

## برآورد انرژی الکتریکی حاصل از جزرومد در خور دورق

امیر اشتری لرکی<sup>۱</sup>، مسعود صدری نسب\*<sup>۱</sup>، ماتیاس تامچک<sup>۲</sup>، وحید چگینی<sup>۳</sup>، عامر کعبی<sup>۴</sup>

۱. گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۲. گروه اقیانوس شناسی فیزیکی، دانشگاه فلیندرز

۳. پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی

۴. دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

### چکیده

خور دورق در قسمت انتهایی شمال غربی خور موسی در جنوب غربی ایران واقع گردیده است. موج جزرومدی وارد شده از خلیج فارس به این خور بر اثر پدیده تشدید به دامنه ای در حدود شش متر می رسد. نوع جزرومد در این خور آمیخته (نیم روزانه نا برابر) است. در این مطالعه جزرومد در خور دورق توسط قسمت هیدرودینامیکی مدل کوهیرنس شبیه سازی گردیده و با استفاده از رابطه بین سطح آب و انرژی پتانسیل، میزان الکتریسیته قابل استحصال در حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مورد استفاده براساس مختصات سیگمای عمودی، متشکل از سه لایه می باشد. در ساده ترین حالت می توان در سطح مقطع خور دورق فرعی به طور متوسط ۳۲ مگاوات و با بازده ۳۵ درصد ۱۱/۲ مگاوات انرژی الکتریکی استحصال نمود. با نصب توربین های دو طرفه، می توان هم در حالت جزر و هم در حالت مد الکتریسیته تولید نمود و در صورت تقسیم حوزه آبی مورد نظر به دو حوضچه مجزا امکان تولید الکتریسیته در تمام ساعات شبانه روز وجود دارد.

با احداث سد در مقطع خور دورق اصلی حوضچه ای طبیعی با مساحت ۲۰ کیلومتر مربع ایجاد شده، امکان استحصال ۲۵ مگاوات الکتریسیته در شبانه روز را فراهم میکند. در ادامه، با فرض لایروبی و خاک برداری خورها و اراضی احاطه شده با خورهای زنگی و دورق، مدل برای حوضچه هایی به مساحت های ۶۰، ۲۹ و ۱۱۰ کیلومتر مربع اجرا گردید. نتایج محاسبات نشان می دهد که امکان تولید به ترتیب ۱۳۶، ۷۴، ۳۶ و ۱۳۶ مگاوات الکتریسیته در حالت های مذکور می باشد.

**واژگان کلیدی:** انرژی های تجدید پذیر، جزرومد، خور دورق، شبیه سازی عددی، بندر امام خمینی

\*نویسنده مسوول، پست الکترونیک: masoud.sadri@kmsu.ac.ir

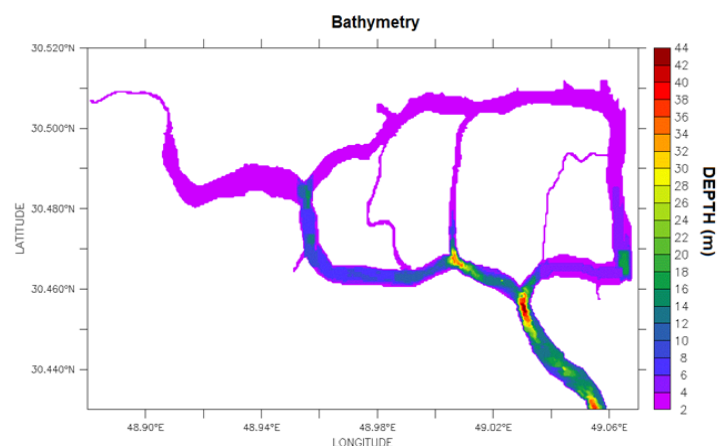
## ۱. مقدمه

اقیانوس ها با فرایندهای مختلف فیزیکی انرژی را دریافت و ذخیره نموده، سپس آن را از دست می دهند. اقیانوس ها منابع عظیمی از انرژی حرکتی اند که به صورت امواج ناشی از باد، جزر و مد جریان های ناشی از اختلاف دما و شوری دیده می شوند.

تقریباً تمام انرژی های تجدید پذیر از تابش خورشید منشا می گیرند و انرژی جزر و مد در این مورد استثناء است. منشا این پدیده به اثر گرانشی ماه و خورشید مربوط است. بدون شک در بین پدیده های طبیعی که جهت استحصال انرژی مورد استفاده قرار می گیرند، جزر و مد بالاترین تداوم و قابلیت پیش بینی را دارا است. باید توجه داشت که امکان ذخیره الکتریکی محدود است و پاسخ گویی مطمئن به نیاز انرژی در ساعت های اوج مصرف تنها با منابع مداوم و قابل پیش بینی امکان پذیر است. اقیانوس ها، منابعی عظیم از انرژی حرکتی اند که به صورت امواج، جزر و مد و جریانهای همیشگی سطحی یا زیرآبی ناشی از اختلاف حرارت نقاط گوناگون، دیده می شود. بررسی به کارگیری انرژی امواج، پیشینه ای طولانی ندارد و تنها چند دهه است که پژوهش ها در این زمینه آغاز شده، اما بهره گیری از انرژی حاصل از اختلاف حرارتی در اقیانوس ها، به سال ۱۹۲۹ باز می گردد. در آن سال جرج کلود از آکادمی علوم فرانسه دستگاهی جهت تولید انرژی از اختلاف حرارت سطح وبستر اقیانوس ابداع نمود (Claud, 1930). در حال حاضر تعداد نیروگاه های برق جزر و مدی تاسیس شده در دنیا کم است. اولین و بزرگترین این نیروگاه ها ۲۴۰ مگا وات قدرت دارد و در لارنس کنار

دریای مانش در کشور فرانسه قرار دارد. در این مورد می توان از نیروگاه های جزر و مدی دیگری به این شرح نام برد: نیروگاه ۲۰ مگا وات در آنابولیس (کانادا) که در آن از یک توربین آبی با قطر بزرگ و جریان برق مستقیم (Dc) استفاده شده است، نیروگاه آزمایش ۴۰۰ کیلو وات در کیسلایا - گوبا (شوروی سابق)، نیروگاه جیانگ زیا (چین) با توان ۳/۲ مگا وات و نیروگاه های اولدولمک، سیهوا، این چه اون و گارورلیم در کشور کره جنوبی (Kowalik, 2004).

پس از بررسی حد اقل ها و شرایط مورد نیاز جهت یافتن نقطه مناسب تولید الکتریسیته (حدود جزر و مد بالا، وجود حوضچه مناسب با دهانه محدود جهت احداث سد، نزدیکی به مناطق با مصرف بالای برق و عدم ایجاد تزاخم و تداخل با حمل و نقل و سایر فعالیت های دریایی)، مشخص گردید که خور دورق در نزدیکی بندر امام خمینی (ره)، در کل سواحل ایرانی خلیج فارس از این بابت دارای بهترین شرایط است. خور دورق (شکل ۱) در قسمت انتهای شمال غربی خور موسی در جنوب غربی ایران واقع شده است. موج جزرومدی وارد شده از خلیج فارس به این خور بر اثر پدیده تشدید افزایش می یابد به گونه ای که دامنه جزرومد در انتهای خور و در شرایط کهکشند ۵/۷ متر و در شرایط مهکشند ۵/۹ متر، و دامنه جزرومد در ابتدای خور و در شرایط کهکشند ۴/۳ متر و در شرایط مهکشند ۴/۴ متر است. با توجه به تقسیم بندی خورها بر اساس حدود جزرومد، و در نظر گرفتن میانگین جزرومد بین ۴ و ۶ متر، می توان گفت که خور دورق یک خور ماکروتایدال است (Dyer, 1997).

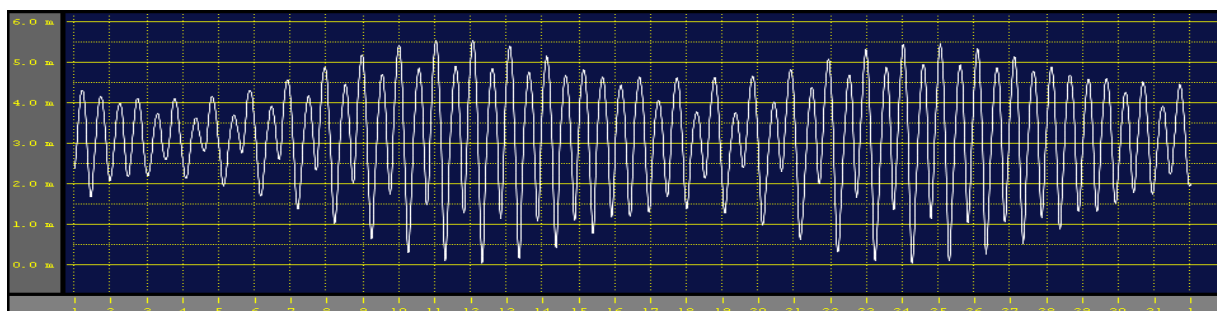


شکل ۱. توپوگرافی خور دورق و زنگی

## ۲. مواد و روش ها

خمینی(ره) (نمودار ۲) استخراج و دوره تناوب، دامنه و فاز چهار مولفه اصلی جزر و مد تعیین گردید (جدول ۱).

به منظور محاسبه مولفه های جزر و مدی داده های ماهیانه نوسانات سطح آب ایستگاه بندر امام



نمودار ۲. نمودار تغییرات ماهیانه سطح آب در بندر امام خمینی(ره)

جدول ۱. مشخصات مولفه های اصلی جزر و مد

| CONSTITUENT    | PERIOD(h) | AMPLITUDE(m) | PHASE(degree) |
|----------------|-----------|--------------|---------------|
| M <sub>2</sub> | 12.42060  | 1.4784336    | 163.9634      |
| S <sub>2</sub> | 12.00000  | 0.6150323    | 331.2551      |
| K <sub>1</sub> | 23.93447  | 0.4504536    | 252.4721      |
| O <sub>1</sub> | 25.81935  | 0.3631416    | 153.9997      |

رابطه (۱) و جدول (۲) ارتباط نوع جزر و مد و مولفه های جزر و مدی را نشان می دهند (Stewart, 2004). با جای گذاری مقادیر مولفه های خور دورق می توان نشان داد که جزر و مد در این خور آمیخته (نیم روزانه نا برابر) است.

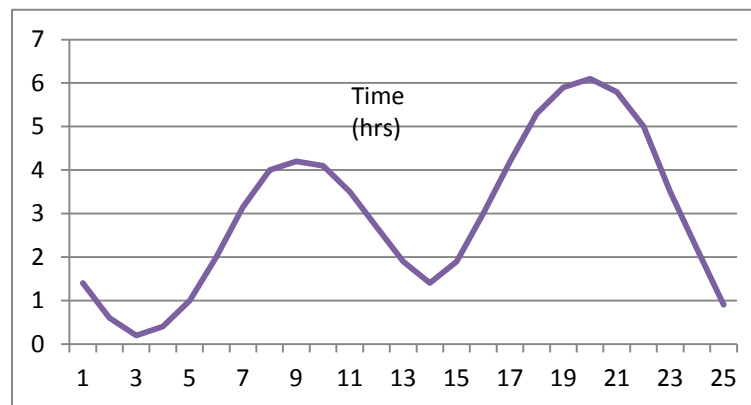
$$F = (K_1 + O_1) / (M_2 + S_2) \quad (1)$$

این موضوع را می توان در اندازه گیری های میدانی انجام شده (شکل ۳) در ابتدای خور دورق نیز مشاهده نمود.

رابطه (۱) و جدول (۲) ارتباط نوع جزر و مد و مولفه های جزر و مدی را نشان می دهند (Stewart, 2004). با جای گذاری مقادیر مولفه های خور دورق می توان نشان داد که جزر و مد در این خور آمیخته (نیم روزانه نا برابر) است.

جدول ۲. انواع جزرومد بر اساس نسبت بین مولفه های جزرومدی

| Value of F | Category                  |
|------------|---------------------------|
| 0 – 0.25   | Semidiurnal               |
| 0.25 – 1.5 | Mixed, Mainly semidiurnal |
| 1.5 - 3    | Mixed, Mainly diurnal     |
| >3         | Diurnal                   |



شکل ۳. نمودار تغییرات سطح آب در حالت مهکشند در خور دورق

شکل نشان داده شده است. زمان تولید برق مشروط به زمان مورد نیاز پر شدن حوضچه در زمان بالا آمدن مد است. برای حداقل سطح در نظر گرفته شده، زمان تولید (از T1 تا T2) تقریباً ۵/۵ ساعت است. همان طور که در تصویر پایینی شکل می توان مشاهده کرد ژنراتور ها در چرخه تولید در کل زمان، برق یکسانی تولید نمی کنند. توان خروجی با افزایش سطح تراز به آرامی افزایش می یابد تا جایی که یک توان ثابت حاصل شود (Kowalik, 2004).

در این مطالعه با شبیه سازی جزرومد در خور دورق توسط قسمت هیدرودینامیکی مدل کوهیرنس وبا استفاده از رابطه بین سطح آب و انرژی پتانسیل، در حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مورد استفاده اساس یک مختصات سیگمای عمودی، متشکل از ۳ لایه می باشد (Luyten et al., 1999).

نیروهای میانگین ماهیانه اتمسفری اقلیمی (مولفه های سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابر، بارش و دبی رودخانه،.....) برای یک دوره ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۰) از داده های ماهواره نوآ میانگین

کار انجام شده بر روی توده های آب توسط جزر و مد باعث بالا آمدن سطح آب گردیده و به صورت انرژی پتانسیل در آن ذخیره می گردد. این انرژی قابلیت تبدیل و استفاده به صورت های دیگر انرژی را دارا است.

اگر جزرومد باعث بالا آمدن سطح آب در یک حوزه به مساحت A به ارتفاع H گردد، کار انجام شده بر روی آن یا انرژی پتانسیل ذخیره شده از رابطه (۲) به دست خواهد آمد (Gorlov, 2001).

$$E_p = \rho g A \int_0^h z dz = \frac{1}{2} \rho g A h^2 \quad (2)$$

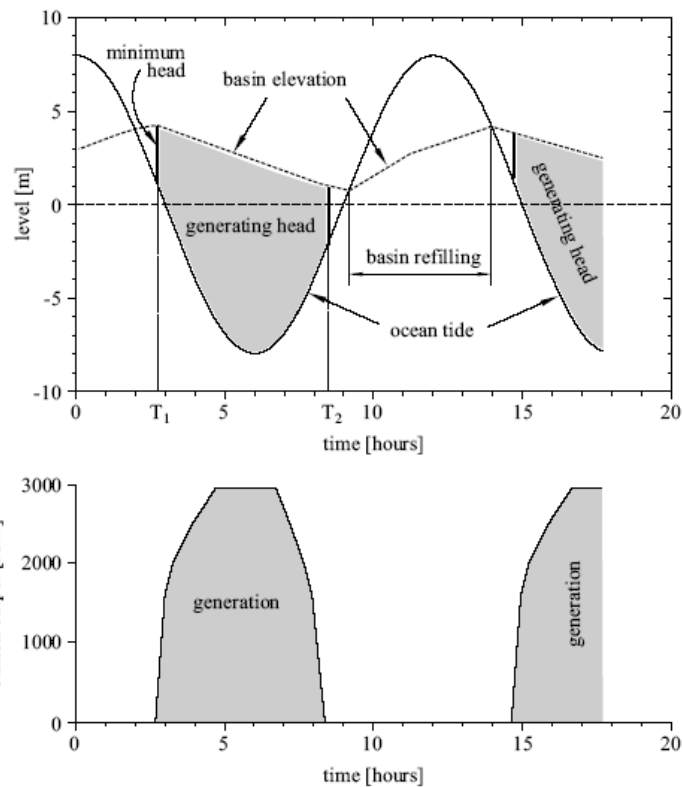
$g$  شتاب گرانش و  $\rho$  چگالی آب دریا است.

شکل (۴) فرآیند تولید توان کشندی برای حالت یک طرفه در سیستم تک حوضچه ای را نشان می دهد. برای شروع تولید برق به یک حداقل اختلاف تر از بین سطح آب اقیانوس و حوضچه نیازمندیم. حداقل دامنه جزرومد مورد نیاز برای اقتصادی شدن تولید ۴ تا ۶ تخمین زده میشود. تغییرات سطح دریا داخل و بیرون حوضچه برای یک کشند نیم روزانه در

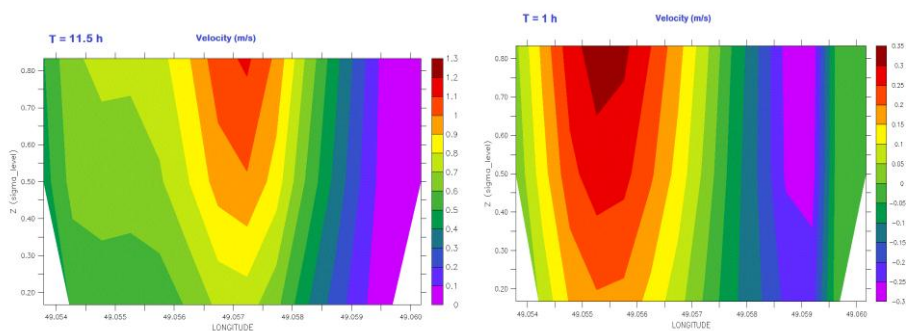
های شبکه در جهت افقی ۳۸۸ و در جهت عمود ۲۰۰ واحد در نظر گرفته شده است.

### ۳. نتایج

شبهه سازی جریان های ورودی و خروجی دهانه خور نشان می دهد که شار ورودی از یک جناح و شار خروجی از جناح دیگر خور در جریان هستند و جهت جریان از سطح تا بستر تقریباً همسو بوده که با داده های میدانی همخوانی دارد. (شکل ۵)



شکل ۴. تراز سطح دریا داخل و خارج خلیج (بالا). توان خروجی بر حسب زمان (پایین).

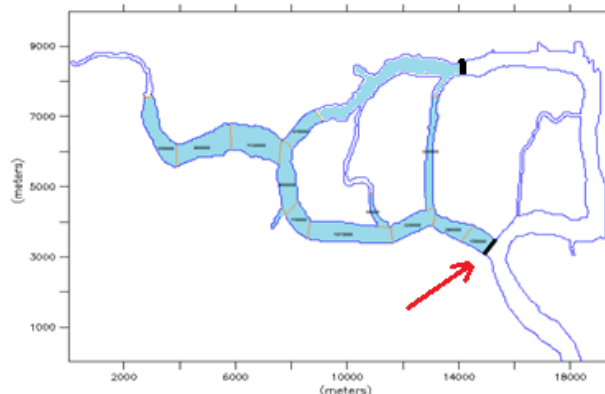


شکل ۵. جریان های ورودی و خروجی دهانه خور

گیری شده و در مدل استفاده شده است. دامنه و فاز چهار مولفه اصلی جزر و مد ( $M_2, S_2, O_1, K_1$ ) در مرز غربی به صورت مقادیر ثابت در نظر گرفته شده است. فایل عمق سنجی برای ناحیه جغرافیایی به مساحت ۱۹۴ کیلومتر مربع، بر روی یک صفحه شطرنجی به ابعاد  $2 \times 1$  متر مربع ترسیم شد. این نقشه شبکه دویعدی مدل را با فاصله بین نقطه ای ۵۰ متر در جهت افقی و عمودی تشکیل داده که تعداد کل سلول

ساده ترین حالت وبدون هیچ گونه تغییر و تراحمی با فعالیت موجود بندر می توان با احداث سد در ابتدای خور دورق فرعی (شکل ۶)، حوضچه ای به مساحت حدود ۹ کیلومتر مربع ایجاد نمود.

با توجه به متصل بودن مجتمع بندری امام خمینی و منطقه ویژه اقتصادی به محل فرضی نیروگاه، چهار گزینه مختلف برای استحصال انرژی در منطقه مورد مطالعه تعریف شده که بستگی به میزان تقاضا دارد. در



شکل ۶. موقعیت سد پیشنهادی در ابتدای خور دورق فرعی

$$W = \frac{I}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

با در نظر گرفتن بازده ۳۵ درصد برای توربین های تولید کننده می توان ۱۱/۲ مگاوات انرژی الکتریکی استحصال نمود.

با نصب توربینهای دو طرفه که دارای پیچیدگی فنی بیشتر و قیمت بالاتری هستند، می توان هم در حالت جزر و هم در حالت مد الکتریسیته تولید نمود و در صورت تقسیم حوزه آبی مورد نظر به دو حوضچه مجزا (شکل ۷) امکان تولید الکتریسیته در تمام ساعات شبانه روز وجود دارد (شکل ۸).

$$P = \frac{2.75 \times 10^{12} J}{86400} = 31.8 \times 10^6 W \approx 32 MW$$

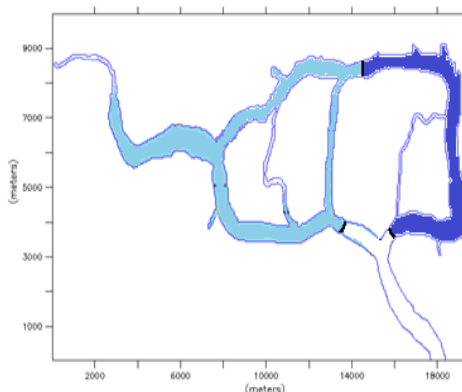
با جایگذاری مقادیر  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$  و  $A = 9 \text{ km}^2$  و  $h = 5.5 \text{ m}$  در رابطه ۲ مقدار انرژی قابل استحصال در یک سیکل جزرومد به دست می آید.

$$\frac{1}{2} \rho g A h^2 = \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m^2 \cdot m^2 = N \cdot m$$

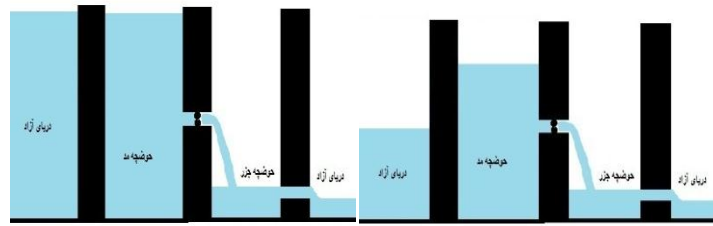
با توجه به توان  $1.375 \times 10^{12} \text{ J}$  و  $32 \text{ MW}$  و  $33 \text{ MW}$  و  $30 \text{ MW}$  و  $35 \text{ MW}$  و  $30 \text{ MW}$  و  $33 \text{ MW}$  امکان استحصال انرژی وجود دارد. به این ترتیب انرژی کل برابر می شود با:

$$1.375 \times 10^{12} \times 2 = 2.75 \times 10^{12}$$

این میزان انرژی در مدت یک شبانه روز یا معادل ۸۶۴۰۰ ثانیه به دست می آید، بنا براین با تقسیم انرژی بر زمان توان متوسط بدست خواهد آمد.



شکل ۷. تقسیم حوزه آبی مورد نظر به دو حوضچه مجزا



شکل ۸. تولید الکتریسیته در حالت دو حوضچه ای

$$P = \frac{6 \times 10^{12} J}{86400} \approx 70 \times 10^6 W = 70 MW$$

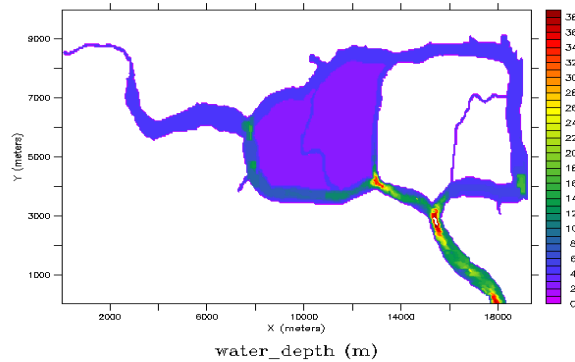
$$P = 70 MV \times 0.35 = 24.8 MW$$

در ادامه، با فرض لایروبی و خاک برداری قسمت سمت چپ اراضی احاطه شده باخورهای زنگی و دورق، مدل برای حوضچه ای به مساحت ۲۹ کیلومترمربع اجراشد (شکل ۹). نتایج محاسبات نشان دهنده امکان تولید ۳۶ مگاوات الکتریسیته در حالت مذکور می باشد.

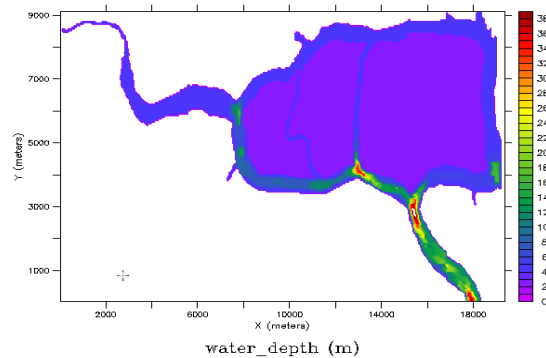
گزینه دوم احداث سد در مقطع خور دورق اصلی است. با این کار حوضچه ای به مساحت ۲۰ کیلومتر مربع ایجاد می گردد (شکل ۱). جای گذاری این مساحت در رابطه (۲) نشان دهنده امکان استحصال ۷۰ مگاوات انرژی یا معادل ۲۵ مگا وات الکتریسیته در شبانه روز خواهد بود

$$E = \frac{1}{2} \rho g A h^2 = \frac{1}{2} \times 1030 \times 9.81 \times 20 \times 10^6 \times 5.5^2 = 3 \times 10^{12} J$$

$$3 \times 10^{12} \times 2 = 6 \times 10^{12} J$$



شکل ۹. توپوگرافی پس از لایروبی نیمه چپ حوضچه



شکل ۱۰. توپوگرافی حوضچه پس از لایروبی کامل قسمت میانی

جدول ۳. میزان جلوگیری از انتشار گازهای آلاینده توسط نیروگاه جزر ومدی در سال

| گاز کربنیک (تن) | گوگرد (تن) | نیتروکسید (تن) | جیوه (گرم) |
|-----------------|------------|----------------|------------|
| ۲۴۹۷۴۴          | ۲۲۳/۶      | ۱۵۶/۱۷۶        | ۱۳۷۶       |

انرژی روزانه

$$4.85 \times 10^{12} \times 2 = 9.7 \times 10^{12} J$$

توان انرژی پتانسیل

$$P = \frac{9.7 \times 10^{12} J}{86400} \approx 112.3 \times 10^6 W$$

توان انرژی الکتریکی مفید

$$P = 112.3 MV \times 0.35 = 39.3 MW$$

انرژی الکتریکی سالانه

$$39.9 \times 10^6 \times 365 \times 24 = 344 GWh$$

شاید این میزان انرژی در مقایسه با تولید یک نیروگاه حرارتی کم باشد ولی باید توجه داشت که صرف نظر از سرمایه گذاری اولیه که در نیروگاه های جزر و مدی بیشتر است، هزینه تولید در این نیروگاه ها ناچیز است. عدم استفاده از سوخت های فسیلی، علاوه بر حذف هزینه سوخت، باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست خواهد شد. به ازاء تولید هر یک مگاوات ساعت برق در نیروگاه های ذغالی معادل حدود هفت صد و بیست و شش کیلوگرم گاز کربنیک، شش صد و پنجاه گرم سولفور، چهار صد و پنجاه گرم اکسید نیترات و چهار هزارم گرم جیوه تولید می شود (Bedrad, 2009). تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه جزر و مدی ذکر شده می تواند مانع از انتشار سالانه گازهای آلاینده به میزان نشان داده شده در جدول ۳ گردند.

#### منابع

- Bedard R., 2009. US ocean and marine energy resources and potential. Electric power research institute, 19p.
- Claud, G., 1930. Power from Tropical Seas. *Mechan. Eng.* 52: 30-44.
- Deyer, K.R., 1997. *Estuaries and Physical introduction*. Cambridge University press, 169p.
- Gorlov, A.M., 2001. *Tidal energy*. Academic press, pp 2955-2960.

محاسبات زیر نشان میدهند که انرژی پتانسیل ذخیره شده در زمان مد در پشت سد برابر  $9 \times 10^{12}$  ژول خواهد بود که از این محل روزانه ۷۴ مگاوات الکتریسیته حاصل می شود.

$$E = \frac{1}{2} \rho g A h^2 = \frac{1}{2} \times 1030 \times 9.81 \times 60 \times 10^6 \times 5.5^2 = 9.173 \times 10^{12} J. ۴$$

$$9.173 \times 10^{12} \times 2 = 18.34 \times 10^{12} J$$

$$P = \frac{18.34 \times 10^{12} J}{86400} \approx 212 \times 10^6 W = 212 MW$$

$$P = 212 MV \times 0.35 = 74 MW$$

حالت چهارم با فرض لایروبی و خاکبرداری تمامی قسمت میانی خورهای زنگی ودورق مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت مساحت حوضچه پشت سد به ۶۰ کیلومتر مربع خواهد رسید (شکل ۱۰).

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

با توجه به نیم روزه بودن جزر و مد در منطقه مورد مطالعه، سالانه هفت صد و شش بار مد واقع خواهد گردید. حتی اگر تولید یک طرفه و فقط در حالت مد به جزر انجام شود، برای حوضچه ای به مساحت شصت کیلومتر مربع و متوسط حدود جزر و مد چهار متر، حجم آب عبوری سالانه از سد برابر می شود با:

$$60 \times 10^6 \times 4 \times 706 = 169.4 \times 10^6 m^3$$

این حجم آب ده ها برابر آورد سالانه روخانه های پر آب کشور است. باید توجه داشت که جزر و مد دارای دوره های کهنکشدن و مهکشند است، همچنین جزر و مد های واقع شده در یک روز با هم برابر نیستند (جزر و مد آمیخته). از این رو به منظور نزدیک تر نمودن برآورد سالانه انرژی الکتریکی تولید شده به واقعیت، متوسط سالانه حدود جزر و مد را برابر با چهار متر در نظر می گیریم.

انرژی در هر مد



for Regional and Shelf Seas: User Documentation, 288p.

Stewart, R., 2004. Introduction to Physical Oceanography. Texas A&M University, 344p.

Kowalik, Z., 2004. Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia* 46(3): 291-331.

Luyten, P., Jones, J.E., Tabor, A., Tett, P., Wild-Alen, K., 1999. COHERENS-A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model