

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی شیمی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی
گرایش پیشرفته

شبیه سازی جریان الکترولیت در یک سل واحد الکترووینینگ مجتمع
مس سرچشمه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

مؤلف:

مه جبین نجمی نوری

استاد راهنما:

دکتر علی محبی

استاد مشاور:

دکتر عطاءالله سلطانی گوهر ریزی

شهریور ماه ۱۳۹۲



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی شیمی

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مذکور شناخته نمی شود.

دانشجو: مه جبین نجمی نوری

استاد راهنما: دکتر علی محبی

استاد مشاور: دکتر عطاءالله سلطانی گوهر ریزی

داور اول: دکتر امیر صرافی

داور دوم: دکتر علی بقایی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر عطاءالله کامیابی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به مہربان فرشتگانی کہ:

لحظات ناب باور بودن، لذت غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام
تجربہ ہائی یکتا و زیبای زندگی، دیدیون حضور سبز آہناست۔

تقدیم بہ پدرم

و روح مادرم کہ، ہموارہ خواستار ترقی ام در زمینہ تحصیل بود۔

شکر و قدردانی:

شکر ذات مقدس پروردگار را سزا است که شاکرترین بندگانش از حق شکر او عاجز و عابدترین آنان در عبادتش قاصراند. او که در هنگام رحمت ارحم الراحمین و در غوغای عقوبت، اشد المعاقبین است.

حال که به لطف پروردگار این کار به انجام رسیده است، لازم می‌دانم از عزیزانی که مراد این راه‌یاری نموده‌اند، سپاسگزاری نمایم. از استاد مراهبنایم جناب آقای دکتر علی محبی که با فرزانه‌گی و روحیه‌ی حسنی نپذیرور، نمودهای خود، محور حمایت و چراغ هدایت اینجانب در این مسیر بوده‌اند، برای عمری سپاسگزارم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر عطا الله سلطانی کوه‌رینزی که بارها بهمانی‌های خود مرا مورد لطف و مرحمت قرار دادند، شکر و قدردانی می‌نمایم.

از مدیر و سرپرست واحد الکترووینیک مجتمع مس سرچشمه، جناب آقایان مهندس محمد خوش‌بین و مهندس بابک قدمی عربی به خاطر کمک‌ها و پیشنهادات بی‌دینج و ارزندشان صمیمانه شکر و قدردانی می‌نمایم و برایشان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

بچنین از اساتید محترم جناب آقای دکتر امیر صرانی و جناب آقای دکتر علی تقایی که زحمات داوروی این پایان‌نامه را متحمل شدند، کمال سپاسگزاری را دارم.

چکیده:

الکترووینینگ مس بازیابی الکتروشیمیایی این فلز از حالت محلول آن می باشد. در این روش با اعمال جریان الکتریکی بین دو الکتروود غوطه ور در الکترولیت شامل $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ، مس حل شده روی سطح الکتروود منفی (کاتد) رسوب می کند. در این مطالعه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، یک شبیه سازی سه بعدی، پایدار و دو فازی (مایع-گاز) به منظور تهیه مس کاتدی در واحد الکترووینینگ مجتمع مس سرچشمه انجام شد. در این شبیه سازی روش اولرین-اولرین برای الکترولیت و گاز اکسیژن به کار برده شده است. معادلات پیوستگی و ممتوم با در نظر گرفتن نیروهای شناوری، دراگ، نیروی پراکندگی توربالنت و نیروی شناوری مرتبط با غلظت به کمک روش حجم محدود حل شده اند. فاز مایع توربالنت و فاز گازی آرام در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه توزیع سرعت محلول، مدل جریان توربالنت $k-\omega$ به کار رفته است. برای پیدا کردن توزیع غلظت مس، معادله انتقال ذرات یون مس در محلول حل شده است. نتایج شبیه سازی تطابق خوبی با داده های تجربی اندازه گیری شده در واحد الکترووینینگ مجتمع مس سرچشمه دارد. بعد از اعتبار سنجی مدل تاثیر دبی حجمی جریان الکترولیت، دانسیته جریان الکتریکی و فاصله بین الکتروودها بر توزیع غلظت مس و عملکرد سل مطالعه شده است. نتایج این شبیه سازی نشان می دهد که، نزدیک آند بواسطه ی تولید اکسیژن و نزدیک کاتد به دلیل تهی شدن الکترولیت از مس و ایجاد نیروی بویانسی یک جریان رو به بالای آهسته به وجود می آید. در میانه های سل نیز به واسطه ی ناحیه ی چرخشی الکترولیت یک جریان رو به پایین ایجاد می شود. با افزایش دانسیته جریان الکتریکی، غلظت مس نزدیک کاتد کاهش و کسر حجمی گاز نزدیک آند افزایش می یابد، که با قانون فاراده مطابقت دارد. کاهش دبی حجمی جریان و فاصله بین الکتروودها سبب کاهش غلظت مس در سل می شود.

کلمات کلیدی: الکترووینینگ، دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه سازی، الکترولیت

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- آشنایی با مجتمع مس سرچشمه.....	۲
۲-۱- روش های استخراج مس.....	۳
۱-۲-۱- روش پیرومتالورژی.....	۳
۲-۲-۱- روش هیدرومتالورژی.....	۴
۳-۱- الکترووینینگ.....	۶
۴-۱- روند کار در پالایشگاه مجتمع مس سرچشمه.....	۷
۵-۱- اهداف پایان نامه.....	۷
فصل دوم: مبانی نظری موضوع	۹
۱-۲- عملکرد کلی واحد لیچینگ.....	۱۰
۲-۲- عملکرد کلی واحد الکترووینینگ.....	۱۳
۳-۲- مواد افزودنی به الکتروولیت.....	۱۶
۴-۲- الکترودهای الکترووینینگ.....	۱۶
۱-۴-۲- آند.....	۱۶
۲-۴-۲- کاتد.....	۱۷

- ۱۸.....۵-۲- واکنش های جانبی ناشی از حضور ناخالصی ها در الکترولیت
- ۱۸.....۶-۲- دانسیته جریان الکتریکی
- ۱۹.....۱-۶-۲- دانسیته جریان الکتریکی و ارتباط آن با درجه حرارت الکترولیت
- ۱۹.....۲-۶-۲- دانسیته جریان الکتریکی و ارتباط آن با کیفیت رسوب یون فلزی روی کاتد
- ۱۹.....۳-۶-۲- انتخاب دانسیته جریان الکتریکی بهینه
- ۲۰.....۷-۲- پتانسیل الکتریکی تجزیه
- ۲۰.....۱-۷-۲- پلاریزاسیون
- ۲۲.....۲-۷-۲- فراپتانسیل یا پتانسیل اضافی
- ۲۳.....۳-۷-۲- مقاومت اهمی الکترولیت و اتصالات
- ۲۴.....۸-۲- پتانسیل سلول الکترووینینگ
- ۲۶.....۹-۲- انتقال جرم
- ۲۷.....۱۰-۲- انتقال جرم متلاطم در الکتروشیمی
- ۲۸.....۱۱-۲- محدودیت دانسیته جریان الکتریکی و لایه مرزی نفوذ
- ۲۹.....۱۲-۲- بازده جریان
- ۳۰.....۱۳-۲- معادلات حاکم بر سل الکترووینینگ
- ۳۱.....۱-۱۳-۲- معادلات پیوستگی
- ۳۱.....۲-۱۳-۲- معادلات ممنوم
- ۳۴.....۳-۱۳-۲- انتخاب ضریب دراگ
- ۳۵.....۴-۱۳-۲- معادله انتقال جرم ذرات مس

۳۵.....	۵-۱۳-۲ قانون فاراده
۳۶.....	۱۴-۲- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
۳۷.....	۱-۱۴-۲- یک کد CFD چگونه کار می کند؟
۳۸.....	۲-۱۴-۲- شرایط مرزی در CFD
۴۱.....	فصل سوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۴۲.....	۱-۳- تحقیقات آزمایشگاهی
۴۴.....	۲-۳- تحقیقات انجام شده به کمک CFD توام با کار آزمایشگاهی
۴۶.....	فصل چهارم: روش تحقیق
۴۷.....	۱-۴- هندسه و شرایط عملیاتی سیستم
۵۰.....	۲-۴- خواص فیزیکی و روش های اندازه گیری آنها
۵۲.....	۳-۴- روش حل معادلات حاکم
۵۳.....	۱-۳-۴- قابلیت های نرم افزار و سخت افزار مورد استفاده
۵۴.....	۲-۳-۴- شبکه محاسباتی
۵۶.....	فصل پنجم: نتایج و بحث
۵۷.....	۱-۵- خواص فیزیکی
۵۸.....	۲-۵- تعیین شرایط مرزی
۵۸.....	۳-۵- وابستگی محاسبات به تعدادالمان های شبکه محاسباتی
۵۹.....	۴-۵- مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های تجربی
۶۶.....	۵-۵- آنالیز حساسیت

۶۶..... ۱-۵-۵- بررسی اثر دانسیته جریان الکتریکی

۷۲..... ۲-۵-۵- بررسی تاثیر دبی حجمی جریان ورودی به سل الکترووینینگ

۷۶..... ۳-۵-۵- بررسی تاثیر تغییر فاصله بین الکترودها

۸۰ فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۸۳ منابع

۸۸..... پیوست الف

۱۱۵..... پیوست ب

فهرست جداول

عنوان..... صفحه

جدول ۵-۱- خواص فیزیکی اندازه گیری شده در سل واحد الکترووینینگ مجتمع مس سرچشمه...۵۷

جدول ۵-۲- داده های اندازه گیری شده غلظت مس بین کاتد ۵ و آند ۶ و در ارتفاع ۳۰cm از بالای سل.....۶۰

جدول ۵-۳- داده های اندازه گیری شده غلظت مس وسط کاتد ۵ و آند ۶.....۶۱

فهرست اشکال

عنوان.....	صفحه.....
شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی معدن مس سرچشمه کرمان.....	۲.....
شکل ۱-۲- شماتیک فرآیند SX-EW مربوط به فرآیند استخراج مس به روش هیدرومتالورژی (الکترولیز).....	۵.....
شکل ۲-۱- شماتیک کلی واحد لیچینگ.....	۱۲.....
شکل ۲-۲- نمایی از واحد الکترووینینگ مجتمع مس سرچشمه.....	۱۳.....
شکل ۲-۳- نمایی از استخراج کاتدهای آماده.....	۱۴.....
شکل ۲-۴- واحد شستشوی کاتدها برای جداسازی مس.....	۱۵.....
شکل ۲-۵- نوار نقاله شیب دار منتقل کننده کاتدها.....	۱۵.....
شکل ۲-۶- نمودار تولید کارخانه بر حسب دانسیته جریان الکتریکی.....	۲۰.....
شکل ۲-۷- شماتیک یک جفت الکتروود آند و کاتد.....	۲۴.....
شکل ۲-۸- مدار الکتریکی مرتبط با الکترووینینگ مس.....	۲۵.....
شکل ۲-۹- گرا دیان غلظت نزدیک سطح کاتد.....	۲۸.....
شکل ۲-۱۰- لایه مرزی نفوذ به عنوان تابعی از زمان شروع فرآیند.....	۲۹.....
شکل ۴-۱- نمایی سه بعدی از سل الکترووینینگ.....	۴۸.....
شکل ۴-۲- ابعاد سل الکترووینینگ از نمای رو به رو.....	۴۸.....
شکل ۴-۳- ابعاد سل الکترووینینگ از نمای بالا.....	۴۹.....
شکل ۴-۴- ابعاد کاتد.....	۴۹.....
شکل ۴-۵- ابعاد آند.....	۵۰.....
شکل ۴-۶- دستگاه نمونه گیری الکتروولیت بین آند و کاتد.....	۵۲.....
شکل ۴-۷- نمونه هایی از المان های محاسباتی.....	۵۳.....
شکل ۴-۸- شبکه محاسباتی سل الکترووینینگ.....	۵۵.....
شکل ۵-۱- نمودار باقیمانده ها.....	۵۹.....
شکل ۵-۲- مقایسه داده های تجربی با نتایج شبیه سازی.....	۶۰.....

- شکل ۳-۵- مقایسه داده های تجربی با نتایج شبیه سازی..... ۶۲
- شکل ۴-۵- کانتور غلظت مس در نمای روبه رو در $X=0$ ۶۲
- شکل ۵-۵- کانتور غلظت مس میان کاتد و آند..... ۶۳
- شکل ۶-۵- نمودار کسر حجمی اکسیژن بین کاتد و آند..... ۶۳
- شکل ۷-۵- الگوی جریان میان کاتد و آند..... ۶۴
- شکل ۸-۵- نمودار سرعت میان کاتد و آند..... ۶۵
- شکل ۹-۵- اثر دانسیته جریان الکتریکی بر روی توزیع غلظت میان کاتد و آند در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۶۶
- شکل ۱۰-۵- اثر دانسیته جریان الکتریکی بر روی توزیع غلظت در جهت عمودی در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۶۷
- شکل ۱۱-۵- اثر دانسیته جریان الکتریکی بر توزیع سرعت میان کاتد و آند در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۶۸
- شکل ۱۲-۵- اثر دانسیته جریان الکتریکی بر روی سرعت عمودی گاز اکسیژن میان کاتد و آند با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۶۹
- شکل ۱۳-۵- اثر دانسیته جریان الکتریکی بر روی کسر حجمی اکسیژن میان کاتد و آند با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۷۰
- شکل ۱۴-۵- کانتور کسر حجمی اکسیژن میان کاتد و آند با دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 و دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۷۱
- شکل ۱۵-۵- کانتور کسر حجمی اکسیژن میان کاتد و آند با دانسیته جریان الکتریکی 300 A/m^2 و دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ ۷۱
- شکل ۱۶-۵- اثر دبی حجمی جریان بر توزیع سرعت عمودی الکترولیت میان کاتد و آند در وسط سل و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۲
- شکل ۱۷-۵- اثر دبی حجمی جریان بر توزیع غلظت مس میان کاتد و آند در وسط سل و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۳

- شکل ۵-۱۸- اثر دبی حجمی جریان بر توزیع غلظت مس در جهت عمودی در وسط سل و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۴
- شکل ۵-۱۹- اثر دبی حجمی جریان بر توزیع سرعت عمودی گاز اکسیژن میان کاتد و آنود در وسط سل و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۵
- شکل ۵-۲۰- اثر دبی حجمی جریان بر کسر حجمی گاز اکسیژن میان کاتد و آنود در وسط سل و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۵
- شکل ۵-۲۱- اثر تغییر فاصله بین الکترودها بر توزیع سرعت الکترولیت میان کاتد و آنود در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۶
- شکل ۵-۲۲- اثر تغییر فاصله بین الکترودها بر توزیع غلظت میان کاتد و آنود در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۷
- شکل ۵-۲۳- اثر تغییر فاصله بین الکترودها بر توزیع غلظت در جهت عمودی در وسط سل با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۷
- شکل ۵-۲۴- اثر تغییر فاصله بین الکترودها بر سرعت عمودی گاز اکسیژن میان کاتد و آنود با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۸
- شکل ۵-۲۵- اثر تغییر فاصله بین الکترودها بر کسر حجمی گاز اکسیژن میان کاتد و آنود با دبی حجمی الکترولیت ورودی $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دانسیته جریان الکتریکی 191 A/m^2 ۷۹

فهرست علائم و نشانه ها

A: سطح الکتروود (m^2)

A_i : نیروی بویانسی مرتبط با گرادیان غلظت مس [N/m^3]

B_i : نیروی بویانسی وارد بر فاز i [N/m^3]

C_D : ضریب درآگ [-]

C_E : بازده جریان [-]

C_{td} : ضریب پراکندگی توربالنت [-]

c : غلظت مس [kg/m^3]

D : ضریب نفوذ [m^2/s]

d : فاصله بین الکتروودها [m]

d_b : قطر حباب [m]

E_a : پتانسیل برگشت پذیر الکتروود آند [V]

E_c : پتانسیل برگشت پذیر الکتروود کاتد [V]

E_I : پتانسیل لازم برای عبور جریان از سل [V]

E_{net} : مجموع جبری پتانسیل الکتروودهای کاتد و آند [V]

E_p : پتانسیل پلاریزه شدن الکتروودها [V]

E_R : پتانسیل لازم برای غلبه بر مقاومت اهمی الکتروولیت و اتصالات [V]

F : عدد فاراده [$A.s/mol$]

F_i : نیروی دراگ وارد بر فاز i [N/m^3]

g : شتاب جاذبه [m/s^2]

H : ارتفاع الکتروود [m]

I : شدت جریان الکتریکی [A]

i : دانسیته جریان الکتریکی [A/m^2]

i_L : دانسیته جریان الکتریکی محدود [A/m^2]

k : انرژی جنبشی توربالنسی [m^2/s^2]

M_{Cu} : جرم مولکولی مس [gr/mol]

M_i : مجموع نیروهای حجمی وارد بر فاز i [N/m^3]

\dot{m}_{Cu} : حال شار جرمی مس [$kg/m^2.s$]

m_{Cu} : جرم تولیدی مس [gr]

\dot{m}_{oxygen} : دبی جرمی اکسیژن تولیدی روی آند [kg/s]

n : تعداد الکترون های منتقل شده

P : فشار [Pa]

Pr_T : عدد پرانتل توربالنت [-]

R : ثابت عمومی گازها [$J/mol.K$]

Ra : عدد رایلی [-]

Re : عدد رینولدز [-]

R_{π} : مقاومت اتصالات [Ω]

R_s : مقاومت الکترولیت [Ω]

S_a : فرایتناسیل آنودی [V]

S_c : فرایتناسیل کاتدی [V]

S_{cu} : ترم چشمه [kg/m³.s]

S_{c_T} : عدد اشمیت توربالنت [-]

T_i : نیروی پراکنندگی توربالنت وارد بر فاز i [N/m³]

t : زمان [s]

U_a : ولتاژ الکتروود آند [V]

U_c : ولتاژ الکتروود کاتد [V]

U_i : سرعت برداری فاز i [m/s]

U_T : ولتاژ کل سلول [V]

z : تعداد بارهای ابتدایی [-]

حروف یونانی

α_i : کسر حجمی فاز i

β : ضریب انبساط فلز مس [m³/kg]

μ_i : ویسکوزیته دینامیکی فاز i [kg/m.s]

ρ_i : دانسیته فاز i [kg/m³]

ν : ویسکوزیته سینماتیک [m²/s]

δ_N : ضخامت لایه مرزی نفوذ [m]

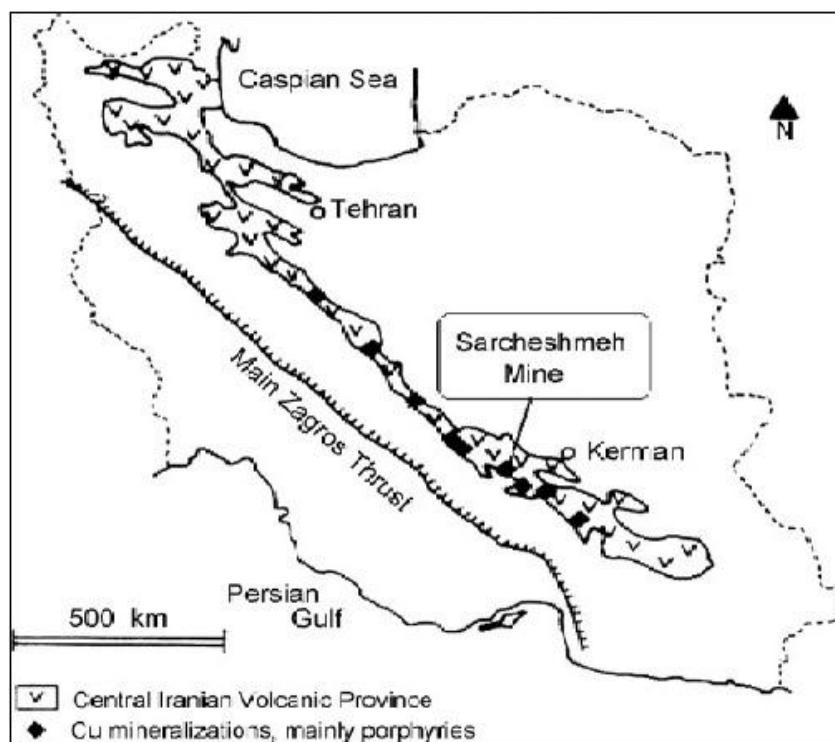
ω : فرکانس توربالنسی [1/s]

فصل اول

مقدمه

۱-۱- آشنایی با مجتمع مس سرچشمه

معدن مس سرچشمه یکی از بزرگترین ذخایر شناخته شده مس پروفیری در جهان می باشد. مجتمع مس سرچشمه در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان واقع گردیده است. این معدن یکی از بزرگترین معادن روباز جهان به شمار می رود و ذخیره زمین شناسی آن، بالغ بر یک میلیارد و دوست میلیون تن سنگ سولفوری با عیار متوسط ۰/۷ درصد برآورده شده است.



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی معدن مس سرچشمه کرمان [۱]

معدن مس سرچشمه از دیدگاه زمین شناسی بر روی کمر بند جهانی مس قرار داشته و پهنه گسترش آن از جنوب خاوری تا شمال باختری به صورت یک محدوده بیضوی با ابعاد با قطر بزرگ ۲/۳ کیلومتر، قطر کوچک ۱/۲ کیلومتر و عمق ۱۶۱۲ متر می باشد. این معدن با شیب ۳۴ درجه به صورت پلکانی استخراج می شود. معدن از سه منطقه اکسیده (با عمق ۳۷ متر)، سوپرژن (غنی شده، با عمق ۳۰ متر) و هیپوژن (اولیه و دست نخورده، با عمق ۶۰۰ متر) تشکیل شده است. هر سه منطقه دارای ذخایر قابل