

شبیه‌سازی اثرات نرخ تخلیه‌ی پساب گرم بر الگوی پیشروی پلوم گرمایی و دما در محل تخلیه‌ی پساب

پرستو اکبری^{۱*}، مسعود صدری نسب^۲، یدالله نیک‌پور^۳، علیرضا صفاهیه^۴

چکیده

کاربرد آب به‌عنوان خنک‌کننده در صنایع و تخلیه‌ی آن در محیط آبی سبب ایجاد آلودگی حرارتی خواهد شد. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار سه‌بعدی آب‌پویایی - بوم شناختی کوهیرنس استفاده شده است تا الگوی دمای محیط آبی تحت تأثیر تغییرات بده پساب گرم شبیه‌سازی گردد. شبیه‌سازی تا رسیدن به پایداری به مدت دو سال با استفاده از یک شبکه‌ی کارترین (۱۲۰×۴۰) و مختصات سیگما با ۵ تراز از سطح تا کف، داده‌های هواشناسی، مؤلفه‌های اصلی جزر و مد (O_1, K_1, M_2, S_2)، و اطلاعات مربوط به دما و بده خروجی پساب گرم اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که میزان بده پساب خروجی بر دما در محل تخلیه، و گسترش پلوم گرمایی در فصول مختلف، اثر خواهد داشت. میزان تغییرات دمای ایجادشده در محیط به‌وسیله‌ی پساب گرم به اختلاف دمای محیط و پساب بستگی دارد. همچنین، نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نیروی کوریولیس بر پلوم گرمایی اثر گذاشته، و پلوم و اثرات ناشی از آن را به سمت راست منحرف می‌کند. نتایج این شبیه‌سازی می‌تواند جهت مدیریت زیست‌محیطی آلودگی حرارتی، و همچنین، بهینه کردن کارایی سامانه خنک‌کننده‌ی صنایع استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، پساب گرم، میدان دما، سامانه‌ی خنک‌کننده.

^۱ دانش‌آموخته دکتری فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
Email: pakbari91@yahoo.com تلفن: ۰۹۱۶۳۰۰۳۹۷۰

^۲ دانشیار، گروه مهندسی ساحل، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

^۳ استادیار، گروه شیمی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

^۴ استادیار، گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

مقدمه

هر فعالیت صنعتی نیازمند برگرفتن موادی از طبیعت و دفع موادی دیگر در آن است؛ بنابراین، کلیه‌ی فعالیت‌های صنعتی باید در چارچوب ظرفیت‌های محدود محیط‌زیست مورد بررسی قرار گیرند تا به بقا و پایداری محیط‌زیست لطمه‌ای وارد نگردد. از جمله پدیده‌هایی که با فعالیت‌های صنعتی انسان در ارتباط است، تخلیه‌ی پساب حاصل از آب خنک‌کننده‌ی صنایع مختلف، از جمله نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها در ساحل است که به علت گرمای بیش‌ازحد نسبت به محیط آبی، سبب اختلالات مهمی در تعادل بوم‌سازگان موجود می‌گردد؛ به این پدیده آلودگی حرارتی^۱ گفته می‌شود (کوتانت، ۱۹۹۹).

آلودگی حرارتی اغلب با تخلیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی همراه است. مهم‌ترین منابع آلاینده حرارتی، نیروگاه‌های برق (سنگواره‌ای و هسته‌ای)، پالایشگاه‌ها، آب‌شیرین‌کن‌ها، صنایع کاغذی و صنایعی می‌باشند که دارای پسماندهای آلی بوده و به‌وسیله اکسایش مواد آلی، باعث آزاد شدن مقادیر زیادی حرارت می‌گردند (کوه و همکاران، ۱۹۷۴). اما مشکل گرم شدن رود از مدیریت نامناسب سیلاب‌ها و آب باران در مناطق توسعه‌یافته، تغییر آب‌وهوای زمین ناشی از فعالیت‌های بشر (محسنی و استفان، ۱۹۹۹) و عدم حفاظت از پوشش گیاهی در مناطق ساحلی (براون و کرایگیر، ۱۹۷۰) نیز ناشی می‌شود.

آلودگی حرارتی علاوه بر اثر نامطلوب بر آبزیان، به دلیل تشکیل مدار بسته حائز اهمیت است (چنگ و اینگ، ۲۰۰۷). انتقال آب گرم خروجی، به ورودی آب خنک‌کننده‌ی چگالنده^۲ را اصطلاحاً تشکیل مدار بسته می‌گویند (جوکار، ۱۳۸۶). از آنجا که آلودگی حرارتی می‌تواند سبب ایجاد تغییرات زیست‌محیطی عظیمی در محیط‌های آبی گشته و کارایی صنایع را نیز تحت تأثیر قرار دهد، لذا لازم است تا این پدیده و اثرات ناشی از آن شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در مدیریت محیط‌های آبی در جهت نیل به اهداف توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار سه‌بعدی آب‌پویایی و بوم‌شناختی کوهیرنس (لویتن، ۲۰۱۱) استفاده شده است

تا تخلیه‌ی گرمایی با بده‌های متفاوت، شبیه‌سازی و اثرات تغییر بده بر محیط آبی، محیط‌زیست و کارایی سیستم خنک‌کننده‌ی صنایع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، پیش‌بینی گردد. این نرم‌افزار سه‌بعدی و چند منظوره که برای سواحل دریا و رودخانه‌ها در نظر گرفته شده است، از شبکه محاسباتی ساختاریافته^۳ از نوع آراکواسی^۴ استفاده می‌کند و معادلات اندازه حرکت، پیوستگی، دما، شوری و چگالی در دو و سه بعد را با روش جداسازی تفاضل محدود حل می‌کند. اثرات چگالی در معادلات اندازه حرکت و آشفتگی، به‌واسطه‌ی یک معادله‌ی حالت در نظر گرفته می‌شود و اثر برهم‌کنش موج - جریان بر تنش‌های برشی کف با استفاده از معادلات توصیف شده به‌وسیله سیگنل و همکاران (۱۹۹۰)، دیویس و لارنس (۱۹۹۴) به حساب آورده می‌شود.

در ارتباط با شبیه‌سازی عددی آلودگی حرارتی می‌توان به مطالعات کینوچی و همکاران (۲۰۰۷) و سهگال و جالوریا (۱۹۸۲) اشاره کرد.

از میان مطالعات اخیر می‌توان به پژوهش چنگ و اینگ (۲۰۰۷) که به بررسی میدان جریان و الگوی انتشار گرما، تحت تأثیر تخلیه‌ی پساب گرم در شرایطی که محل برداشت آب سرد و تخلیه‌ی پساب گرم در یک سمت حوضه واقع شده باشند، اشاره کرد. مطالعه‌ی آنان نشان می‌دهد که دما در محل برداشت آب سرد از فراسنج‌هایی مانند عدد فرود پساب گرم خروجی، نسبت بده پساب گرم به بده حوضه و فاصله‌ی قائم بین محل تخلیه‌ی پساب و محل برداشت آب سرد تأثیر می‌پذیرد. یولیانگ و همکاران (۲۰۱۱) اثر سرعت و دمای تخلیه‌ی پساب و نیز زاویه‌ی لوله‌ی تخلیه‌ی آن را بر الگوی انتشار پلوم گرمایی به وسیله‌ی شبیه‌سازی دوبعدی $k-\epsilon$ turbulence بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان می‌دهند که زاویه‌ی لوله‌ی تخلیه‌ی پساب گرم و سرعت و دمای تخلیه می‌تواند بر وضعیت جریان بالادست تأثیرگذار باشد. مادرچ و همکاران (۲۰۰۸) نیز انتشار و اختلاط آبی که در صنایع به عنوان خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفته را در محیط آبی اعم از رود و دریا بررسی کردند. در پژوهش آنها بر ضرورت انجام مطالعات جامع‌تر به‌منظور بررسی

³ Structure

⁴ Arakawa C-grid

¹ Thermal Pollution

² Condenser

تأسیسات دارند؛ لذا منطقه‌ی مزبور برای انجام این مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱).

معادلات اساسی حاکم

معادله‌های شبیه‌سازی در مختصات دکارتی (X_1, X_2, X_3) یا در مختصات کروی (λ, Φ, X_3) قابل اجرا است. در سیستم دکارتی از تقریب صفحه‌ی ثابت f (بسامد کوریولیس یکسان) استفاده شده که محورهای (X_1, X_2) می‌توانند در صفحه افقی بچرخند. سطح دریا می‌تواند آزادانه حرکت کند. مختصات عمودی $X_3=0$ سطح متوسط آب دریا را انتخاب می‌کند. در انجام این تحقیق از مختصات دکارتی استفاده شده است. معادله‌های سطح آزاد و کف دریا به صورت زیر است:

$$x_3 = \xi(x_1, x_2, t) \quad (1)$$

$$x_3 = -h(x_1, x_2) \quad (2)$$

$$H = h + \xi \quad (3)$$

که ξ ارتفاع سطح دریا، h عمق متوسط آب، H عمق کلی آب و t زمان است. قسمت آب پویایی شبیه‌سازی از معادله‌های اساسی زیر استفاده می‌کند:

معادله‌های اندازه حرکت با استفاده از تقریب بوزینسک و با فرض توازن آب ایستایی عمودی.

معادله‌ی پیوستگی

معادله‌های فرارفت دما

معادله‌های اولیه شبیه‌سازی، معادلات ناویر استوکس است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} (v_T \frac{\partial u}{\partial x_3}) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{21} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} (v_T \frac{\partial v}{\partial x_3}) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{22} \quad (5)$$

معادله‌ی توازن هیدروستاتیک عمودی:

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad (6)$$

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0 \quad (7)$$

تغییرات فصلی پدیده‌ی آلودگی حرارتی و همچنین، بهینه‌سازی میزان بده خروجی صنایع به گونه‌ای که کمترین کاهش کارایی در سامانه آب خنک‌کننده رخ دهد، و نیز کمترین اثر سوء بر محیط‌زیست وارد شود، تأکید شده است. کیم و جو کیم (۲۰۱۴) از یک شبیه‌ساز حجم محدود^۱ و داده‌های اندازه‌گیری استفاده کردند تا رفتار پلوم گرمایی را در قسمت ساحلی پیش بینی کنند. نتایج آنان نشان می‌دهد که الگوی انتشار پلوم گرمایی به عمق تخلیه‌ی پساب گرم بستگی دارد. ایساخوف (۲۰۱۵) با استفاده از یک شبیه‌سازی ریاضی اثرات تخلیه‌ی پساب گرم حاصل از یک نیروگاه را بر محیط آبی بررسی کردند. خطوط هم‌دمای حاصل از نتایج شبیه‌سازی آن‌ها، انحراف پلوم گرمایی به سمت راست به موازات ساحل را نشان می‌دهد.

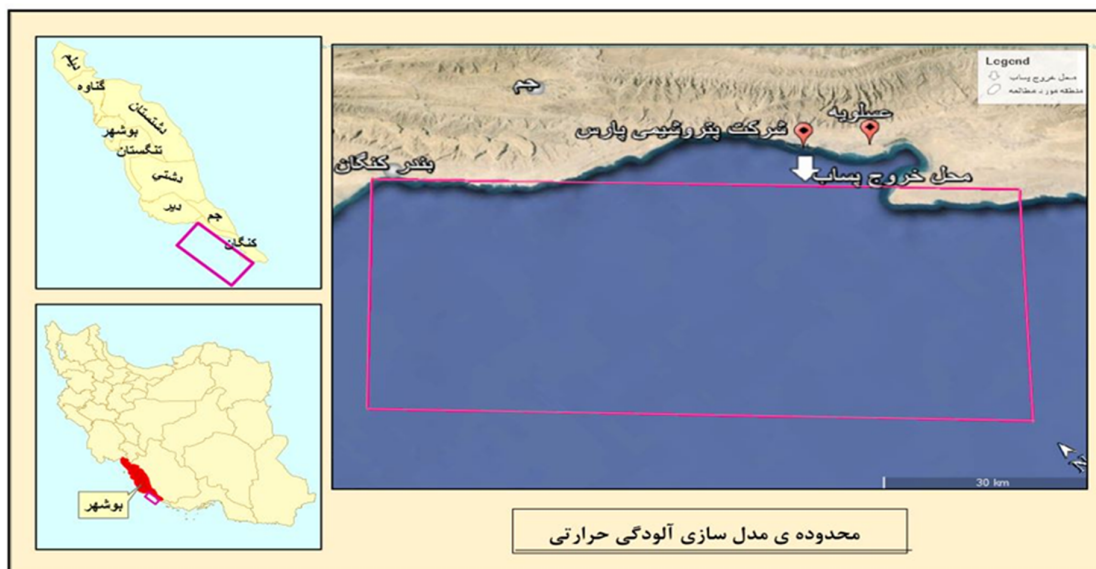
با توجه به حضور پهنه‌های آبی گسترده در مرزهای شمالی و جنوبی ایران، همچنین گسترده‌گی و رشد روزافزون صنایع مختلف در سواحل آنها، لازم است که پدیده‌ی آلودگی حرارتی مورد مطالعه قرار گیرد. چراکه در طرح‌های توسعه‌ای، افزایش ظرفیت صنایع موجب افزایش آب مصرفی به‌عنوان خنک‌کننده، و به تبع آن افزایش حجم پساب گرم می‌شود؛ مدیریت این افزایش حجم به‌نحوی که حداقل اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی را داشته، و از ایجاد چرخه بسته جلوگیری شود، حائز اهمیت است. با توجه به مرور منابع صورت گرفته در ایران، این مطالعه یکی از اولین مطالعات در این زمینه است که هدف آن تعیین اثرات طرح‌های توسعه‌ای صنایعی همچون نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها بر دمای محیط آبی، به علت افزایش تخلیه‌ی پساب گرم است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

یکی از مناطق صنعتی در جنوب استان بوشهر، منطقه‌ی عسلویه است. پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و نیروگاه در این منطقه استقرار دارند. با توجه به ظرفیت رو به رشد این واحدهای صنعتی، و امکان اضافه شدن مرحله‌های جدید به آنها و با توجه به این‌که پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها بیشترین برداشت آب را به‌منظور خنک‌سازی

¹ Finite Volume



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (محدوده شبیه‌سازی آلودگی حرارتی).

معادله‌ی فرارفت دما:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} + w \frac{\partial T}{\partial x_3} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_3}) \quad (8)$$

که (u, v, w) اجزاء جریان، T دما، $f = 2\Omega \sin \phi$ بسامد کوریولیس، $\Omega = \frac{2\pi}{86146}$ (rads⁻¹) بسامد چرخش زمین، g شتاب گرانش، P فشار، λ_T و λ_H ضرایب پخش و لزجت گردابی، λ_H ضریب پخش افقی برای دما، ρ چگالی، ρ_0 چگالی مرجع و C_p گرمای ویژه آب دریا در فشار ثابت است. اجزاء افقی تانسور تنش یعنی

$$\begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} \\ \tau_{21} & \tau_{22} \end{bmatrix}$$

به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{11} = 2\nu_H \frac{\partial u}{\partial x_1} \quad (9)$$

$$\tau_{21} = \tau_{12} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{22} = 2\nu_H \frac{\partial v}{\partial x_2} \quad (11)$$

که ν_H ضریب پخش افقی برای اندازه‌ی حرکت است که مقدار پیش فرض آن در شبیه‌سازی مطابق مطالعه اویی و چن در سال ۱۹۹۲ برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این از معادله حالت، که طبق گزارش یونسکو در سال ۱۹۸۱ ارائه شده و در جداول اقیانوس‌شناسی نیز

آمده است، استفاده شد. رابطه (۱۲)، معادله حالت استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد:

$$\rho(T, S) = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 + a_6 T^5 + S(a_7 + a_8 T + a_9 T^2 + a_{10} T^3 + a_{11} T^4) + s^{3/2}(a_{12} + a_{13} T + a_{14} T^2) + a_{15} S^2 \quad (12)$$

که ρ چگالی بر حسب kg m^{-3} ، S شوری بر حسب psu و T دما بر حسب $^{\circ}\text{C}$ است. اندازه فراسنج‌های معادله حالت به صورت جدول ۱ تعریف می‌شود.

معادلات در مختصات σ

حل عددی معادله‌های شبیه‌سازی با تبدیل مختصات عمودی به مختصات جدید σ امکان‌پذیر خواهد بود. تبدیل مختصات به صورت رابطه‌ی (۱۳) است:

$$(\tilde{t}, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (t, x_1, x_2, Lf(\sigma)) \quad (13)$$

که:

$$\sigma = \frac{x_3 + h}{\xi + h} = \frac{x_3 + h}{H} \quad (14)$$

معمولاً مختصات σ بین ۰ در کف و ۱ در سطح مشخص می‌شود یعنی $f(1)=1$, $f(0)=0$. شکل ساده معادله کف $x_3=0$ بوده و تغییر حرکت سطح در $x_3=L$ انجام می‌شود (لویتن، ۲۰۱۱).

جدول ۱- فراسنج‌های رابطه‌ی معادله حالت (لویتن، ۲۰۱۱).

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$999/842594$	$6/7939 \times 10^{-2}$	$-9/0952 \times 10^{-3}$	$1/001685 \times 10^{-4}$	$-1/12008 \times 10^{-6}$
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
$6/5363 \times 10^{-2}$	$0/824493$	$-4/0899 \times 10^{-3}$	$7/6438 \times 10^{-5}$	$-8/2467 \times 10^{-7}$
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
$5/3875 \times 10^{-9}$	$-5/72466 \times 10^{-4}$	$1/0227 \times 10^{-4}$	$-1/6546 \times 10^{-6}$	$4/8314 \times 10^{-4}$

جدول ۲- دامنه و مرحله مؤلفه‌های جزر و مدی به کار رفته در شبیه‌سازی.

K_1	S_2	O_1	M_2	مؤلفه‌های جزر و مدی
۲۸۰	۲۶۵	۲۳۸	۲۱۱	مرحله (Deg)
۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۲	۰/۳۴	دامنه (m)

ابتدا اجرای شبیه‌سازی برای ۲ سال و با بده پساب $60 \text{ m}^3/\text{s}$ انجام گرفت. پس از رسیدن شبیه‌سازی به پایداری، شبیه‌سازی برای ۱ سال دیگر انجام شد. میدان دما تحت تأثیر ورود پساب گرم با بده ذکر شده، به صورت خطوط منحنی میزان دما به کمک نرم‌افزار فرتر^۱ ترسیم گردید (هانکین و دنهام، ۲۰۰۶). از آن جایی که انتظار می‌رود میدان دما تحت تأثیر میزان آشفتگی پساب خروجی و عدد رینولدز باشد؛ برای این منظور شبیه‌سازی برای سه مقدار متفاوت بده پساب خروجی $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $180 \text{ m}^3/\text{s}$ ، که معادل با اعداد رینولدز $7/64 \times 3, 10^6/82 \times 10^6$ و $11/46 \times 10^6$ است، اجرا شد.

نتایج و بحث

اثر تغییر بده، و در نتیجه تغییر سرعت پساب گرم خروجی بر میدان دما، به‌وسیله خطوط منحنی میزان دما، در فصول مختلف در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است. کاهش دما در جهت جریان پساب خروجی برای مقادیر متفاوت بده و برای دو فصل زمستان و تابستان، به‌صورت میانگین‌گیری شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. رنگ آبی، قرمز و مشکی به ترتیب نیمرخ دما به ازای بده $180 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $120 \text{ m}^3/\text{s}$ و $60 \text{ m}^3/\text{s}$ را نشان می‌دهند.

شبیه‌سازی به‌صورت سه‌بعدی در مختصات دکارتی تحت سیستم عامل لینوکس، با تقریب صفحه ثابت f (بسامد کوریولیس یکسان) اجرا شده است. طول و عرض جغرافیایی مرجع در شبیه‌سازی 53°E و 27°N است. این شبیه‌سازی از یک شبکه 40×120 استفاده می‌کند. دقت شبیه‌سازی در جهت X و Y (1000 m) بوده و عمق حداکثر 20 m در آن به‌کاررفته است. همچنین، از ۵ لایه‌ی عمودی در مختصات σ استفاده شده است. مرز باز اقیانوس به طول 40 km و 40 km در شبیه‌سازی تعریف شده است. در ساحل و در فاصله 26 کیلومتری از مرز، مرز باز دیگری به‌عنوان محل تخلیه‌ی پساب در نظر گرفته شده است. دمای پساب خروجی 35°C است.

شبیه‌سازی از داده‌های جوی روزانه مرکز هواشناسی منطقه بوشهر (جهت و اندازه‌ی سرعت باد، دمای هوا، رطوبت ویژه، پوشش ابر، بارش و تبخیر) و اطلاعات مربوط به دمای آب آن منطقه استفاده می‌نماید. دمای آب مرجع متناسب با زمان شروع اجرای برنامه که دی است و مطابق با گزارش ایزر د پناهی و همکاران در سال 1386 ، 19°C و تغییرات فصلی دما نیز در مرزهای باز مطابق با همین گزارش در نظر گرفته شده است (ایزر د پناهی و همکاران، 1386).

مطابق نتیجه‌ی پژوهش نجفی (۱۹۹۷)، دو مؤلفه‌ی نیم‌روزانه‌ی اصلی در خلیج فارس مؤلفه‌ی قمری (M_2) و خورشیدی (S_2) و دو مؤلفه‌ی روزانه‌ی اصلی، مؤلفه‌ی قمری (O_1) و خورشیدی (K_1) است. بنابراین شبیه‌سازی از این چهار مؤلفه‌ی جزر و مدی مربوط به خلیج بوشهر استفاده می‌کند که اندازه دامنه و مرحله آن در شبیه‌سازی به کار رفته است. این اطلاعات در جدول ۲ بیان شده است.

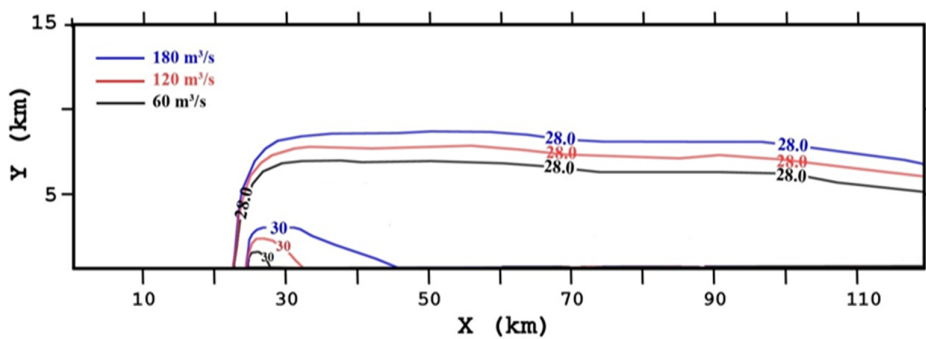
همان‌طور که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشخص است، پلوم گرمایی در تمامی فصول به سمت راست چرخیده است. این پدیده به علت اثر نیروی کوریولیس است؛ زیرا با محاسبه‌ی عدد راسبی که فراسنجی برای تعیین مقیاس پدیده‌های اقیانوسی است، مشخص می‌شود که پدیده‌ی مورد مطالعه بزرگ مقیاس است؛ بنابراین، نیروی کوریولیس می‌تواند آن را تحت تأثیر قرار دهد. بزرگ‌ترین مقدار سرعت به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی 0.7 m/s است که با توجه به طول حوضه که 120 km در نظر گرفته شده است و با منظور کردن مقدار تقریبی $10 \times 7/25 \text{ rad/s}$ برای سرعت چرخش زمین، عدد راسبی برای پدیده‌ی مورد بررسی ما 0.4 به دست می‌آید. شرط بزرگ مقیاس بودن یک پدیده در اقیانوس، این است که عدد راسبی به‌دست‌آمده برای آن از ۱ کوچک‌تر باشد (پدلاسکی، ۱۹۸۷)؛ بنابراین نیروی کوریولیس در نیمکره شمالی، پلوم گرمایی را به راست منحرف می‌کند. یولیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ و ایساخوف در سال ۲۰۱۵ نیز در نتایج شبیه‌سازی خود انحراف پلوم گرمایی به سمت راست را مشاهده کردند.

همان‌طور که از مقایسه‌ی شکل‌های ۲ تا ۵ مشخص است، میزان تفاوت دما بین حوضه و منطقه‌ی تخلیه‌ی پساب و همچنین گسترش پلوم گرمایی در تابستان، کم‌تر از سه فصل دیگر است، که این نتیجه به دلیل اختلاف دمای کم بین حوضه و پساب گرم در این فصل است. این نتیجه با مطالعه‌ی مادرچ و همکاران در سال ۲۰۰۸ توافق دارد.

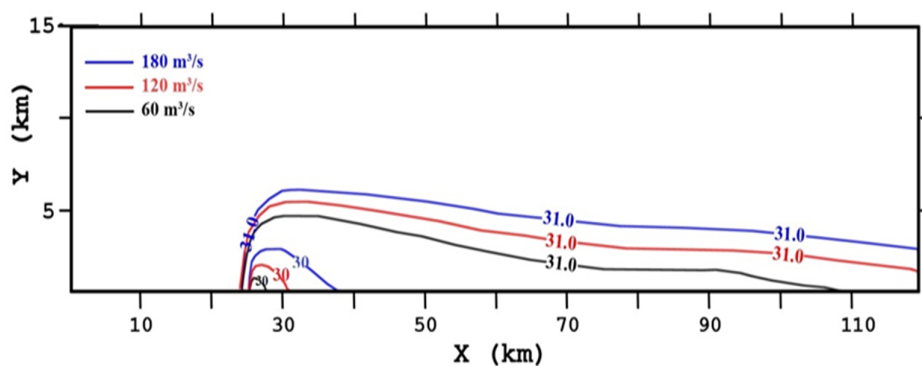
همچنین، در هر فصل میزان پیش روی منحنی میزان‌های هم‌دما در محیط آبی با بده پساب گرم رابطه مستقیم دارد؛ زیرا افزایش بده پساب گرم و ثابت بودن مساحت مقطع محل تخلیه‌ی پساب، سرعت تخلیه‌ی پساب را افزایش داده، و عدد رینولدز و میزان آشفتگی نیز افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش سرعت و میزان اختلاط گشته، و در نتیجه، انتقال گرما به لایه‌های مجاور در مجموعه‌ی آبی را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین، خطوط هم‌دما پیش روی بیش‌تری در محیط آبی خواهند داشت، و پراکنندگی آنها به‌عنوان تابعی از بده و مقدار گرمای تزریق‌شده به سامانه افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود که مساحت بیش‌تری از سطح حوضه درگیر

پدیده‌ی آلودگی حرارتی گردد. افزایش بده و انتقال خطوط هم‌دما به سمت خارج از محل تخلیه‌ی پساب گرم باعث می‌شود که دما در محل برداشت آب سرد (چنانچه این محل در منطقه‌ی درگیر در پدیده‌ی آلودگی حرارتی واقع باشد) نیز افزایش یابد، که این افزایش دما موجب کاهش کارایی سامانه خنک‌کننده صنایع خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتیجه‌ی چنگ و اینگ در سال ۲۰۰۷ و یولیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ به خوبی مطابقت دارد. یولیانگ و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود با بررسی وضعیت جریان و دمای محیط آبی تحت تأثیر تخلیه‌ی پساب گرم به این نتیجه رسیدند که بده و دمای پساب گرم، دمای آب در محل برداشت آب سرد را تحت تأثیر قرار داده، و سبب می‌گردد چنانچه محل برداشت آب سرد در طرف بالادست جریان خروجی قرار گیرد، موجب کاهش اثر خنک‌کنندگی سامانه آب خنک‌کننده شود.

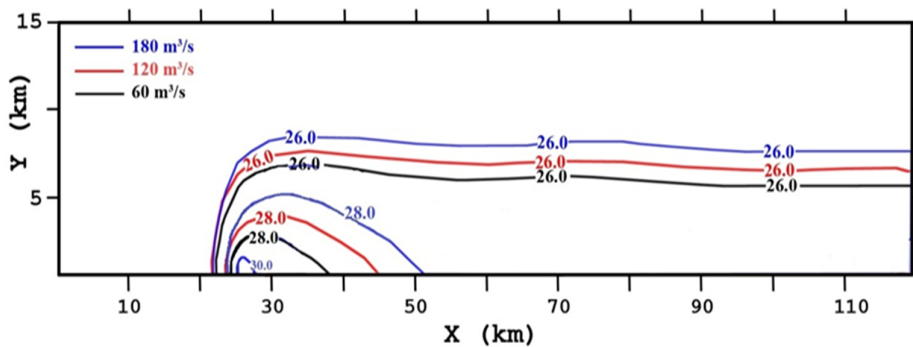
در شکل‌های ۶ و ۷، روند تغییرات دما در جهت جریان پساب خروجی برای مقادیر متفاوت بده، و برای دو فصل تابستان و زمستان، نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، این تغییرات کاهش‌ی است؛ زیرا وقتی آب گرم از محل تخلیه‌ی پساب به درون حوضه جریان می‌یابد، دمای آن به دلیل انتقال انرژی گرمایی به محیط (هوا و لایه‌های مجاور آب) کاهش می‌یابد، تا به مقدار تعادل خود (دمای حوضه) برسد. همان‌طور که با مشاهده دو شکل مذکور مشخص می‌شود، برای مقادیر کوچک بده، آب در مسافت کمتری از محل تخلیه‌ی پساب گرم به مقدار تعادلی خود می‌رسد؛ زیرا در این شرایط، گرمای تزریق‌شده به سامانه آبی کمتر است، و آب سریع‌تر به شرایط دمایی اولیه خود بازگردد، درحالی‌که با افزایش بده، همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، رسیدن به دمای ثابت در فاصله‌ی بیش‌تری از محل تخلیه‌ی پساب گرم صورت می‌گیرد. این نتایج نیز با دستاورد یولیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ توافق دارد. هرچه سرعت تخلیه‌ی پساب بیشتر باشد، در فاصله‌ی بیش‌تری از محل تخلیه‌ی پساب گرم، دما به مقدار اولیه‌ی محیط باز می‌گردد. بنابراین، منطقه‌ی درگیر در پدیده‌ی آلودگی حرارتی با افزایش سرعت تخلیه‌ی پساب گرم، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است،



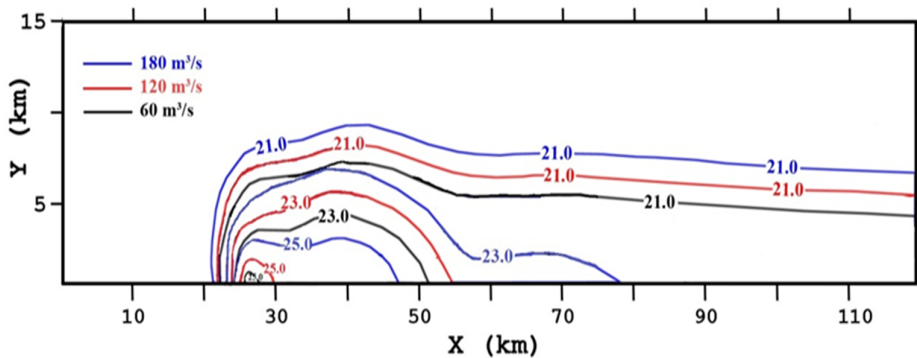
شکل ۲- اثر تغییر بده پساب گرم بر میدان دما در فصل بهار.



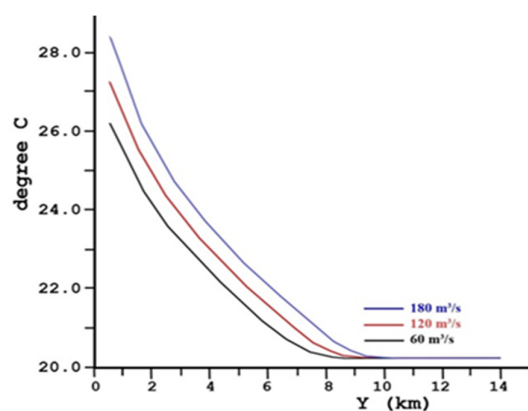
شکل ۳- اثر تغییر بده پساب گرم بر میدان دما در فصل تابستان.



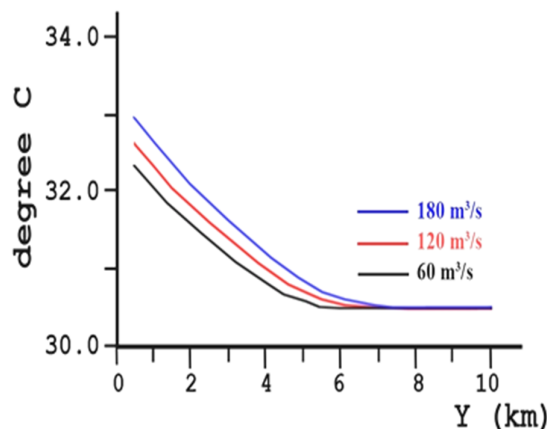
شکل ۴- اثر تغییر بده پساب گرم بر میدان دما در فصل پاییز.



شکل ۵- اثر تغییر بده پساب گرم بر میدان دما در فصل زمستان



شکل ۷- نیمرخ تغییرات دما در جهت جریان پساب خروجی برای مقادیر متفاوت بده در زمستان



شکل ۶- نیمرخ تغییرات دما در جهت جریان پساب خروجی برای مقادیر متفاوت بده در تابستان.

محیط‌زیست ارائه شده در سال ۱۳۷۷ در مورد دمای تخلیه به آب‌های سطحی در تبصره چهار چنین آمده است که درجه حرارت باید به میزانی باشد که بیش از ۳ درجه سانتی‌گراد در شعاع ۲۰۰ متری محل ورود آن، درجه حرارت منبع پذیرنده را افزایش یا کاهش ندهد (مقیمی و همکاران، ۱۳۸۳)؛ بنابراین، تنها در فصل تابستان که تفاوت میان دما در محل تخلیه‌ی پساب گرم و کل حوضه کم است؛ معیار محیط‌زیست در ارتباط با تخلیه‌ی پساب گرم، آن هم در تخلیه با بده ۶۰ مترمکعب بر ثانیه رعایت می‌شود. برای رعایت معیارها پیشنهاد می‌شود از یک حوضچه خنک‌کننده استفاده گردد، و پساب گرم به‌طور مستقیم به بوم‌سازگان دریا وارد نشود. همچنین، از نتایج این تحقیق می‌توان در بهینه کردن کارایی سامانه خنک‌کننده‌ی صنایع به‌گونه‌ای که تشکیل چرخه بسته در مدار آب خنک‌کننده، کارایی نیروگاه را تحت تأثیر قرار ندهد؛ بهره برد. این کار بوسیله‌ی تعیین محل مناسب برای برداشت آب سرد امکان‌پذیر است؛ به‌گونه‌ای که این محل در منطقه‌ی درگیر در آلودگی حرارتی واقع نباشد. همان‌طور که بررسی حاضر نشان می‌دهد؛ زمانی که تخلیه‌ی پساب و گسترش آن در محیط آبی به‌عنوان یک پدیده‌ی بزرگ مقیاس، متأثر از نیروی کوریولیس است، بروز اثرات آن در سمت راست محل تخلیه رخ می‌دهد. در این صورت می‌توان با در نظر گرفتن محل برداشت آب سرد در سمت چپ محل تخلیه‌ی پساب، احتمال تشکیل چرخه بسته را در مدار آب خنک‌کننده کاهش داد. با توجه به این که افزایش بده

شیب تغییرات دما در زمستان بیشتر از تابستان است و این امر به دلیل اختلاف دمای زیاد بین حوضه و پساب گرم در زمستان است. نتیجه‌ی دیگری نیز که در این دو شکل مشاهده می‌شود، افزایش دما در محل تخلیه‌ی پساب گرم همزمان با افزایش بده آن است. در واقع، دما در محل تخلیه‌ی پساب گرم یک دمای تعادلی است که به دما و بده پساب گرم و دمای حوضه بستگی دارد. با افزایش بده، و در نتیجه افزایش حجم آب گرم واردشده به حوضه، دما در محل تخلیه نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، بازه‌ی تغییرات دما در محل تخلیه‌ی پساب گرم تحت تأثیر بده‌های متفاوت، در زمستان نسبت به تابستان گسترده‌تر است. این بازه در تابستان از $32/3^{\circ}\text{C}$ تا 33°C و در زمستان از $26/3^{\circ}\text{C}$ تا $28/5^{\circ}\text{C}$ است؛ زیرا در زمستان تفاوت دمای پساب گرم و دمای حوضه بیشتر است و از آنجاکه دمای تعادل باید بین این دو دما باشد، تحت تأثیر تغییر بده پساب گرم، دمای تعادل (دما در محل تخلیه‌ی پساب گرم) می‌تواند در زمستان در بازه‌ی وسیع‌تری جابجا شود؛ درحالی‌که در تابستان این شرایط وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق می‌تواند در مهار اثرات زیست‌محیطی آلودگی حرارتی، و تخمین محدوده‌ی منطقه‌ی درگیر در این آلودگی، استفاده گردد. با توجه به این‌که بر طبق ضوابط و معیارهای سازمان حفاظت

- 4) Brown, G. W., & Krygier, J. T. 1970. Effects of clear-cutting on stream temperature. *Water resources research*. 6: 1133-1139.
- 5) Cheng, Y. L., & Ying, B. F. 2007. Numerical simulation and comparison of water intake-outlet methods in power plants. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 19(5): 623-629.
- 6) Coutant, C. C. 1999. Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters (No. ORNL/TM-1999/44). Oak Ridge National Lab., TN (US).
- 7) Davies, A. M., & Lawrence, J. 1994. Examining the influence of wind and wind wave turbulence on tidal currents, using a three-dimensional hydrodynamic model including wave-current interaction. *Journal of Physical Oceanography*, 24(12): 2441-2460.
- 8) Hankin, S., & Denham, M. 2006. FERRET User's Guide. Version 6. NOAA/PMEL-TMAP, 592 pp. Available via http://vis.lbl.gov/NERSC/Software/ferret/docs/ferret_users_guide_v600.pdf.
- 9) Issakhov, A. 2015. Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*.
- 10) Kim, H. J., & Kim, J. 2015. Numerical Modeling Of OTEC Thermal Discharges In Coastal Waters. *International Conference of Hydroinformatics*.
- 11) Kinouchi, T., Yagi, H., & Miyamoto, M. 2007. Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater. *Journal of Hydrology*, 335(1), 78-88.
- 12) Koh, R., Brooks, N., List, E., & Wolanski, E. J. 1974. Hydraulic modeling of thermal outfall diffusers for the San Onofre nuclear power plant. WM Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology. Pasadena, California. Rep.No. KH-R-30.
- 13) Luyten, P. 2011. COHERENS — A coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation. Version 2.0.: RBINS-MUMM Report, Royal Belgian Institute of the Natural Sciences.
- 14) Maderich, V., Heling, R., Bezhenar, R., Brovchenko, I., Jenner, H., Koshebutskyy, V., & Terletska, K. 2008. Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water

سبب می شود که خطوط هم دما به سمت خارج از محل تخلیه گسترش یابند، پیشنهاد می شود، در مواردی که با راه اندازی واحد جدید در صنایع و نیروگاه ها، افزایش بده پساب گرم رخ می دهد؛ ضمن بررسی تغییر دما در محل برداشت آب سرد، چنانچه این محل در منطقه ی درگیر در پدیده ی آلودگی حرارتی واقع است، با افزایش فاصله ی محل برداشت آب سرد از محل تخلیه ی پساب گرم، از تشکیل چرخه بسته در مدار آب خنک کننده واحد صنعتی جلوگیری گردد. همچنین، با توجه به تأثیر بده پساب خروجی بر دما در محل تخلیه ی پساب گرم، بهتر است در مواردی که نیاز به افزایش بده پساب گرم وجود دارد، بده افزایش یافته در محلی غیر از محل اولیه تخلیه ی پساب گرم، تخلیه شود، تا افزایش دما در محل تخلیه مهار شده و بار حرارتی در یک نقطه متمرکز نشود. علاوه بر آن، با تخلیه ی پساب گرم در عمق نیز می توانیم زمینه ی اختلاط پساب گرم را با آب های مجاور، و در نتیجه کاهش بیشتر دمای آن فراهم کنیم. اختلاط ذکر شده می تواند به وسیله ی جریان های همرفت ایجاد گردد. همچنین، با توجه به اینکه طبق نتایج به دست آمده در این بررسی، شدت آلودگی حرارتی در فصل های سرد بیشتر است، مهار شرایط زیست محیطی در محل تخلیه ی پساب در این فصول از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

منابع

- ۱) ایزدپناهی، غ.، آیین جمشید، خ.، عوفی، ف.، اسدی سامانی، ن.، حق شناس، الف.، محمدنژاد، ج.، امیری، س. و پورنگ، ن.، ۱۳۸۶. گزارش نهایی بررسی هیدرولوژی و هیدروبیولوژی خلیج فارس در محدوده آب های استان بوشهر. مؤسسه تحقیقات شیلات، ص. ۲۱۰.
- ۲) جوکار، ک.، ۱۳۸۶. مدل سازی آلودگی حرارتی نیروگاه اتمی بوشهر، ششمین همایش ملی انرژی، تهران، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو، http://www.civilica.com/Paper-NEC06-NEC06_130.html.
- ۳) مقیمی، پ.، کیهان، ک.، عباسپور، م. و جاوید، الف.، ۱۳۸۳. بررسی آلودگی حرارتی طرح توسعه نیروگاه بندرعباس با استفاده از مدل MIKE21 و ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی طرح توسعه. ششمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی.

- transport and mixing in the inland and coastal waters. *Hydrological processes*, 22(7): 1000-1013
- 15) Mohseni, O., & Stefan, H. 1999. Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation. *Journal of Hydrology*, 218: 128-141.
- 16) Najafi, H. S. 1997. Modelling tides in the Persian Gulf using dynamic nesting, PhD thesis, University of Adelaide, Adelaide, South Australia.
- 17) Oey, L. Y., & Chen, P. 1992. A nested grid ocean model: With application to the simulation of meanders and eddies in the Norwegian Coastal Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 97(C12): 20063-20086.
- 18) Pedlosky, J. 1987. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer Verlag, Berlin.
- 19) Sehgal, R. C., & Jaluria, Y. 1982. Horizontal recirculation in water bodies due to thermal discharge. *Journal of Energy*. 7(5): 419-428.
- 20) Signell, R.P., Beardsley, R.C., Graber, H.C., and Capotondi, A. 1990. Effect of wave-current interaction on wind-driven circulation in narrow, shallow embayments. *Journal of Geophysical Research*, 95: 9671-9678.
- 21) UNESCO, 1981. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. UNESCO Technical Papers in Marine Science No. 36, UNESCO, Paris.
- 22) You-liang, C., Qing-zhe, H., & Li-li, L. 2011. The effect of velocity and outlet angle of the thermal discharge on its diffusion with basic flow in power plant. *Procedia Environmental Sciences*, 11: 611-617.