

# توسعه مدل‌های خطی کمینه کردن مصرف آب و تولید پساب در صنعت فراوری مس، مطالعه موردی: مجتمع مس خاتون آباد

امیر خاکپور<sup>۱</sup>، ناصر مهردادی<sup>۲</sup>، علی ترابیان<sup>۲</sup>، فرشاد گلبابایی کوتنایی<sup>۳</sup>، امیر پازوکی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست- آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
(نویسنده مسئول) [khakpour@celco.com](mailto:khakpour@celco.com)

۲- استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانش‌آموخته دکترای گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

پذیرش ۹۵/۶/۲۷ دریافت ۹۵/۲/۱۸

## چکیده

پساب حاصل از فرایندهای صنعت مس از نظر حجم تولید، بار آلودگی‌های زیست محیطی و هزینه تصفیه و دفع اهمیت زیادی دارد. بازیابی این پساب، علاوه بر مزایای اقتصادی موجب کاهش بار آلاینده‌های محیط زیست می‌شود. این موارد لزوم بررسی روش‌های مختلف برای کاهش میزان آب مصرفی و پساب خروجی را نشان می‌دهد. در این پژوهش به بررسی کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب در مجتمع مس خاتون آباد پرداخته شد. روش مرسوم کاهش آب و روشی نوین با نام فناوری پینچ آبی برای این منظور توضیح داده شدند. در این پژوهش، فناوری پینچ در سه واحد پر مصرف در مس خاتون آباد برای سه شاخص آلاینده‌گی شامل جامدات معلق کل، جامدات محلول کل و کدورت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش و به‌کارگیری روش پینچ به‌منظور تصمیم‌گیری برای تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب، نشان می‌دهد که برای جامدات معلق کل، جامدات محلول کل و کدورت به‌عنوان شاخص آلاینده‌گی به ترتیب می‌توان ۶۱۴، ۵۲۵ و ۴۵۱ مترمکعب در روز در مصرف آب خام معادل ۹۶/۴۰، ۳۵ و ۳۰ درصد صرفه‌جویی نمود. با توجه به نتایج پژوهش، فناوری پینچ توانسته به پژوهشگران در جهت تصمیم‌گیری‌های لازم برای کاهش آب مصرفی کمک کند. همچنین با توجه به نتایج مشاهده شده، جامدات معلق مبنای تصمیم‌گیری برای کاهش مصرف آب محسوب می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی:** کمینه‌سازی مصرف آب، شبکه‌های تبادلی جرم، استفاده مجدد، پینچ آب، جامدات معلق کل، کدورت

## ۱- مقدمه

باشد (Brouckaert & Buckley 2003). طی چند سال اخیر، بروز محدودیت‌های جدی در دسترسی به منابع آب سالم در نقاط مختلف کشور، پیامدهای مختلفی برای بخش صنعت داشته است که به‌عنوان نمونه می‌توان به افزایش مداوم قیمت آب خام همراه با اعلام محدودیت در احتمال عدم امکان تحویل آن به صنعت در سال‌های آتی، تعیین استاندارد تخلیه پساب و اخذ جریمه تصاعدی برای عدم رعایت آن، معرفی واحد صنعتی به‌عنوان صنعت آلاینده با اخذ جریمه جداگانه به میزان یک درصد اشاره کرد. این رویکرد، به تدریج صاحبان صنایع را متوجه موضوع تأمین آب پایدار و لزوم مدیریت اصولی آن نموده است (Savelski & Bagejewicz 2000). کمینه‌سازی مصرف آب، به‌خصوص به‌دلیل محدودیت دسترسی به منابع جدید آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Manan et al. 2006). روش‌های مختلفی که پژوهشگران در کارهای خود استفاده نموده‌اند، شامل روش‌های گرافیکی، عددی و

سهم آب مصرفی بخش صنعت در ایران حدود یک درصد از کل مصرف آب کشور و کمی بیش از یک میلیارد متر مکعب در سال است (Wan Alwi et al. 2007). میزان مصرف آب در صنعت به‌دلیل تنوع در ماهیت صنعت، نوع فرایند، عمر فناوری، ظرفیت تولید، تجهیزات تأمین آب، برق و بخار، روش تصفیه پساب، میزان استفاده مجدد از آب و پساب، میزان اتوماسیون صنعت، مهارت راهبری تجهیزات و تأسیسات، میزان باور و تسلط مدیران به عوامل مؤثر بر مصرف آب و منطقه‌ای که هر واحد صنعتی در آن استقرار یافته، دارای طیف بسیار متفاوتی است (Mann & Liu 1999). بر همین اساس توانمندسازی فنی و اطلاعاتی مهندسان و مدیران واحدها در حوزه کمینه‌سازی مصرف آب و کاهش تولید پساب می‌تواند نقش مناسب و مؤثری در رفع مشکل تنش آبی برای بخش صنعت، و یا تعدیل آن، به‌عهده داشته

آنها به ۱۴۹ و ۲۰۸ مترمکعب در ساعت و به میزان ۴۳/۸ و ۶۱/۱۸ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب دست یابند (Mughees & Al-Ahmad 2015). هدف پژوهش حاضر بررسی و تصمیم‌گیری به‌منظور کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب در صنعت مس برای اولین بار در سطح کشور بر اساس مدل پینچ است. در این پژوهش به بررسی فرایند فراوری مس از نقطه نظر آب بر بودن و امکان‌سنجی کاهش و بازچرخانی آب مصرفی<sup>۱</sup> بر پایه به‌کارگیری مدل پینچ پرداخته شد. تا به حال اغلب پژوهش‌های ارائه شده در داخل و خارج از کشور بر روی صنایع نفتی و پالایشگاهی انجام شده است، در حالی که صنایع غیرفلزی نیز نظیر صنایع نفتی جزء صنایع مادر و پر مصرف در بخش آب محسوب می‌شوند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

کارخانه ذوب مس خاتون‌آباد در ۳۰ کیلومتری شرق شهرستان شهر بابک، ۸۰ کیلومتری معدن مس میدوک و در فاصله ۲۰۰ کیلومتری غرب استان کرمان با زیربنای ۶۰۵۱۷ متر مربع (مساحت ۱۰۰ هکتار) احداث شده است. واحدهای مختلف کارخانه عبارت‌اند از انباشت، اختلاط، کوره فلش، خشک‌کن، کوره الکتریکی، کنورتور، کوره آندی و بخش ریخته‌گری.

کلیه آب مصرفی مس خاتون‌آباد از چاه‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. کل آب خام مصرفی مس خاتون‌آباد ۳۱۰۲/۵ متر مکعب در روز است. بیشترین مصرف آب خام در واحدهای ۲۱، ۸۲ و بلودان بویلر به ترتیب به مقدار ۶۱۱، ۷۵۸ و ۴۸۲ متر مکعب در روز است که در واقع بیشترین حجم آب مصرفی در مجتمع خاتون‌آباد ناشی از عملیات خنک‌سازی در واحدهای مختلف می‌باشد. واحد ۷۹ نیز ۴۴۵ متر مکعب در روز مصرف آب خام دارد. در نهایت پساب تولیدی با دو مسیر مجزا به دو استخر WW (فاضلاب) و استخر DW (زهکشی) وارد می‌شود که استخر WW تبخیری بوده و از خروجی آن استفاده‌ای صورت نمی‌گیرد و از بخش خروجی استخر DW برای آبیاری فضای سبز استفاده می‌شود. بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده، واحدهای ۲۱، ۸۲

برنامه‌نویسی ریاضی است (Feng & Deng 2013). مبنای اکثر روش‌های گرافیکی و عددی، انتقال جرم آلاینده است. در حالی که در بسیاری از عملیات مصرف‌کننده آب، انتقال جرم صورت نمی‌گیرد (Winterbone & Turan 2015). فناوری پینچ روشی کارآمد برای کمینه‌سازی پساب است که در آن سه رویکرد بازچرخش، استفاده مجدد و احیاء به صورت با هم یا هر کدام به تنهایی برای کاهش مصرف آب خام مد نظر است (Rafidah et al. 2013; Qiao et al. 2016). مفهوم فناوری پینچ یک نوع یکپارچه‌سازی تبادل جرم در بخش‌های مصرف‌کننده آب است، در عین حال کاربری اصلی این شبکه، مصرف آب را دچار اختلال نمی‌کند؛ زیرا این فناوری در واقع در همان شبکه موجود قابل استفاده است (Nabi Bidhendi et al. 2010; Mohammadnejad et al. 2012).

در پژوهش خاجیان و همکاران بر روی کمینه‌سازی شبکه آب مصرفی واحد شمالی پالایشگاه تهران با در نظر گرفتن بویلرها، برج‌های خنک‌کننده و مصارف عمومی به‌عنوان واحدهای عملیاتی مصرف‌کننده عمده آب، سیستم تصفیه پساب به‌عنوان تأمین‌کننده آب و آلاینده جامدات کل به‌عنوان آلاینده کلیدی و بر اساس محاسبات، مقدار آب مصرفی پالایشگاه از ۵۰۵ متر مکعب بر ساعت به ۳۲۰ متر مکعب بر ساعت (۳۶/۶ درصد کاهش) رسیده است (Khajian & Shayegan 2008). مانان و همکاران در سال ۲۰۰۶ در مسجد سلطان اسماعیل دانشگاه تکنولوژی مالزی با استفاده از روش پینچ توانستند به‌طور متعارف ۶۵/۱ درصد مصرف آب خام ورودی و ۵۱/۵ درصد تولید پساب را کاهش دهند (Manan et al. 2006). در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۲، به‌منظور به حداقل رساندن پساب کارخانجات قدیمی نساجی از روش پینچ استفاده شد که مشخص شد هزینه‌های عملیاتی در استفاده مجدد و بازیابی به ترتیب ۱۶ درصد و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Ujang et al. 2002). نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۰ نیز نشان داد عملکرد سیستم پینچ در مدیریت آب صنایع آلومینیوم‌سازی، پساب تولیدی را از ۶/۷ درصد آب خام ورودی به میزان ۱۴/۴ درصد کاهش می‌دهد (Khezri et al. 2010). موقیس و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۵ بر روی یک پالایشگاه، COD و سختی را به‌عنوان تک آلاینده‌های مجزا در نظر گرفته و با استفاده از روش پینچ توانستند به ترتیب برای هر کدام از

<sup>1</sup> Reduction & Recycle

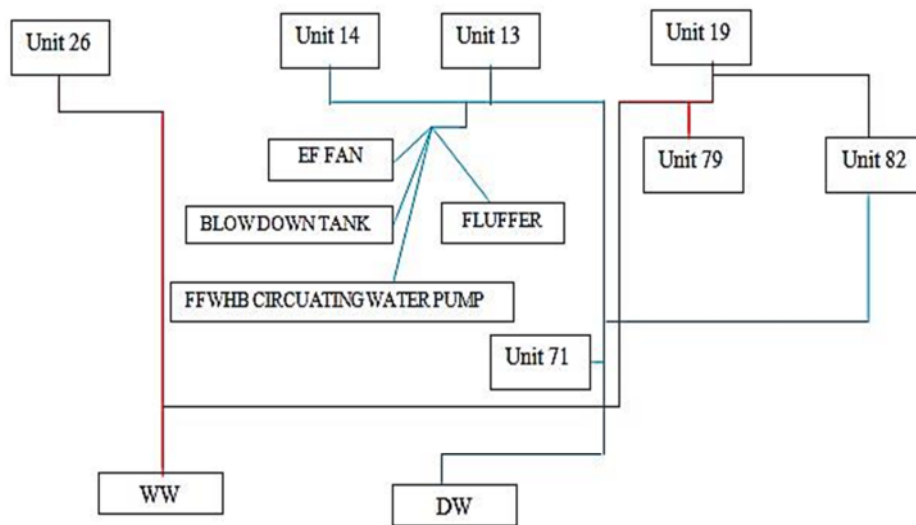


Fig. 1. Flow diagram for effluent generation in Khatoon Abad Copper Refinery Plant  
شکل ۱- فلودیاگرام تولید پساب در مجتمع مس خاتون آباد

با شناسایی فرصت‌های احیا پایه‌گذاری شده بود، ارائه دادند. آنها با تشکیل منحنی ترکیبی غلظت آلاینده، مشابه منحنی آنتالپی دما در آنالیز پینچ حرارتی، این منحنی ترکیبی را با یک خط مستقیم از مبدأ تطبیق دادند. این خط تأمین آب حداقل نمودار ترکیبی را در دو نقطه حداقل یکی در مبدأ و دیگری در نقطه حداقل بعدی (نقطه پینچ) قطع می‌کند. سپس آن‌ها دو روش برای رسیدن به این طراحی دبی حداقل ارائه دادند. اولی اشاره به روش حداکثر نیروی مؤثر دارد که اختلاف غلظت‌های بین جریان‌های مختلف برای انتخاب میزان جریان حداقل را استفاده می‌کند. روش دوم که اشاره به روش حداقل منابع آب دارد، از مقطع‌های بارگذاری استفاده می‌کند. در هر مقطع فقط آن مقدار آبی استفاده می‌شود که امکان بقای شبکه وجود داشته باشد. بقیه کنار گذاشته می‌شود و بعداً استفاده می‌شود. اتلاف آب در فرایندها نیز به همراه امکان استفاده از چندین منبع با کیفیت‌های متغیر بررسی شده و قواعد طراحی‌های پیشنهادی، امکان توسعه شکل جریان آب را براساس بازچرخش موضعی و تقسیم عملیات عملی ساخته است.

در روش تک آلاینده‌گی، ابتدا باید بتوان یک آلاینده شاخص با تأثیرگذاری بالا را انتخاب کرد. انتخاب این آلاینده بستگی به نوع صنعت و نیازمندی‌های آب آن صنعت خواهد داشت. پس از آن انتخاب فرایندهایی که باید آنالیز شوند، اهمیت زیادی دارد (Priya & Bandyopadhyay 2016; Mehrdadi et al. 2009).

و بلودان بیشترین حجم پساب را به استخر DW و واحد ۷۹ به WW ارسال می‌نمایند. واحدهای ۲۱، ۸۲ و بلودان تقریباً ۷۰ درصد حجم پساب ورودی به استخر DW را تشکیل می‌دهند و بررسی این سه واحد هم تقریباً بیانگر ویژگی‌های پساب DW خواهد بود. شکل ۱ بیانگر فلودیاگرام تولید پساب در مجتمع مس خاتون آباد است. با توجه به شکل ۱، خطوط آبی نشان‌دهنده پساب تولیدی از واحدهایی است که وارد استخر DW می‌شود و خطوط قرمز نشان‌دهنده پساب‌های تولیدی از واحدهایی است که وارد استخر WW می‌شود.

## ۲-۲- روش

مدل پینچ آبی، روش مناسب عملیات مصرف آب صنعتی و نمایش عملیات به‌عنوان انتقال‌دهنده جرم از جریان فرایند آلوده به جریان آب است. آلاینده شامل جامدات معلق، COD و یا کمیت‌های مشابه آن است که سطح غلظت آنها، استفاده‌های مجدد از آب خروجی در عملیات را با محدودیت رو به رو می‌کند (Hallale 2002). به این منظور برای بررسی کمینه‌سازی مصرف آب با روش پینچ آبی پارامترهای شاخص انتخاب شده که به صورت تک آلاینده مورد بررسی قرار می‌گیرند (Tan et al. 2003). در سال ۱۹۹۴ یک دیدگاه مفهومی، که هدف آن براساس حداکثر استفاده مجدد از آب برای تک آلاینده و چند آلاینده همراه

کلیه آزمایش‌ها بر اساس کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شد (APHA 2005). آزمایش جامدات معلق کل با کاغذ صافی Whatman انجام شد میزان جامدات محلول کل با دستگاه WTW 7110 و کدورت با دستگاه Hach DR 2000 اندازه‌گیری شد (APHA 2005).

### ۳- نتایج و بحث

محاسبات به منظور کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب با انجام اصلاحاتی در روش مفهومی-ترسیمی وانگ و اسمیت، برای تک آلاینده انجام شد (Dunn & Bush 2001). نتایج حاصل از کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس مدل پینچ آبی با تکیه بر تک آلاینده در ادامه آورده شده است.

#### ۳-۱- شاخص جامدات معلق کل

اولین مرحله در محاسبات پینچ محاسبه میزان بار جرمی آلاینده انتقالی است. باید بتوان بار آلاینده‌ای را که در خط تولید، از فرایند به داخل آب انتقال می‌یابد، محاسبه کرد. آب نقش انتقال دهنده جرم را در این روند بازی می‌کند (Juliana et al. 2007). نتایج محاسبه بار جرمی آلاینده جامدات معلق کل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- نتایج محاسبه بار جرمی آلاینده جامدات معلق کل

Table 2. Calculation results for TSS mass load

Processes	$C_{in}^{lim}$ mg/l	$C_{out}^{lim}$ mg/l	$f_i^{lim}$ m <sup>3</sup> /day	$\Delta m_{i,tot}$ kg/day
CWP	3	8	130	0.65
21 a	20	24	395	1.6
21 b	20	-	216	-
82	20	25	758	3.79

در عملیات ۲۱، اتلاف آب وجود دارد. عملیات به دو بخش بدون اتلاف آب (a) و با اتلاف آب (b) تقسیم می‌شود. بخش b در انتقال جرم نقشی نداشته، بنابراین در محاسبات وارد نشده و فقط بخشی از آب در آن مصرف می‌شود که در آب مصرفی مجتمع این بخش آورده شده است.

فاصله بین هر غلظت با غلظت بعدی را یک مقطع می‌نامند. در این آنالیز چهار مقطع وجود داشت. به منظور بررسی تغییر غلظت‌ها، غلظت‌ها از پایین و از کوچک به بزرگ نوشته می‌شود که غلظت ورودی و خروجی را شامل می‌شود. همان طور که در شکل ۱

اولین مرحله در محاسبات پینچ محاسبه میزان بار جرمی آلاینده انتقالی است. باید بتوان بار آلاینده‌ای را که از فرایندی تا فرایند دیگر به داخل آب انتقال می‌یابد، محاسبه کرد. آب نقش انتقال دهنده جرم را در این روند دارد (Juliana et al. 2007)

$$f_{i,k}^{tot} (m^3/day) = \frac{\Delta m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (ppm)} \times 10^3 \quad (1)$$

$$\Delta m_{i,tot} (kg/day) = f_i (m^3/day) \times [C_{i,out}^{lim} - C_{i,in}^{lim}] / 10^3 \quad (2)$$

که در این معادلات

i شماره عملیات یا واحد، k شماره مقطع غلظت،  $\Delta m_{i,tot}$  بار جرمی آلاینده در هر عملیات؛  $\Delta m_{i,k}$  بار جرمی آلاینده در هر مقطع غلظت،  $C_{in}^{lim}$  غلظت ورودی به عملیات،  $C_{out}^{lim}$  غلظت خروجی از عملیات،  $f_i^{lim}$  دبی ورودی به عملیات،  $f_{i,k}^{tot}$  دبی ورودی به عملیات در هر مقطع غلظت؛  $C_{i,k}^w$  غلظت آب ورودی به عملیات در هر مقطع و  $[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w]$  اختلاف بین غلظت آلاینده در مقطع بالاتر و غلظت آبی است که وارد این عملیات می‌شود.

برای تحقق این موضوع، با توجه به اطلاعات دریافتی از مجتمع مس خاتون‌آباد، عملیات واحدهای ۲۱، ۸۲ و آب خنک‌سازی و سیرکوله بویلر و همچنین سه آلاینده (کل جامدات معلق، کل جامدات محلول و کدورت) به عنوان مبنای محاسبات انتخاب شدند. جدول ۱ بیانگر کیفیت پساب واحدهای مختلف مجتمع مس خاتون‌آباد است.

جدول ۱- کیفیت پساب واحدهای مختلف مجتمع مس خاتون‌آباد

Table 1. Effluent characteristics in different units of Khatoon Abad Copper Refinery Plant

Parameter	Measurement Unit	Unit 82	Unit 82	BLOW DOWN TANK
TSS	mg/l	25	24	8
TDS	mg/l	731	447	400
Turbidity	NTU	4	3	5

#### ۳-۲- نمونه‌برداری و آزمایش‌ها

این پژوهش یک مطالعه تجربی است که در مدت ۴۳ ماه انجام شد و نتایج آن با توجه به تغییرات کم پارامترها بر اساس میزان میانگین پارامترها ارائه شده است. نمونه‌برداری به صورت مرکب و بر اساس استانداردهای نمونه‌برداری ملی ایران (استاندارد ۲۳۴۷) انجام شد (Institute of Standard and Industrial Research of Iran 1988).

جدول ۳- نتایج محاسبه بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده جامدات معلق کل

Table 3. Calculation results for mass transfer at each level of TSS concentration

Processes	k	$C_{in}^{lim}$	$C_{out}^{lim}$	$m_{i,k}(\text{kg/day})$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$	$\Delta m_{i,tot}$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$
		mg/l	mg/l	mg/l	$= \Delta m_{i,tot}(\text{kg/day}) \left[ \frac{C_{k+1}^* - C_k^*}{C_{i,out}^{lim} - C_{i,in}^{lim}} \right]$	$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (\text{ppm})} \times 10^3$	$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (\text{ppm})} \times 10^3$
82	3	20	25	20	24	3.79	3.04
82	4	20	25	24	25	3.79	0.76

جدول ۴- نتایج محاسبه دبی مورد نیاز (برای انتقال بار جرمی) هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده جامدات معلق کل

Table 4. Calculation results for the required discharge (for mass transfer) of each operation at each TSS level

Processes	k	$C_{i,k}^w$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$
		mg/l	$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (\text{ppm})} \times 10^3$	$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (\text{ppm})} \times 10^3$	$\frac{m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (\text{ppm})} \times 10^3$
CWP	1	0	8	0.65	92.85
21 a	3	8	24	1.6	100
82	3	1	24	3.04	132
82	4	24	25	0.76	760

این عملیات نیاز دارد را می‌توان از عملیات قبلی تأمین نمود. در این صورت مقدار آب مورد نیاز برابر ۱۰۰ مترمکعب است که ۹۲/۸۵ متر مکعب از عملیات قبلی پس‌اب در اختیار است و ۷/۱۵ مترمکعب هم آب خام به آن اضافه می‌شود. علت استفاده از خروجی واحد CWP در واحد ۲۱a این است که خروجی واحد CWP دارای غلظت ۸ ppm است که برای ورود به واحد ۲۱a مناسب است.

در مقطع چهارم، دو نوع پس‌اب وجود دارد: اول پس‌اب خروجی از عملیات ۸۲ از مقطع سوم و دیگری پس‌اب خروجی از عملیات ۲۱a از مقطع سوم. ابتدا پس‌اب خروجی از عملیات ۸۲ مصرف می‌شود. در صورت نیاز از پس‌اب خروجی از عملیات ۲۱a و در نهایت از آب خام استفاده خواهد شد.

میزان آب لازم به صورت کلی برابر با ۷۶۰ مترمکعب در روز است. ۱۳۲ متر مکعب از عملیات ۸۲ در مقطع قبل و ۱۰۰ متر مکعب از عملیات ۲۱a در مقطع قبل است که جمعاً ۲۳۲ مترمکعب پس‌اب خروجی از مقطع قبل می‌باشد. مقدار کمبود آب ۴۳۷ مترمکعب است که از آب خام تأمین خواهد شد. شکل ۲ بیانگر دیاگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده جامدات معلق کل است.

شکل ۳ نتایج نهایی به کارگیری روش پینچ برای پارامتر جامدات معلق کل را نشان می‌دهد.

مشخص است، عملیات CWP و ۲۱a از یک مقطع عبور می‌کند ولی عملیات ۸۲ شامل دو مقطع سوم و چهارم است. لذا عملیات CWP و ۲۱a فقط در یک مقطع غلظتی قرار گرفته‌اند و عملیات ۸۲ در دو مقطع ادامه یافته است. بنابراین عملیات CWP و ۲۱a نیازی به محاسبه بار جرمی هر مقطع ندارند

$$m_{i,k}(\text{kg/day}) = \Delta m_{i,tot}(\text{kg/day}) \left[ \frac{C_{k+1}^* - C_k^*}{C_{i,out}^{lim} - C_{i,in}^{lim}} \right] \quad (3)$$

که در این معادله

$C_{k+1}^* - C_k^*$  اختلاف غلظت بین مقطع بالاتر و مقطع پایین‌تر است و سایر پارامترها در معادلات ۱ و ۲ تعریف شده است.

نتایج محاسبات انجام شده برای به‌دست آوردن بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده جامدات معلق کل در جدول ۳ آورده شده است. همچنین نتایج محاسبات انجام شده برای به‌دست آوردن دبی مورد نیاز هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده جامدات معلق کل در جدول ۴ آورده شده است. براساس محاسبات، مقدار ۹۲/۸۵ متر مکعب آب برای عملیات CWP نیاز است تا بار جرمی ۰/۶۵ کیلوگرم بر روز منتقل شود. عملیات ۲۱a در یک مقطع غلظت قرار گرفته است که مقطع سوم است و غلظت ورودی آن ۲۴ ppm است که به غلظت ۸ ppm می‌رسد. بار جرمی در مقطع سوم همان بار جرمی عملیات ۲۱a است. اما بخشی از مقدار آبی که

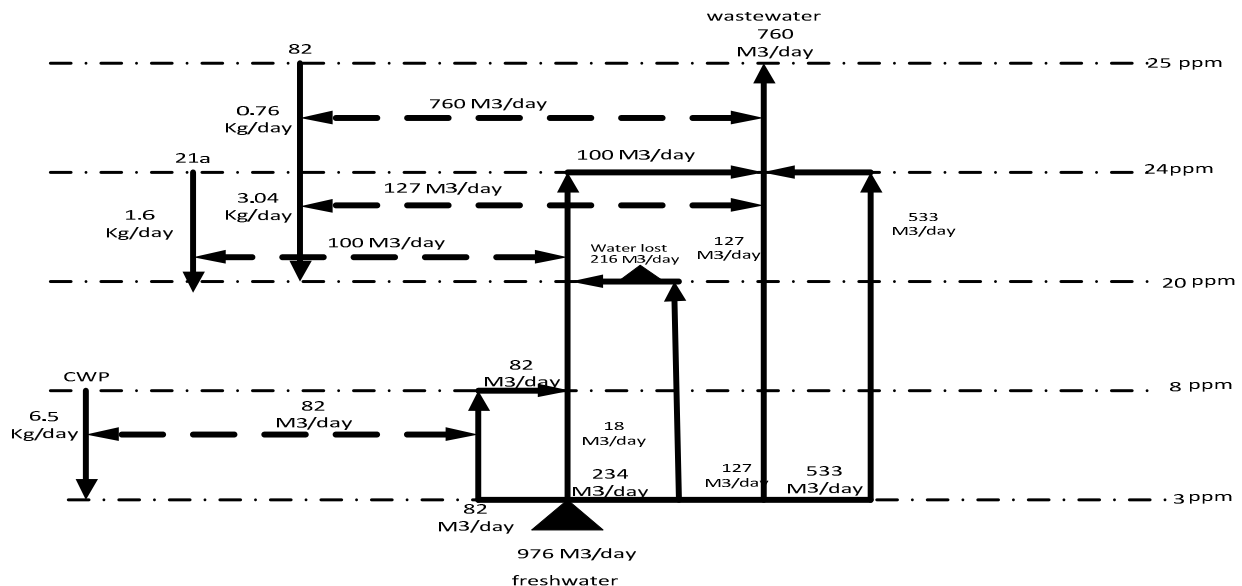


Fig. 2. Calculation diagram for minimizing water consumption based on TSS pollutant

شکل ۲- دیگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده جامدات معلق کل

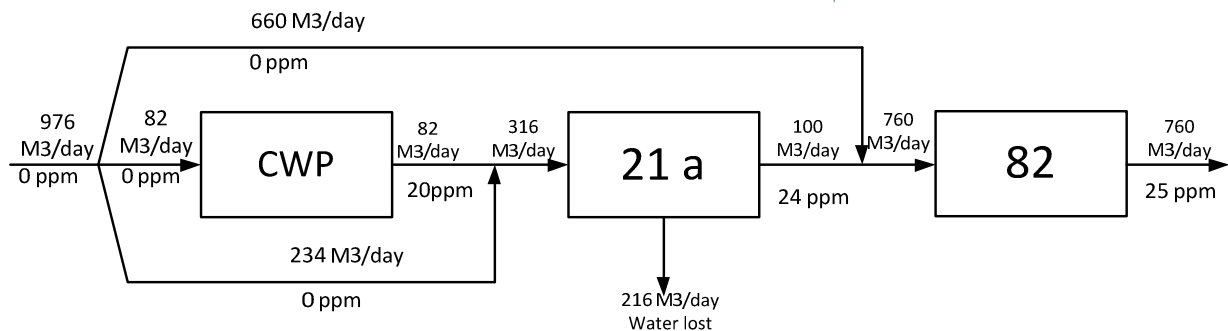


Fig. 3. Final results of using Pinch method for TSS

شکل ۳- دیگرام نتایج نهایی به‌کارگیری روش پینچ برای پارامتر جامدات معلق کل

مشابه آلاینده جامدات معلق کل و با استفاده از معادله ۲ محاسبات لازم برای به‌دست آوردن بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده جامدات محلول کل انجام شد (جدول ۶).  
 عملیات ۸۲ فقط در یک مقطع قرار دارد و بار جرمی کل در معادله ۳، محاسبات لازم برای به‌دست آوردن دبی مورد نیاز هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده جامدات معلق کل و با استفاده از (جدول ۷).

میزان آب لازم به‌صورت کلی برابر با ۷۵۸ مترمکعب در روز است. تأمین ۳۸۹ متر مکعب از این مقدار از عملیات ۲۱a در مقطع بعد و تأمین ۱۸۲ متر مکعب از این مقدار از عملیات ۲۱a در مقطع قبل انجام می‌شود که جمعاً ۵۷۱ متر مکعب پساب خروجی از مقطع ۲۱a است. مقدار کمبود آب ۱۸۷ متر مکعب است که از آب خام

### ۲-۳- شاخص جامدات محلول کل

مشابه آلاینده جامدات معلق کل و با استفاده از معادله ۱، محاسبات لازم برای به‌دست آوردن بار جرمی آلاینده جامدات محلول کل انجام شد (جدول ۵). نظیر آلاینده قبلی، در عملیات ۲۱، اتلاف آب وجود دارد. عملیات به دو بخش بدون اتلاف آب (a) و با اتلاف آب (b) تقسیم می‌شود. بخش b در محاسبات وارد نشده و فقط دبی لازم برای این بخش (بخشی از آب که در عملیات تلف می‌شود) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵- نتایج محاسبه بار جرمی آلاینده جامدات محلول کل

Table 5. Calculation results for TDS mass load

Processes	$C_{in}^{lim}$ mg/l	$C_{out}^{lim}$ mg/l	$f_i^{lim}$ m <sup>3</sup> /day	$\Delta m_i$ kg/day
CWP	300	400	130	13
21 a	350	447	395	38.3
21 b	350	-	216	-
82	600	731	758	99.3

جدول ۶- نتایج محاسبه بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده جامدات محلول کل

Table 6. Calculation results for mass transfer at each level of TDS concentration

Processes	k	$C_{lim}$		$m_{i,k}(\text{kg/day})$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$	$\Delta m_{i,tot}$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day}) =$
		mg/l	mg/l	mg/l	$\frac{C_{k+1}^* - C_k^*}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^*]} \times 10^3$		$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^*](\text{ppm})} \times 10^3$
CWP	1	300	400	300	350	13	6.5
CWP	2	300	400	350	400	13	6.5
21 a	2	350	447	350	400	38.3	20
21 a	3	350	447	400	470	38.3	18.3

جدول ۷- نتایج محاسبه دبی مورد نیاز هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده جامدات محلول کل

Table 7. Calculation results for the required discharge of each operation at each TDS level

Processes	k	$C_{i,k}^w$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day})$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day})$	$f_{i,k}^{tot}(\text{m}^3/\text{day})$
			$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w](\text{ppm})} \times 10^3$	$\frac{\Delta m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w](\text{ppm})} \times 10^3$	$\frac{m_{i,k}(\text{kg/day})}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w](\text{ppm})} \times 10^3$
CWP	1	290	350	6.5	108
CWP	2	350	400	6.5	130
21 a	2	290	400	20	182
21 a	3	400	447	18.3	389
82	5	600	731	99.3	758

که این کاهش آب مصرفی برابر ۳۵ درصد می‌باشد. شکل ۵ بیانگر دیگرام نتایج نهایی به‌کارگیری روش پینچ برای پارامتر جامدات محلول کل است.

تأمین می‌شود. شکل ۴ دیگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده جامدات محلول کل را نشان می‌دهد. میزان کل آب مصرفی در ابتدا برابر ۱۴۹۹ مترمکعب در روز است که بعد از اجرای روش پینچ به ۹۷۴ مترمکعب در روز کاهش پیدا کرده است

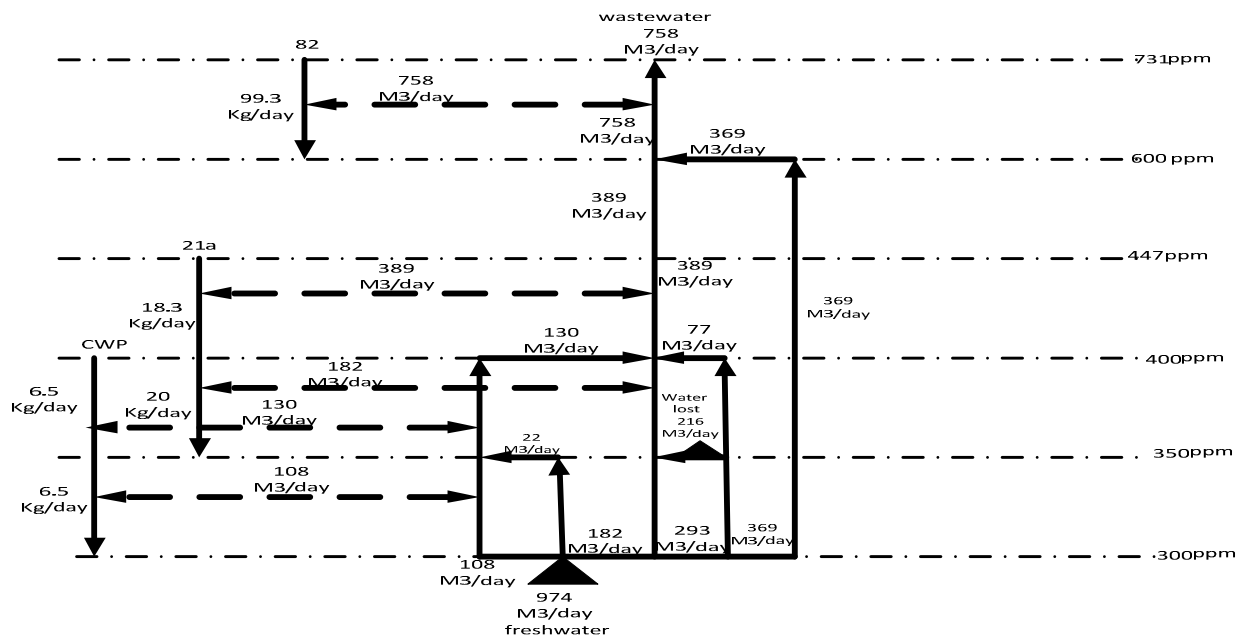


Fig. 4. Calculations diagram for minimizing water consumption based on TDS pollutant

شکل ۴- دیگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده جامدات محلول کل

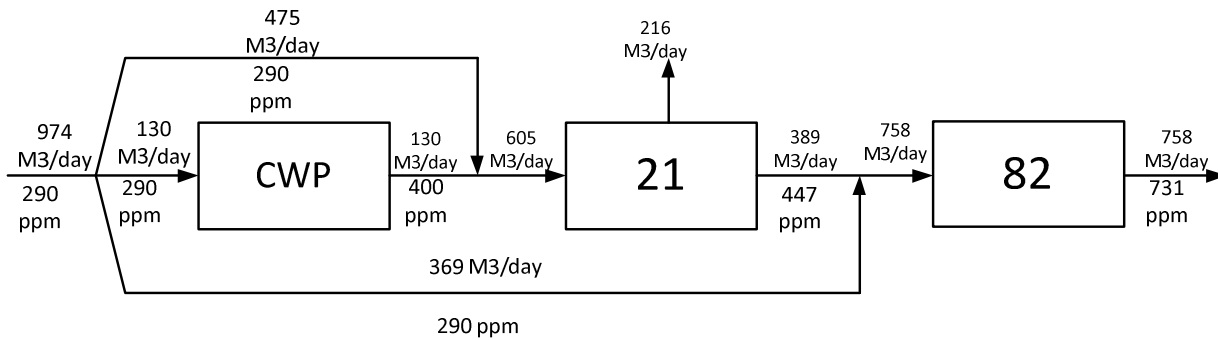


Fig. 5. Final results of using Pinch method for TDS

شکل ۵- دیاگرام نتایج نهایی به‌کارگیری روش پینچ برای پارامتر جامدات محلول کل

مشابه آلاینده‌های جامدات معلق و محلول کل و با استفاده از معادله ۳ محاسبات لازم برای به‌دست آوردن دبی مورد نیاز هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده کدورت انجام شد. نتایج در جدول ۱۰ آورده شده است.

میزان آب لازم به‌صورت کلی برابر با ۷۵۸ مترمکعب در روز است. ۳۹۵ متر مکعب از عملیات ۸۲ در مقطع قبل و ۱۳۰ متر مکعب از عملیات ۲۱a در مقطع قبل که جمعاً ۵۲۵ متر مکعب پساب خروجی از مقطع قبل می‌باشد. مقدار کمبود آب ۲۳۳ متر مکعب است که از آب خام تأمین خواهد شد. شکل ۶ بیانگر دیاگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده جامدات معلق کل است.

میزان کل آب مصرفی در ابتدا برابر ۱۴۹۹ مترمکعب در روز بود که بعد از اجرای روش پینچ به ۱۰۴۸ مترمکعب در روز کاهش پیدا کرد. کاهش آب مصرفی برابر ۳۰ درصد بود. شکل ۷ بیانگر دیاگرام نتایج نهایی به‌کارگیری روش پینچ برای پارامتر کدورت است.

### ۳-۳- شاخص کدورت

با استفاده از معادله ۱، محاسبات لازم برای به‌دست آوردن بار جرمی آلاینده کدورت انجام شد (جدول ۸). نظیر آلاینده قبلی، در عملیات ۲۱، اتلاف آب وجود دارد. عملیات به دو بخش بدون اتلاف آب (a) و با اتلاف آب (b) تقسیم می‌شود. بخش b در محاسبات وارد نشده و فقط دبی لازم برای این بخش (بخشی از آب که در عملیات تلف می‌شود) در نظر گرفته می‌شود.

مشابه آلاینده‌های ذکر شده و با استفاده از معادله ۲ محاسبات لازم برای به‌دست آوردن بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده جامدات محلول کل انجام شد. نتایج در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۸- نتایج محاسبه بار جرمی آلاینده کدورت

Table 8. Calculation results for turbidity mass load

Processes	$C_{in}^{lim}$ mg/l	$C_{out}^{lim}$ mg/l	$f_i^{lim}$ m <sup>3</sup> /day	$\Delta m_i$ kg/day
21 a	1	3	395	0.79
CWP	3	5	130	0.26
82	2	4	758	1.57

جدول ۹- نتایج محاسبه بار جرمی انتقالی در هر مقطع غلظت آلاینده کدورت

Table 9. Calculation results for mass transfer at each level of turbidity concentration

Processes	k	$m_{i,k}$ (kg/day)			$f_{i,k}^{tot}$ (m <sup>3</sup> /day) =		$f_{i,k}^{tot}$ (m <sup>3</sup> /day) =	
		$C_{in}^{lim}$ mg/l	$C_{out}^{lim}$ mg/l	$\Delta m_{i,tot}$ (kg/day)	$\frac{C_{k+1}^* - C_k^*}{C_{i,out}^{lim} - C_{i,in}^{lim}}$	$\frac{\Delta m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^*] (ppm)} \times 10^3$	$\Delta m_{i,tot}$	$\frac{\Delta m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^*] (ppm)} \times 10^3$
21 a	1	1	3	1	2	0.79	0.395	
21 a	2	1	3	1	3	0.79	0.395	
82	2	2	4	2	3	1.57	0.785	
82	3	2	4	3	4	1.57	0.785	
CWP	3	3	5	3	4	0.26	0.13	
CWP	4	3	5	4	5	0.26	0.13	



جدول ۱۰- نتایج محاسبه دبی مورد نیاز هر عملیات در هر مقطع برای آلاینده کدورت

Table 10. Calculation results for the required discharge of each operation at each turbidity level

Processes	k	$C_{i,k}^w$ mg/l	$f_{i,k}^{tot} (m^3/day) =$ $\frac{\Delta m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (ppm)} \times 10^3$	$f_{i,k}^{tot} (m^3/day) =$ $\frac{\Delta m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (ppm)} \times 10^3$	$f_{i,k}^{tot} (m^3/day) =$ $\frac{m_{i,k} (kg/day)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (ppm)} \times 10^3$
			mg/l	mg/l	m <sup>3</sup> /day
CWP	3	1	4	0.13	44
CWP	4	4	5	0.13	130
21 a	1	1	2	0.395	395
21 a	2	2	3	0.395	395
82	2	1	3	0.758	393
82	3	3	4	0.758	758

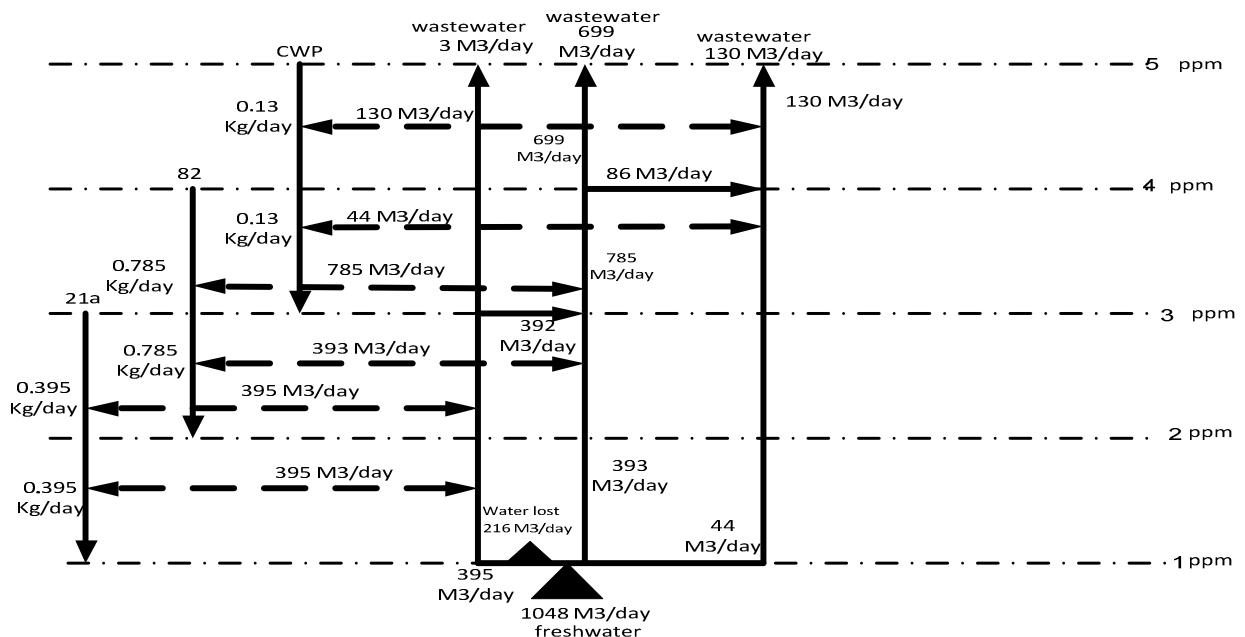


Fig. 6. Calculation diagram for minimizing water consumption based on turbidity

شکل ۶- دیاگرام محاسبات کمینه‌سازی مصرف آب بر اساس آلاینده کدورت

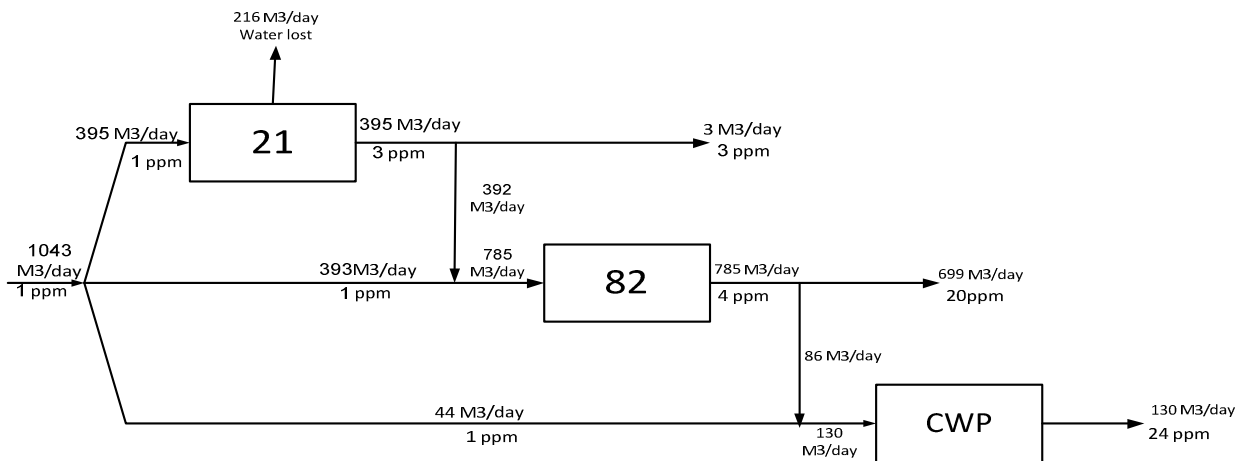


Fig. 7. Final results of using Pinch method for turbidity

شکل ۷- دیاگرام نتایج نهایی بکارگیری روش پینچ برای پارامتر کدورت

## ۴- نتیجه‌گیری

از مزایای کمینه‌سازی مصرف آب در صنایع می‌توان به کاهش پایدار مصرف آب در واحد صنعتی، کاهش میزان پساب تولیدی، کاهش میزان هزینه پرداختی برای تامین آب، کاهش هزینه‌های جاری بهره‌برداری از سیستم تصفیه پساب، ایجاد ظرفیت خالی در تصفیه‌خانه پساب، کاهش میزان جرائم پرداختی متناظر قانون برنامه سوم و چهارم و احتمال حذف از فهرست برای صنایع آلاینده موضوع قانون مالیات بر ارزش افزوده اشاره نمود.

از مشکلات کمینه‌سازی مصرف آب در واحدهای صنعتی می‌توان به جدید بودن این مقوله برای مدیران صنعت به‌ویژه واحدهای متوسط، تجارب ناموفق مطالعاتی و اجرایی در واحدهای پیشرو، عدم اطمینان مهندسان و متعاقباً مدیران صنایع به راه‌حل‌های نرم‌افزاری (به‌خصوص از نوع بومی)، عدم ارائه سناریوهای مختلف کمینه‌سازی توسط اغلب مشاوران، شفاف نبودن هزینه سرمایه‌گذاری و دوره برگشت سرمایه طرح‌های کمینه‌سازی، فقدان تجارب موفق متعدد کمینه‌سازی مصرف آب برای جلب اعتماد و اتکاء کارفرما توسط مشاوران، نگرانی از آسیب فرایند تولید در صورت اجرای ناموفق طرح کمینه‌سازی مصرف آب، عدم آشنایی بسیاری از مهندسان فرایند بخش صنعت با اصول اولیه مهندسی محیط زیست، عدم حمایت مؤثر بخش‌های دولتی از قبیل سازمان حفاظت محیط زیست و وزارت صنایع و معادن برای انجام نمونه‌های اجرایی کمینه‌سازی مصرف آب با تضمین خسارت احتمالی واحد صنعتی و عدم آشنایی بسیاری از متخصصان حوزه صنعت و محیط زیست با روش‌های کمینه‌سازی از جمله پینچ آبی اشاره نمود. نتایج این پژوهش، بر اساس محاسبات پایه و با بهترین اطلاعات قابل دسترس بوده است. بدیهی است با افزایش دقت در

اطلاعات مورد نیاز توسط مهندسان ذوب خاتون‌آباد، نتایج مطمئن تری برای تصمیم‌گیری موفق طرح پیشنهادی فراهم می‌شود. در مطالعه موردی این مقاله، به کمینه‌سازی مصرف آب در یک واحد تولید مس پرداخته شد. با توجه به اینکه تولید فلزات اساسی با حدود ۱۱ درصد یکی از صنایع پر مصرف آب است، لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به انجام پژوهش‌های مشابه در این گروه‌های صنعتی نیز پرداخته شود.

در این پژوهش، فناوری پینچ در سه واحد پرمصرف در صنعت مس خاتون‌آباد برای سه شاخص آلاینده‌گی جامدات معلق کل، جامدات محلول کل و کدورت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، آلاینده جامدات معلق کل در نظر گرفته شد. در این حالت می‌توان جمعاً ۶۱۴ مترمکعب در روز مصرف آب خام را کاهش داد و معادل ۴۰/۹۶ درصد صرفه‌جویی نمود و در حالت دوم و آلاینده جامدات محلول کل، می‌توان جمعاً ۵۲۵ مترمکعب در روز مصرف آب خام را کاهش داد و معادل ۳۵ درصد صرفه‌جویی نمود. در حالت سوم که آلاینده کدورت در نظر گرفته شد، می‌توان جمعاً ۴۵۱ مترمکعب در روز مصرف آب خام را کاهش داد و معادل ۳۰ درصد صرفه‌جویی نمود. با توجه به نتایج مشاهده شده، آلاینده جامدات معلق به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای کاهش مصرف آب قرار می‌گیرد.

در این پژوهش الگویی مناسب برای کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب در صنایع فرایندی تدوین شد. این الگو به نحوی تهیه شد که در تمام صنایع آب‌بر قابل استفاده باشد و حتی مهندسانی که آشنایی چندانی با روش مفهومی-ترسیمی کمینه‌سازی مصرف آب ندارند، بتوانند به راحتی مسائل پیچیده کمینه‌سازی مصرف آب واحد صنعتی خود را حل نمایند.

## References

- APHA, 2005, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21<sup>st</sup> Ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- Brouckaert, C. & Buckley, C., 2003, *The application of pinch analysis for the rational management of water and effluent in an industrial complex*, Water Research Commission Report, Pretoria, USA.
- Dunn, R. & Bush, G., 2001, "Using process integration technology for cleaner production", *Journal of Cleaner Production*, 9 (1), 1-23.
- Feng, X. & Deng, C., 2013, *Synthesis of water networks with water loss and gain via an extended pinch analysis technique minimisation of energy and water use, waste and emissions*, Woodhead Publishing, London, UK.

- Hallale, N., 2002, "A new graphical targeting method for water minimisation", *Advances in Environmental Research*, 6 (3), 377-390.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 1988, *Water sampling methods*, Standard: 2347. (In Persian)
- Juliana, F., Gomes, S., Eduardo, M., Queiroz, F. & Pessoa, L., 2007, "Design procedure for water/wastewater minimization: Single contaminant", *Journal of Cleaner Production*, 15 (5), 474-485.
- Khajian, N. & Shayegan, J., 2008, "Optimizing water treatment and wastewater treatment at oil refinery", MSc Thesis, Sharif University of Technology, Tehran. (In Persian)
- Khezri, S., Lotfi, F., Tabibian, S. & Erfani, Z., 2010, "Application of water pinch technology for water and wastewater minimization in aluminum anodizing industries", *International Journal of Environmental Science & Technology* 7 (2), 281-290.
- Manan, Z., Wan Alwi, S. & Ujang, Z., 2006, "Water pinch analysis for an urban System: A case study on the Sultan Ismail Mosque at the Universiti Teknologi Malaysia (UTM)", *Desalination*, 194 (1), 52-68.
- Manan, Z., Wan Alwi, S. & Ujang, Z., 2006, "Water pinch analysis for an urban system: A case study on the Sultan Ismail Mosque at the Universiti Teknologi Malaysia (UTM)", *Journal of Environmental Management* 194 (1-3), 52-68.
- Mann, J. & Liu, Y., 1999, *Industrial water reuse and wastewater minimization*, McGraw Hill, NewYork.
- Mehrdadi, N., NabiBidhendi, G. & Mohammadnejad, S., 2009, "An overview on different water pinch, methods for industrial water and wastewater minimization", *Environmental Sciences*, 6 (4), 29-42.
- Mohammadnejad, S., Ataei, A., NabiBidhendi, G., Mehrdadi, N., Ebadati, F. & Lotfi F., 2012, "Water pinch analysis for water and wastewater minimization in Tehran oil refinery considering three contaminants", *Environmental Monitoring Assessment*, 184 (5), 2709-2028.
- Mughees, W. & Al-Ahmad, M., 2015, "Application of water pinch technology in minimization of water consumption at a refinery", *Computers & Chemical Engineering* 73, 34-42.
- NabiBidhendi, G., Mehrdadi, N. & Mohammadnejad S., 2010, "Water and wastewater minimization in Tehran oil refinery using water pinch analysis", *International Journal of Environmental Research* 4 (4), 583-594.
- Priya, G. & Bandyopadhyay, S., 2016, "Multiple objectives pinch analysis resources", *Conservation and Recycling*, (In Persian).
- Qiao, Z., Minbo, Y., Guilian, L. & Xiao F., 2016, "Relative concentration based pinch analysis for targeting and design of hydrogen and water networks with single contaminant", *Journal of Cleaner Production* 112 (5), 4799-4814.
- Rafidah, S., Alwi, W. & Manan, Z., 2013, *Water pinch analysis for water management and minimisation: An introduction minimisation of energy and water use, waste and emissions*, Woodhead Publishing, Pretara, USA.
- Savelski, M. & Bagejewicz, M., 2000, "On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants", *Chemical Engineering Science*, 5 (21), 5035-5048.
- Tan, Y., Manan, Z. & Foo, D., 2002, "Water minimisation by pinch technology – water cascade table for minimum water and wastewater targeting", *paper Presented in 9th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCCHE 2002)*, New Zealand.
- Ujang, Z., Wong, L. & Manan, A., 2002, "Industrial wastewater minimization using water pinch analysis: A case study on an old textile plant", *Water Science Technology*, 46 (11-12), 77-84.
- Wan Alwi, S., Manan, Z., Samingin, M. & Misran, N., 2007, "A holistic framework for design of cost- effective minimum water utilization network", *Journal of Environmental Management*, 88 (2), 219-252.
- Winterbone, D. & Turan, A., 2015, *Pinch technology, advanced thermodynamics for engineers*, Elsevier Pub., Amsterdam, Netherlands.