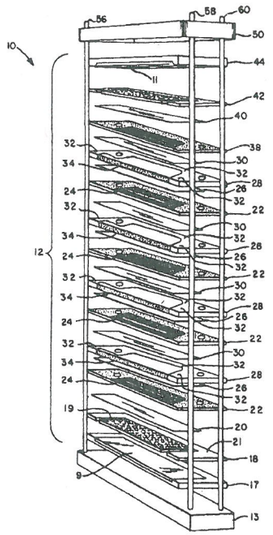
بازیابی اسمی در یک سیستم EDI، بیانگر نسبت آب خالص تصفیه شده، به مقدار کل آب ورودی به سیستم بوده که عموماً در محدوده ۹۰ الی ۹۵ درصد می‌باشد [۱].

### مرحله‌بندی

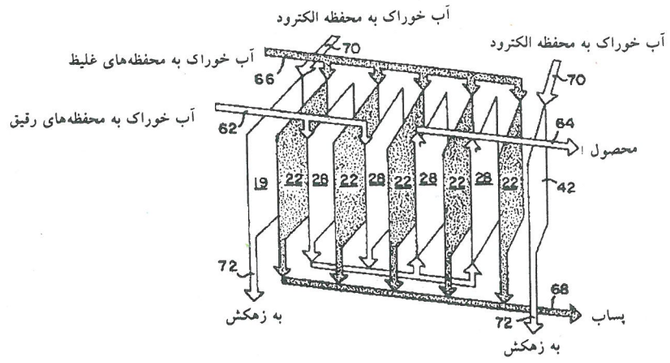
روشی که یک استاک آرایش داده می‌شود، مرحله‌بندی نامیده می‌شود. هدف از مرحله‌بندی تأمین سطح کافی از غشاها و زمان اقامت مناسب برای حذف درصد مشخصی املاح از آب می‌باشد. مرحله‌بندی در یک استاک شامل دو نوع مرحله‌بندی هیدرولیکی و الکتریکی است [۱].

#### الف- مرحله‌بندی هیدرولیکی

هر دسته از جفت سل‌ها که ورود آب مورد تصفیه به آن‌ها به صورت همزمان می‌باشد، یک مرحله هیدرولیکی نامیده می‌شود. استاک EDI نشان داده شده در شکل ۱،




**شکل ۱- نمایی از یک استاک EDI شامل یک مرحله الکتریکی و دو مرحله هیدرولیکی [۱].**



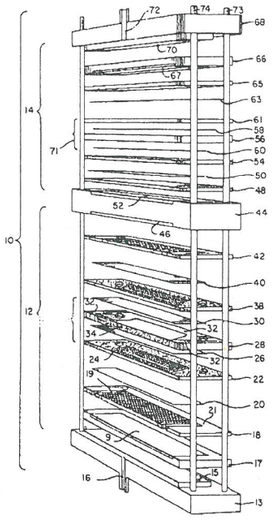

**شکل ۲- نحوه عبور جریان آب در یک استاک EDI شامل یک مرحله الکتریکی و دو مرحله هیدرولیکی [۱].**

دارای یک مرحله الکتریکی ۱۲ و دو مرحله هیدرولیکی بوده که مسیر جریان آب در داخل محفظه‌های مختلف در دو مرحله هیدرولیکی فوق، مطابق شکل ۲ می‌باشد [۱].

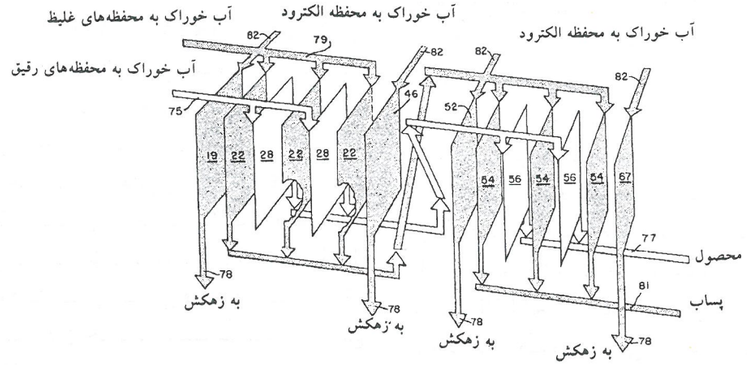
**ب- مرحله‌بندی الکتریکی**

هر مرحله الکتریکی، دارای یک الکترود آند و یک الکترود کاتد است. بنابراین مرحله‌بندی الکتریکی با قرار دادن جفت الکترودهای اضافی در یک استاک به وجود می‌آید که قابلیت انعطاف زیادی در طراحی سیستم ایجاد می‌نماید. با مرحله‌بندی الکتریکی هم‌چنین می‌توان برای هر مرحله الکتریکی، جریان الکتریکی مستقلی برای جفت سل‌ها به کار برد. استاک EDI نشان داده شده در شکل ۳، دارای دو مرحله الکتریکی ۱۲ و ۱۴ و دو مرحله هیدرولیکی بوده که مسیر جریان آب در داخل محفظه‌های مختلف در هر مرحله، مطابق شکل ٤ است [۱].






**شکل ۳- نمایی از یک استاک EDI شامل دو مرحله الکتریکی و دو مرحله هیدرولیکی [۱].**




**شکل ٤- نحوه عبور جریان آب در یک استاک EDI شامل دو مرحله الکتریکی و دو مرحله هیدرولیکی [۱].**

**تعداد جفت سل‌ها**

مطابق شکل ۱، هر بخش تکراری در استاک EDI، شامل غشای کاتیونی ۲۶، جداکننده جریان رقیق ۲۸، غشای آنیونی ۳۰ و جداکننده جریان غلیظ ۲۲، یک جفت سل نامیده می‌شود. آب برای خالص‌سازی باید حداقل از میان یک جفت سل عبور داده شود. در حالت تجاری یک استاک EDI، عموماً شامل ۵۰ الی ۲۰۰ جفت سل می‌باشد [۱].

**جداکننده‌ها**

جداکننده‌ها به منظور تشکیل مسیرهای جریان غلیظ و رقیق بین غشاهای کاتیونی و آنیونی در یک استاک قرار داده می‌شوند. مطابق شکل ۱ انواع جداکننده‌ها در یک سیستم EDI، شامل جداکننده جریان غلیظ ۲۲، جداکننده جریان رقیق ۲۸ و جداکننده الکترود ۱۸ می‌باشند. لازم به توضیح است

که طراحی جداکننده‌ها، یکی از پارامترهای مهم در طراحی یک استاک است [۱].

**غشاها**

مطابق شکل ۱، انواع غشاها در یک سیستم EDI، شامل غشاهای آنیونی ۳۰، کاتیونی ۲۶ و کاتیونی سنگین ۴۰ می‌باشند. غشاهای آنیونی فوق، یک نوع رزین تعویض آنیونی که به صورت صفحه تهیه شده‌اند، می‌باشند. این غشاها، آنیون‌ها را عبور داده و کاتیون‌ها را دفع می‌نمایند. غشاهای کاتیونی فوق نیز، یک نوع رزین تعویض کاتیونی که به صورت صفحه تهیه شده‌اند، می‌باشند. این غشاها کاتیون‌ها را عبور داده و آنیون‌ها را دفع می‌نمایند. غشاهای کاتیونی سنگین همه خصوصیات غشاهای کاتیونی معمولی را دارند، اما ضخامت آن‌ها حدود ۲ برابر ضخامت غشای کاتیونی معمولی بوده و در محفظه‌های الکترود و در مراحل میانی به کار برده می‌شوند [۱].

**الکترودها**

یک سیستم EDI مطابق شکل ۱، دارای یک الکترود کاتد ۹ و آند ۱۱ می‌باشد. از آنجا که الکترودها ممکن است در معرض شرایط خورنده قرار گیرند و در نتیجه اکسیداسیون یا تجزیه الکترود، شدیداً باعث تخریب و کاهش راندمان آن گردد، لذا با استفاده از الکترودهای با جنس مناسب، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در یک سیستم EDI، عموماً الکترود کاتد از جنس فولاد ضد زنگ (۳۱۶SS) و الکترود از جنس تیتانیم با روکش پلاتین‌می‌باشد [۱].

**رزین‌های تعویض یونی**

در محفظه‌های رقیق مطابق شکل ۱، مخلوطی از دانه‌های رزین تعویض آنیونی و کاتیونی ۳۴ در داخل یک فضای میانی، بین غشاهای کاتیونی ۲۶ و آنیونی ۳۰ قرار داده می‌شوند. با توجه به این که هدف، تولید آب با خلوص بالا می‌باشد، حذف هم‌زمان آنیون‌ها و کاتیون‌ها باید مورد نظر قرار گیرد. لذا از مخلوطی از رزین‌های تعویض آنیونی و کاتیونی استفاده می‌شود. وقتی دانه‌های رزین تعویض آنیونی و کاتیونی قوی به کار برده می‌شود، نسبت حجمی دانه‌های رزین تعویض آنیونی به دانه‌های رزین تعویض کاتیونی، عموماً حدود ۳ به ۲ است [۱].

**افت فشار**

افت فشار جریان رقیق و غلیظ یک استاک EDI، به ترتیب، تفاضل فشار خروجی جریان رقیق و فشار خوراک جریان رقیق، و تفاضل فشار خروجی جریان غلیظ و فشار خوراک جریان غلیظ است. هم‌چنین افت فشار بین غشایی در ورودی و خروجی‌ها نیز، به ترتیب، تفاضل فشار ورودی جریان غلیظ و فشار ورودی جریان رقیق، و تفاضل فشار خروجی جریان غلیظ و فشار خروجی جریان رقیق است که به منظور اطمینان از عدم نشتی غشا و در نتیجه، آلودگی جریان محصول، فشار جریان خوراک محصول در تمام نقاط باید از فشار جریان غلیظ بیشتر باشد [۱ و ۵].

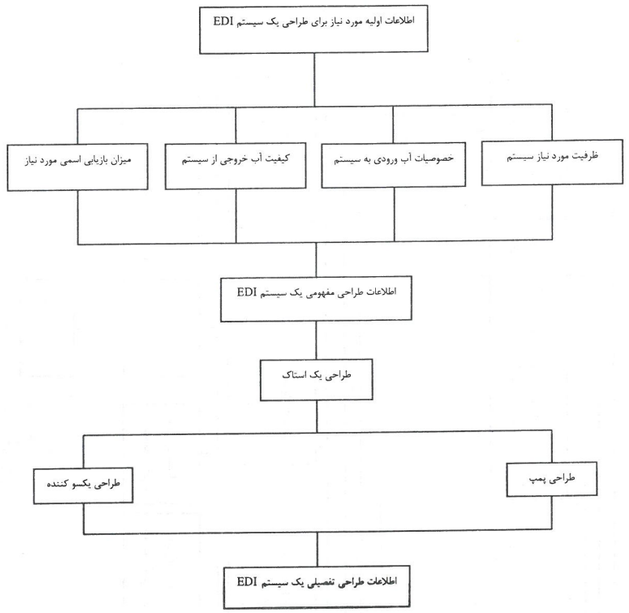
## الگوریتم طراحی یک سیستم EDI

سیستم‌های EDI برای کاربرد و رفع نیازهای خاصی طراحی می‌شوند. طراحی یک سیستم EDI مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵، براساس ظرفیت مورد نیاز سیستم، خصوصیات آب ورودی به سیستم، کیفیت آب مورد نیاز خروجی از سیستم و میزان بازیابی اسمی مورد نیاز، پایه‌گذاری می‌شود. با توجه به اطلاعات فوق، ابتدا طراحی مفهومی یک سیستم EDI انجام شده و سپس با تکیه بر اطلاعات به دست آمده، طراحی تفصیلی آن انجام می‌گیرد. مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵، طراحی تفصیلی یک سیستم EDI، با توجه به اطلاعات به دست آمده از طراحی مفهومی، با طراحی استاک شروع شده و سپس طراحی پمپ و یکسو کننده انجام می‌گیرد [۱].

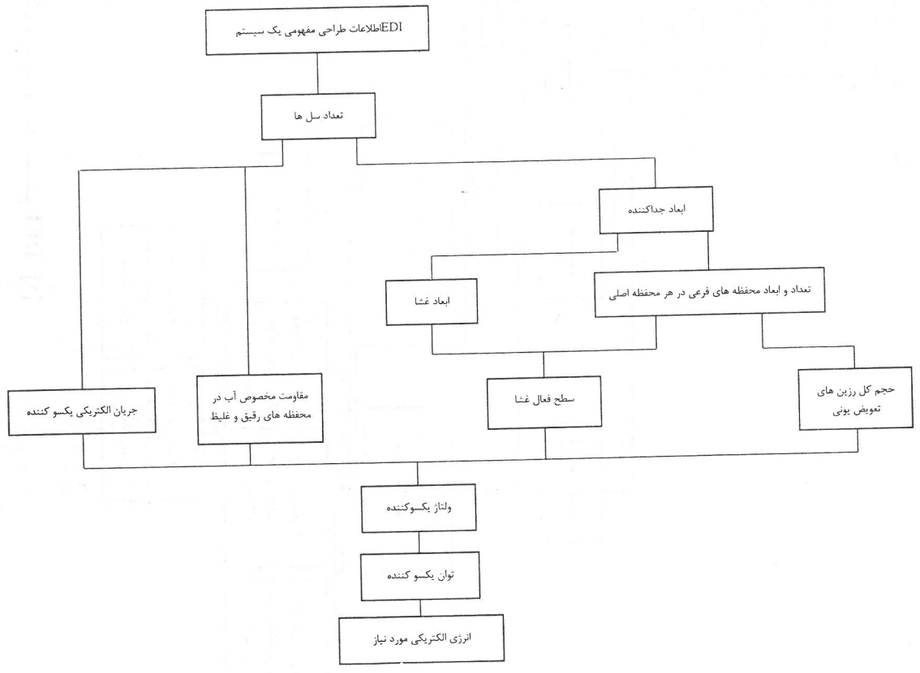
## الگوریتم طراحی تفصیلی یک استاک EDI

طراحی یک استاک EDI، یکی از مراحل مهم طراحی یک سیستم EDI می‌باشد. مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل ٦، طراحی تفصیلی یک استاک EDI، با نحوه مرحله‌بندی استاک (تعداد

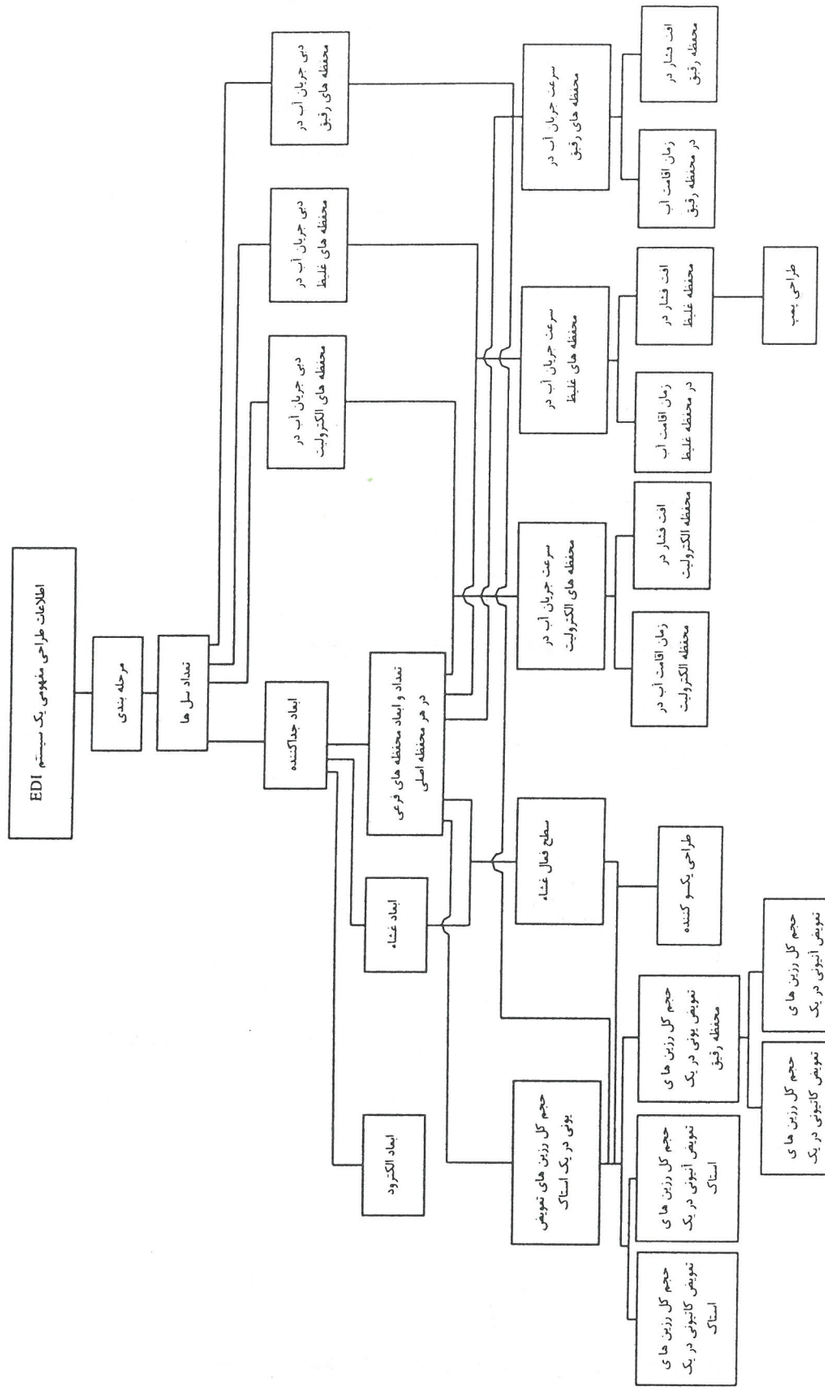





**شکل ۵- الگوریتم کلی طراحی یک سیستم EDI [۱].**




**شکل ٦- الگوریتم کلی طراحی تفضیلی یک سیستم.**




شکل ۷- الگوریتم طراحی تفضیلی یک استاک در یک سیستم DEI [۱].



مراحل الکتریکی و هیدرولیکی) شروع شده که در هر یک از مراحل، باید تعداد جفت سل‌ها تعیین شوند. طراحی جداکننده‌ها نیز یکی از عوامل مهم در طراحی استاک بوده که توجه به تعداد و ابعاد محفظه‌های فرعی در آن‌ها بسیار با اهمیت است. با توجه به اطلاعات فوق، ابعاد غشاها و هم‌چنین سطح فعال آن‌ها به دست می‌آیند و در نتیجه می‌توان حجم کل رزین‌های تعویض یونی در یک استاک، افت فشار در محفظه‌ها، زمان اقامت آب در محفظه‌ها، مشخصات یکسو کننده‌ها و پمپ را مشخص نمود [۱].

## الگوریتم طراحی تفصیلی یکسو کننده

مطابق شکل ۷، در طراحی یکسو کننده، با توجه به اطلاعات طراحی مفهومی و تعداد جفت سل‌های تعیین شده، می‌توان جریان الکتریکی مورد نیاز یکسو کننده را تعیین نمود. هم‌چنین با در نظر گرفتن اطلاعاتی نظیر حجم کل رزین‌های تعویض یونی، سطح فعال غشا و مقاومت مخصوص آب در محفظه‌های رقیق و غلیظ، دیگر مشخصات یکسو کننده شامل ولتاژ، توان و انرژی الکتریکی مورد نیاز یکسو کننده مشخص می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین تجهیزات یک سیستم EDI، استاک است که در طراحی آن باید پارامترهای مختلفی از جمله تعداد مراحل الکتریکی و هیدرولیکی، تعداد جفت سل‌ها، ابعاد جدا کننده‌ها (ضخامت و سطح مقطع مؤثر آن) و به طور دقیق‌تر تعداد و ابعاد محفظه‌های فرعی، حجم کل رزین‌های تعویض یونی در یک استاک، نسبت حجمی دانه‌های رزین تعویض نیونی به کاتیونی، افت فشار در هر محفظه و بسیاری از پارامترهای کلیدی دیگر را در نظر گرفت. با توجه به این که در طراحی پارامترهای فوق باید هر دو جنبه هیدرولیکی و الکتریکی را به طور هم‌زمان در نظر گرفت، لذا طراحی هر یک از پارامترها و در نتیجه طراحی یک سیستم EDI، احتیاج به دقت و تجربه فراوان دارد. لازم به توضیح است که با توجه به این که هیچ روش استانداردی در زمینه طراحی سیستم‌های EDI تا سال ۲۰۰۰ میلادی ارائه نشده است، لذا نتایج حاصل از طراحی انجام شده، براساس الگوریتم ارائه شده در این مقاله باید به طور تجربی مورد ارزیابی قرار گیرد. امید است نتایج حاصل از مطالعات تجربی انجام شده به عنوان گامی موثر در مسیر استاندارد نمودن طراحی سیستم‌های EDI، که احتمالاً در آینده‌ای نزدیک به عنوان جایگزین سیستم‌های تعویض یونی در تصفیه آب مطرح خواهند شد، قلمداد گردد.

## منابع و مراجع


۱- عطارچی، م.ف.،(۱۳۷۹ و ۱۳۸۰). *"گزارش‌های پروژه طراحی و ساخت نمونه نیمه صنعتی دستگاه یون‌زدایی الکتریکی (EDI) مصرفی در سیستم تصفیه آب نیروگاه‌ها و انجام تست‌های کارایی"*، شرکت متن، بخش طرح‌ریزی فرآیندهای صنعتی.

۲- فلاح، ن.، (۱۳۷۸). *"معرفی روش ترکیبی یون‌زدایی الکتریکی (EDI) و کاربرد آن در تصفیه آب نیروگاه‌ها"*، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی برق، پژوهشگاه نیرو.

3- E-.Cell Corporation Kuhn & Associates Ltd. (1999). *"Introducing a Revolution in Chemical- Free Water Treatment"*, 52 Royal Road, Guelph, Ontario, Canada.

4- Chris, E. and Eil S. (1998).*"An Economic Comparison Between EDI and Mixed-bed Ion Exchange"*, Ultrapure Water, Nov.

5- ASTM, (May 2000). *"Standard Test Method for Operating Performance of Continuous Elector-Deionization Systems on Feeds from 50-1000µS/cm"*,