



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
مهندسی فرآوری مواد معدنی

## بررسی الکتروشیمیایی عوامل موثر بر محیط خردایش کانی‌های سولفیدی مس و مدل‌سازی آن‌ها با هدف کنترل میزان خوردگی واسطه

دانشجو:

اصغر عزیزی

اساتید راهنما:

دکتر سید ضیاءالدین شفائی تنکابنی

دکتر محمد نوع پرست

استاد مشاور:

دکتر محمد کارآموزیان

رساله دکتری برای اخذ درجه دکتری

شهریور ۱۳۹۲

صورت جلسه دفاع از رساله (فرم شماره ۱۲)



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره ۱۲

باسمه تعالی

شماره: ۱۱۶۷/۹۲-۲۶۹۲-۹  
تاریخ: ۹۲/۲۷  
ویرایش:

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می‌شود آقای اصغر عزیزی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن-فرآوری مواد معدنی به شماره دانشجویی ۸۸۱۸۵۱۵ ورودی مهر سال ۱۳۸۸ در تاریخ ۱۳۹۲/۰۶/۲۸ از رساله خود با عنوان: بررسی الکتروشیمیایی عوامل موثر بر محیط خردایش کانی‌های سولفیدی مس و مدل‌سازی آن‌ها با هدف کنترل میزان خوردگی واسطه دفاع و با اخذ نمره - ۱۹/ به درجه: عالی نائل گردید.

- الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹  (ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷   
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵  (د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد   
ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

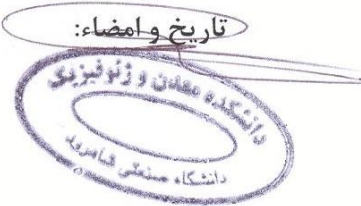
| ردیف | هیئت داوران              | نام و نام خانوادگی                      | مرتبه علمی | امضاء |
|------|--------------------------|---|------------|-------|
| ۱    | دکتر سید ضیاءالدین شفائی | استاد راهنما                            | استاد      |       |
| ۲    | دکتر محمد نوع پرست       | استاد راهنما                            | استاد      |       |
| ۳    | دکتر محمد کارآموزیان     | استاد مشاور                             | استادیار   |       |
| ۴    | دکتر بهرام رضائی         | استاد مدعو خارجی                        | استاد      |       |
| ۵    | دکتر محمود عبداللهی      | استاد مدعو خارجی                        | استاد      |       |
| ۶    | دکتر حسین نیکوفرد        | استاد مدعو داخلی                        | دانشیار    |       |
| ۷    | دکتر رضا قوامی ریابی     | سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده | استادیار   |       |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:



## تقدیم به

روح متعالی پدر بزرگوام که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه  
نمایم و از نگاهش صلابت را آموختم،

به مادر مهربانم که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر،

## و تقدیم به

به همسرم، او که اسوه صبر و تحمل بود و مشکلات مسیر را برایم آسان نمود.

## تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خداوند منان که به اینجانب نعمت وجود بخشید تا بتوانم این پژوهش مختصر را تقدیم دارم. بر خود لازم می‌دانم از بزرگواری که مرا طی انجام این تحقیق یاری نمودند، سپاسگزاری نمایم.

عرض سپاس ویژه خود را به پیشگاه استادان راهنمای محترم، گرانقدر و فرهیخته‌ی خود جناب آقایان دکتر سید ضیاءالدین شفائی و دکتر محمد نوع پرست تقدیم می‌دارم. همچنین از جناب آقای دکتر محمد کارآموزیان که مشاوره این تحقیق را بر عهده داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید محترم داور، جناب آقایان دکتر محمود عبداللهی، دکتر بهرام رضائی و دکتر حسین نیکوفرد که زحمت داوری پایان‌نامه را بر عهده داشتند، و رهنمودهای ارزشمندی برای بهبود کار ارائه دادند، تشکر و قدرانی می‌نمایم.

شایسته است از شرکت صنایع ملی مس ایران، مجتمع مس سرچشمه و به ویژه ریاست محترم فرآوری مواد معدنی واحد تحقیق و توسعه جناب آقای مهندس یاراحمدی، مدیر واحد پایلوت جناب آقای مهندس جباری و پرسنل سخت کوش بخش پایلوت مجموعه‌ی مس سرچشمه به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی در جهت پیشبرد این تحقیق، صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

در پایان از خانواده‌ام (مادر، همسر، خواهران و برادران) به دلیل شکیبایی و حمایت بی‌شائبه‌شان در تمام مراحل تحصیل نهایت سپاس و قدردانی خود را تقدیم می‌دارم.

## تعهد نامه

اینجانب اصغر عزیزی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی فرآوری مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله بررسی الکتروشیمیایی عوامل موثر بر محیط خردایش کانی‌های سولفیدی مس و مدل‌سازی آن‌ها با هدف کنترل میزان خوردگی واسطه متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء

تاریخ:

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود و شرکت صنایع ملی مس ایران می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

آسیاهای گلوله‌ای یکی از مرسوم‌ترین وسایل خردایش در صنعت فرآوری مواد معدنی می‌باشند که گلوله‌های مصرفی آن‌ها از اجزاء آسیب‌پذیر و پراسته‌لاک به شمار می‌روند. فرسایش گلوله در اثر سه مکانیزم ضربه، سایش و خوردگی بوجود می‌آید که مکانیزم خوردگی به دلیل ماهیت شیمیایی-الکتروشیمیایی کمتر ملموس بوده و به آن کمتر پرداخته شده است. از طرفی خوردگی در خردایش کانه‌های سولفیدی به دلیل نیمه هادی بودن کانی‌های سولفیدی از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین اهداف این رساله بر مطالعه رفتار الکتروشیمیایی محیط آسیاهای گلوله‌ای، ارزیابی فاکتورهای موثر بر میزان خوردگی گلوله‌ها و مدل‌سازی خوردگی گلوله‌های فولادی به منظور حداقل کردن میزان خوردگی متمرکز شده است. برای دستیابی به اهداف رساله یک سیستم خردایش الکتروشیمیایی ویژه شامل آسیای گلوله‌ای و تجهیزات الکتروشیمیایی (دستگاه پتانسیواستات/گالوانوستات با سیستم سه الکترودی) طراحی و در مجتمع مس سرچشمه ساخته شد. مطالعه رفتار الکتروشیمی آسیا نشان داد که نوع گلوله، شیمی آب، شرایط هوادهی به آسیا، تغییر مینرالوژی کانه، افزایش pH و درصد جامد پالپ به طور قابل ملاحظه‌ای ویژگی‌های الکتروشیمیایی آسیا را تغییر داده و با ایجاد یک محیط کاهشی سبب کاهش تماس گالوانیکی بین کانی‌ها و گلوله‌ها، انواع آهن اکسیدی داخل آسیا و بازیابی مس فلوتاسیون می‌شود. در مطالعه الکتروشیمی آسیا ارزیابی شده است که ۷۳/۵۱ درصد محصولات خوردگی از اکسایش گلوله‌های فولادی می‌باشند. ارزیابی فاکتورهای موثر بر فرسایش خوردگی نشان داد که نیتروژن‌دهی به آسیا، استفاده از آب مقطر و گلوله‌های فولادی با کربن و کروم بالا، افزایش درصد جامد و افزایش pH پالپ، نرخ خوردگی گلوله‌ها را بشدت کاهش می‌دهند. همچنین مشاهده شد که با کاهش ظرفیت بار ورودی به آسیا و افزایش زمان خردایش و سرعت گردش آسیا، نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش وزن شارژ گلوله داخل آسیا نرخ خوردگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. ضمناً در آزمایشگاه مشخص شد که مکانیزم خوردگی ۲۷/۶۸ درصد از فرسایش کل گلوله‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. نتایج مدل-

سازی خوردگی گلوله‌های فولادی نشان داد که حداقل میزان خوردگی برای گلوله‌های آلیاژ پایین ۷۸/۳۸ (mpy) در سطوح پارامترهای pH برابر ۹/۸، درصد جامد ۰/۴۰، ظرفیت ۷۲۰ گرم، وزن شارژ گلوله ۹/۲۵ کیلوگرم، سرعت گردش آسیا ۷۰ دور بر دقیقه و زمان خردایش ۱۰ دقیقه و برای گلوله فولادی کربن و کروم بالا ۴۰/۷۶ (mpy) در سطوح، pH برابر ۱۰، درصد جامد ۰/۴۰، ظرفیت ۶۹۸/۴ گرم، شارژ گلوله ۸ کیلوگرم، سرعت گردش آسیا ۷۰ دور بر دقیقه و زمان خردایش ۱۰/۶۳ دقیقه بدست می‌آید. در نهایت مدل‌های ریاضی با ضرائب همبستگی بالاتر از ۰/۹ برای گلوله‌های فولادی پیشنهاد گردید.

**کلمات کلیدی:** کانه مس سرچشمه، برهم‌کنش گالوانیکی، خوردگی گلوله‌ها و مدل‌سازی.



## مقالات مستخرج از رساله

### مقالات ISI و علمی پژوهشی

1. **Asghar Azizi**, Seid Ziaoddin Shafaei, Mohammad Noaparast, Mohammad Karamoozian (2013) "Modeling and optimizing the corrosive wear of steel balls in ball grinding mill", accepted in Iranian journal of material Science and Engineering.
2. **Asghar Azizi**, Seid Ziaoddin Shafaei, Mohammad Noaparast, Mohammad Karamoozian (2013) "Investigation of the electrochemical factors affecting the grinding environment of a porphyry copper sulphide ore", Journal of Mining and Metallurgy Section A: Mining, Volume 49 (1) A.
3. **Asghar Azizi**, Seid Ziaoddin Shafaei, Mohammad Noaparast, Mohammad Karamoozian (2013) "Galvanic interaction between chalcopyrite and pyrite with low alloy and high carbon chromium steel ball", Journal of Chemistry, published, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/817218>.
4. **Asghar Azizi**, Seid Ziaoddin Shafaei, Mohammad Noaparast, Mohammad Karamoozian (2013) "The role of pH, solid content, water chemistry and ore mineralogy in galvanic interaction of chalcopyrite and pyrite with steel ball", accepted in Frontiers of Chemical Science and Engineering.
5. **A. Azizi**, S. Z. Shafaei, M. Noparast, M. Karamoozian, C. J.Greet (2013) "A study on the corrosive and abrasive wear of grinding media in grinding of minerals using fuzzy analytical hierarchy Delphi method", accepted in The Arabian Journal for Science and Engineering.

### مقالات کنفرانسی

1. اصغر عزیزی، سید ضیاء الدین شفائی، محمد نوع پرست، محمد کارآموزیان، Christopher J.Greet، مجید بهجت جباری و محمدرضا یاراحمدی (۱۳۹۲) " بررسی تاثیر فاکتورهای مهم بر فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده (گلوله‌های فولادی) در آسیاهای گلوله ای"، اولین کنفرانس فناوری‌های نوین در شیمی و مهندسی شیمی، مرکز همایش‌های بین المللی آبگینه تهران.
2. **A. Azizi**, S. Z. Shafaei, M. Noaparast, M. Karamoozian, M. Yarahmadi, M. Jabbari Behjat (2013) "Influence of pulp chemistry on corrosive wear of steel balls", The first International Conference on Mining, Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering (ICME 2013), September 16th–21st.
3. **A. Azizi**, S. Z. Shafaei, M. Noaparast, M. Karamoozian, M. Yarahmadi, M. Jabbari Behjat (2013) "Effect of galvanic interactions between minerals and steel balls on copper recovery", The first International Conference on Mining, Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering (ICME 2013), September 16th–21st.

## فهرست مطالب

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| ۱    | فصل اول: مقدمه  |
| ۲    | ۱-۱. مقدمه  |
| ۴    | ۲-۱. معرفی معدن مس سرچشمه                                     |
| ۵    | ۱-۲-۱. معرفی مدار آسیای کارخانه پر عیارسازی مجتمع مس سرچشمه   |
| ۶    | ۳-۱. سازماندهی رساله  |
| ۷    | فصل دوم: کلیات و مبانی نظری تحقیق                             |
| ۸    | ۱-۲. مقدمه  |
| ۸    | ۲- کلیات و مفاهیم   |
| ۸    | ۱-۲-۲. الکتروشیمی، سلول گالوانیکی و مفهوم الکتروود            |
| ۹    | ۲-۲-۲. پتانسیل سلول، پتانسیل استاندارد و الکتروود مرجع        |
| ۱۰   | ۳-۲. اصول الکتروشیمیایی محیط خردایش کانی‌های سولفیدی مس       |
| ۱۰   | ۱-۳-۲. اصول خوردگی الکتروشیمیایی                              |
| ۱۰   | ۱-۱-۳-۲. تئوری خوردگی   |
| ۱۱   | ۲-۱-۳-۲. ملاحظات ترمودینامیکی واکنش‌های خوردگی                |
| ۱۳   | ۳-۱-۳-۲. اساس سل خوردگی                                       |
| ۱۵   | ۴-۱-۳-۲. ملاحظات سینتیکی واکنش‌های خوردگی                     |
| ۱۶   | ۵-۱-۳-۲. سینتیک خوردگی  |
| ۱۷   | ۲-۳-۲. برهم کنش‌های گالوانیکی در محیط آسیا در طول خردایش کانه |
| ۱۷   | ۱-۲-۳-۲. برهم کنش گالوانیکی                                   |
| ۲۰   | ۲-۲-۳-۲. سینتیک واکنش‌های گالوانیکی                           |

|    |  |
|----|--|
| ۲۳ | ۳-۳-۲. روش‌های الکتروشیمیایی برای مطالعه‌ی پدیده‌های خوردگی و برهم‌کنش گالوانیکی ..... |
| ۲۳ | ۱-۳-۳-۲. ولتامتری روبش خطی (LSV) .....   |
| ۲۴ | ۲-۳-۳-۲. تکنیک پلاریزاسیون .....   |
| ۲۶ | <b>فصل سوم: مروری بر تحقیقات گذشته</b> .....   |
| ۲۷ | ۱-۳. مروری بر کارهای انجام شده قبلی .....  |
| ۵۱ | ۲-۳. جمع بندی .....  |
| ۵۲ | <b>فصل چهارم: مواد، روش‌ها و تجهیزات</b> .....   |
| ۵۳ | ۱-۴. مواد و تجهیزات .....  |
| ۵۳ | ۱-۱-۴. نمونه معرف و آماده‌سازی آن .....  |
| ۵۳ | ۲-۱-۴. مواد و ترکیب‌های شیمیایی .....  |
| ۵۵ | ۳-۱-۴. تجهیزات .....   |
| ۵۸ | ۲-۴. روش تحقیق .....   |
| ۵۸ | ۱-۲-۴. روش ساخت الکتروود کانی و واسطه خردایش .....                                     |
| ۵۹ | ۲-۲-۴. خردایش .....  |
| ۶۰ | ۳-۲-۴. تعیین نرخ خوردگی .....  |
| ۶۳ | ۴-۲-۴. فلوتاسیون .....   |
| ۶۳ | ۵-۲-۴. تکنیک استخراج با EDTA .....   |
| ۶۶ | <b>فصل پنجم: بررسی رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش آسیاهای گلوله‌ای</b> .....          |
| ۶۷ | ۱-۵. مقدمه .....   |
|    | ۲-۵. تاثیر فاکتورهای مهم خردایش بر خصوصیات الکتروشیمیایی (Eh، DO و OCP) و فلوتاسیون    |
| ۶۷ | مس .....   |

|   |     |
|---|-----|
| ۳-۵. برهم‌کنش گالوانیکی بین کالکوپیریت و پیریت با گلوله‌های فولادی در خردایش کانه مس سولفیدی .....                | ۷۵  |
| ۱-۳-۵. نقش نوع گلوله فولادی و شرایط هوادهی به آسیا در برهم‌کنش گالوانیکی پیریت و کالکوپیریت با گلوله فولادی ..... | ۷۵  |
| ۲-۳-۵. نقش pH، درصد جامد، شیمی آب و مینرالوژی کانه در برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و بار خردکننده .....         | ۸۲  |
| <b>فصل ششم: ارزیابی فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی ... ۸۸</b>                           |     |
| ۱-۶. مقدمه .....  | ۸۹  |
| ۲-۶. ارزیابی فاکتورهای موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی با استفاده از نظر کارشناسان و روش دلفی فازی .....          | ۹۰  |
| ۱-۲-۶. روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی .....   | ۹۰  |
| ۲-۲-۶. ارزیابی فاکتورهای موثر با استفاده از روش دلفی فازی .....   | ۹۴  |
| ۳-۶. بررسی تاثیر فاکتورهای مهم قابل کنترل بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی ...                           | ۹۸  |
| ۱-۳-۶. تاثیر pH پالپ .....  | ۱۰۰ |
| ۲-۳-۶. تاثیر درصد جامد پالپ .....   | ۱۰۰ |
| ۳-۳-۶. تاثیر شرایط مختلف هوادهی به محیط خردایش توسط گازهای مختلف اکسیژن، هوا و نیتروژن .....                      | ۱۰۱ |
| ۴-۳-۶. تاثیر زمان خردایش .....  | ۱۰۲ |
| ۵-۳-۶. تاثیر ظرفیت (دبی بار ورودی) .....  | ۱۰۳ |
| ۶-۳-۶. تاثیر سرعت گردش آسیا .....   | ۱۰۳ |
| ۷-۳-۶. تاثیر وزن شارژ بار خردکننده .....  | ۱۰۴ |
| ۸-۳-۶. تاثیر نوع بار خردکننده و نوع آب مورد استفاده در آسیا .....   | ۱۰۴ |

|     |       |  |
|-----|-------|--|
| ۱۰۵ | ..... | ۹-۳-۶. تاثیر توزیع ابعادی ذرات و توزیع ابعادی بار خردکننده                           |
| ۱۰۶ | ..... | ۴-۶. سهم مکانیزم خوردگی در فرسایش گلوله‌های فولادی                                   |
| ۱۰۹ | ..... | فصل هفتم: مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی               |
| ۱۱۰ | ..... | ۱-۷. مقدمه   |
| ۱۱۰ | ..... | ۲-۷. طراحی آزمایش‌ها   |
| ۱۱۲ | ..... | ۳-۷. روش و طرح انجام آزمایش‌های خردایش   |
| ۱۱۵ | ..... | ۴-۷. تجزیه و تحلیل نتایج   |
| ۱۱۵ | ..... | ۱-۴-۷. مدل‌سازی  |
| ۱۲۱ | ..... | ۲-۴-۷. آنالیز خطاهای حاصل از مدل‌سازی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی                    |
| ۱۲۳ | ..... | ۳-۴-۷. بررسی تاثیر فاکتورها بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی                           |
| ۱۳۰ | ..... | ۵-۷. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند  |
| ۱۳۲ | ..... | فصل هشتم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها   |
| ۱۳۳ | ..... | ۱-۸. مقدمه   |
|     |       | ۲-۸. جمع‌بندی نتایج حاصل از مطالعه رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش کانه مس سولفیدی   |
| ۱۳۳ | ..... |  |
|     |       | ۳-۸. جمع‌بندی نتایج حاصل از فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی |
| ۱۳۵ | ..... |  |
|     |       | ۴-۸. جمع‌بندی نتایج حاصل از مدل‌سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی          |
| ۱۴۰ | ..... | ۵-۸. جنبه‌های نوآوری تحقیق   |
| ۱۴۱ | ..... | ۶-۸. پیشنهادها   |
| ۱۴۴ | ..... | منابع  |
| ۱۵۴ | ..... | پیوست‌ها   |

پیوست الف: ماتریس مقایسه زوجی، ماتریس مقایسه فازی و وزن فازی فاکتورهای موثر بر خوردگی

۱۵۵ .....

۱۵۹ ..... طراحی آماری آزمایش ها

۱۷۶ ..... پیوست ج: نتایج مدل سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله ها

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): اساس سل خوردگی تر (سید رضی، ۱۳۷۵) ..... ۱۴
- شکل (۲-۲): مدل برهم کنش گالوانیکی بین دو کانی سولفیدی (Ekmekçi and Demirel, 1997). ۱۸
- شکل (۳-۲): مدل برهم کنش گالوانیکی میان تک کانی سولفیدی و واسطه فولادی (Adam, 1983) ..... ۱۹
- شکل (۴-۲): مدل خوردگی یک گلوله فولادی نرم شامل ناحیه سائیده شده و غیر سائیده شده (Adam, 1983) ..... ۱۹
- شکل (۵-۲): مدل برهم کنش گالوانیکی میان دو کانی سولفیدی و واسطه خردایش (Pozzo and Iwasaki, 1989) ..... ۲۰
- شکل (۱-۳): تاثیر برهم کنش گالوانیکی بر فلوتاسیون پیروتیت (Adam et al., 1984) ..... ۲۸
- شکل (۲-۳): منحنی پتانسیل استراحت-زمان برای الکترودهای پیریت و گلوله فولادی در محلول در معرض هوا (Heng-xing et al., 2003) ..... ۳۶
- شکل (۳-۳): تغییرات پتانسیل ترکیبی (مختلط) و جریان گالوانیک نسبت به زمان (Heng-xing et al., 2003) ..... ۳۷
- شکل (۴-۳): طرح شماتیک سیستم خردایش ویژه "کی سیز" و همکاران (Cases et al, 1990)، اجزاء سیستم: ۱: استوانه، ۲: اتاق خردایش، ۳: صفحه مشبک (grate)، ۴: اتاق نمونه گیری، ۵: محل عبور گاز و پالپ است، ۶: پمپ، ۷: سلول اندازه گیری و ۸: الکترودهای اندازه گیری (pH، Eh و ...). ۳۹
- شکل (۵-۳): تاثیر واسطه خردایش و نوع گازدهی به محیط خردایش بر روی فلوتاسین پیریت در عدم حضور (a) و حضور (b) کالکوپیریت در pH=۹ (خط چین، واسطه فولادی نرم؛ خط کامل، واسطه کروم بالا (۳۰٪)؛ علامت □، نیتروژن و علامت ○ اکسیژن را نشان می دهد) (Peng, 2002) ..... ۴۰
- شکل (۶-۳): طرح شماتیک آسیای Magotteux (Greet et al, 2004) ..... ۴۱
- شکل (۷-۳): تصویر آسیای تائو (Tao, 2004) ..... ۴۲

- شکل (۳-۸): پتانسیل استراحت یا پتانسیل مدار باز (OCP) الکترودهای بارهای خردکننده فولاد نرم،  
 ۱۵٪ کروم، ۲۱٪ کروم و ۳۰٪ کروم در طول خردایش کوارتز در pH=۹ (Huang, 2005) ..... ۴۴
- شکل (۳-۹): ارتباط بین قابلیت فلوتی شدن پیریت و جریان گالوانیک در pH=۷ (Huang, 2005) .....  
 ۴۵
- شکل (۳-۱۰): طرح شماتیک محاسبه جریان گالوانیک و اکسایش واسطه خردایش و یک کانی  
 سولفیدی در اتصال الکتروشیمیایی (Huang, 2005) ..... ۴۷
- شکل (۴-۱): طرح شماتیک آسیای گلوله‌ای الکتروشیمیایی ..... ۵۷
- شکل (۴-۲): تصویر سیستم خردایش الکتروشیمیایی ساخته شده (set up) از دو نمای متفاوت .... ۵۸
- شکل (۴-۳): الکتروده گلوله فولادی و کالکوپیریت ..... ۵۹
- شکل (۴-۴): طرح شماتیک نرم افزار الکتروشیمیایی سما ۵۰۰ و نحوه استفاده از آن ..... ۶۱
- شکل (۴-۵): منحنی پلاریزاسیون گلوله فولادی آلیاژ پایین در pH=۱۰-۱۰/۵، درصد جامد ۳۵٪، زمان  
 خردایش ۱۲/۵ دقیقه، سرعت گردش آسیا ۷۵ دور بر دقیقه با نرخ اسکن ۵۰ میلی ولت بر ثانیه  
 ..... ۶۲
- شکل (۵-۱): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (low alloy steel) و کربن-کروم بالا (High  
 carbon chromium steel) روی پتانسیل پالپ در pH=۷-۷/۵ و درصد جامد ۳۵٪ در طول خردایش  
 کانه A تحت شرایط مختلف هوادهی با گازهای نیتروژن، اکسیژن و هوا ..... ۶۸
- شکل (۵-۲): تاثیر pH، درصد جامد و نوع آب روی پتانسیل پالپ در طول خردایش کانه A با گلوله  
 فولادی آلیاژ پایین بدون شرایط هوادهی ..... ۶۹
- شکل (۵-۳): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا و شرایط مختلف هوادهی روی  
 غلظت اکسیژن محلول در pH=۷-۷/۵ و درصد جامد ۳۵٪ در طول خردایش کانه A تحت شرایط  
 مختلف هوادهی با گازهای نیتروژن، اکسیژن و هوا ..... ۶۹



شکل (۴-۵): تاثیر pH، درصد جامد و نوع آب روی غلظت اکسیژن محلول در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی آلیاژ پایین بدون شرایط هوادهی ..... ۷۰

شکل (۵-۵): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا و شرایط مختلف هوادهی روی پتانسیل مدار باز در  $pH=7-7/5$  و درصد جامد ۳۵ در طول خردایش کانه A ..... ۷۱

شکل (۶-۵): همبستگی میان درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA (محصولات خوردگی گلوله) با بازیابی مس ..... ۷۳

شکل (۷-۵): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت نیتروژن (الف)، هوا (ب)، اکسیژن (ج) و بدون هوادهی (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه ..... ۷۷

شکل (۸-۵): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا تحت نیتروژن (الف)، هوا (ب)، اکسیژن (ج) و بدون هوادهی (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه ..... ۷۸

شکل (۹-۵): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA تحت شرایط مختلف هوادهی در خردایش کانه A با گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین (low alloy steel) و کربن و کروم بالا (high carbon chromium steel) ..... ۸۲

شکل (۱۰-۵): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه B با گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (الف)،  $pH=10-10/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (ب)،  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۵۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (ج) و  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب مقطر (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه ..... ۸۳

شکل (۵-۱۱): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانی‌های خالص پیریت (الف) و کالکوپیریت (ب) با گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $pH = 7-7/5$  و درصد جامد ۳۵٪ با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه ..... ۸۴

شکل (۵-۱۲): همبستگی میان دانسیته جریان گالوانیک بین پیریت (الف) و کالکوپیریت (ب) با گلوله با درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA (آهن اکسیدی تولید شده در آسیا) ..... ۸۷

شکل (۶-۱): فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده (گلوله‌های فولادی) در آسیاها ..... ۹۰

شکل (۶-۲): مراحل اجرای روش دلفی فازی (آذر و فرجی، ۱۳۸۱) ..... ۹۲

شکل (۶-۳): تابع عضویت مثلثی در روش دلفی فازی (Chen and Liu, 2007) ..... ۹۳

شکل (۶-۴): طرح شماتیک از ترتیب اهمیت فاکتورهای موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی در آسیاها ..... ۹۷

شکل (۶-۵): تاثیر  $pH$  پالپ داخل آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۰

شکل (۶-۶): تاثیر درصد جامد پالپ داخل آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۱

شکل (۶-۷): تاثیر شرایط مختلف هوادهی (اکسیژن، نیتروژن و هوا) به محیط خردایش، بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۲

شکل (۶-۸): تاثیر زمان خردایش بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۲

شکل (۶-۹): تاثیر سرعت گردش آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۳

- شکل (۶-۱۰): تاثیر وزن شارژ گلوله‌ها بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۴
- شکل (۶-۱۱): تاثیر توزیع ابعادی ذرات بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۵
- شکل (۶-۱۲): تاثیر توزیع ابعادی گلوله‌های فولادی بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۰۶
- شکل (۷-۱): نمودار حساسیت فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین . ۱۱۸
- شکل (۷-۲): نمودار حساسیت فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن-کروم بالا ..... ۱۲۰
- شکل (۷-۳): نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای مدل نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (الف) و کربن-کروم بالا (ب) ..... ۱۲۱
- شکل (۷-۴): نمودار Externally Studentized Residuals (مانده استیودنتیده بیرونی) برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (الف) و کربن-کروم بالا (ب) ..... ۱۲۲
- شکل (۷-۵): نمودار تاثیرهای اصلی بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۲۴
- شکل (۷-۶): نمودار تاثیرهای اصلی بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با کربن و کروم بالا ..... ۱۲۵
- شکل (۷-۷): نمودار اثر متقابل pH-درصد جامد بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۲۶
- شکل (۷-۸): نمودار اثر متقابل درصد جامد-سرعت گردش آسیا (الف) و ظرفیت-زمان خردایش (ب) بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن-کروم بالا ..... ۱۲۷

شکل (۷-۹): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بر اساس فاکتورهای pH-درصد جامد (الف)، pH-زمان خردایش (ب)، درصد جامد-زمان خردایش (ج)، وزن شارژ گلوله‌ها-ظرفیت (د)، سرعت آسیا-ظرفیت (ه) و زمان خردایش-سرعت آسیا (و) ..... ۱۲۸

شکل (۷-۱۰): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا بر اساس فاکتورهای pH-درصد جامد (الف)، pH-زمان خردایش (ب)، درصد جامد-زمان خردایش (ج)، وزن شارژ گلوله‌ها-ظرفیت (د)، سرعت آسیا-ظرفیت (ه) و زمان خردایش-سرعت آسیا (و) ..... ۱۲۹

## فهرست جداول

- جدول (۱-۱): مشخصات فنی آسیای گلوله‌ای کارخانه تغلیظ ۱ (Wunder, 1979) ..... ۵
- جدول (۱-۳): جریان گالوانیک اندازه‌گیری شده بعد تماس از کانی‌های پیریت (Py) و پیروتیت (Po) با فولاد ضد زنگ (SS)، فولاد نرم (MS) ..... ۲۹
- جدول (۲-۳): اندازه‌گیری‌های شیمی پالپ آسیای میله‌ای مونت ایسا (Mount Isa) بعد از خردایش کانه (Cullinan, 1999) ..... ۳۵
- جدول (۳-۳): مقایسه دانسیته‌های جریان خوردگی بدست آمده از دو روش منحنی پلاریزاسیون و تست فرسایش گلوله‌های علامت گذاری شده بر حسب میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع ..... ۳۷
- جدول (۴-۳): شیمی پالپ تخلیه آسیای Magotteux در خردایش کانه UG2 با استفاده از واسطه‌های فولادی مختلف (Greet, 2008) ..... ۴۱
- جدول (۵-۳): ارتباط بین انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA و جریان گالوانیک ..... ۴۹
- جدول (۱-۴): ترکیب شیمیایی نمونه کانه مس سرچشمه به همراه اندازه محدوده‌های ابعادی مختلف (٪ وزنی) ..... ۵۳
- جدول (۲-۴): ترکیب شیمیایی کانه مس و کانی‌های خالص مورد استفاده در آزمایش‌های خردایش ..... ۵۴
- جدول (۳-۴): ترکیب شیمیایی گلوله‌های فولادی ..... ۵۴
- جدول (۴-۴): آنالیز شیمیایی آب‌های مورد استفاده در آزمایش‌های خردایش ..... ۵۵
- جدول (۵-۴): مشخصات سیستم خردایش الکتروشیمیایی ویژه ..... ۵۶
- جدول (۱-۵): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA و بازیابی مس تحت شرایط مختلف خردایش در طول خردایش کانه A ..... ۷۲
- جدول (۲-۵): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA در طول خردایش کانی خالص پیریت به همراه درصد محصولات حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی ..... ۷۴

- جدول (۳-۵): دانسیته جریان گالوانیک ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) و پتانسیل ترکیبی (mV نسبت به Ag/AgCl (3.0 M KCl)) پیریت و کالکوپیریت با گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین و حاوی کربن و کروم بالا تحت شرایط مختلف هوادهی در داخل آسیا ..... ۸۰
- جدول (۴-۵): پتانسیل استراحت کانی‌های سولفیدی و گلوله‌های فولادی در pH طبیعی (Cheng and Iwasaki, 1992; Peng et al., 2003b) ..... ۸۱
- جدول (۵-۵): دانسیته جریان گالوانیک و پتانسیل ترکیبی پیریت با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت شرایط مختلف خردایش ..... ۸۵
- جدول (۶-۵): دانسیته جریان گالوانیک و پتانسیل ترکیبی کالکوپیریت با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت شرایط مختلف خردایش ..... ۸۶
- جدول (۷-۵): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA در تخلیه آسیا تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی در طول خردایش با گلوله فولادی آلیاژ پایین ..... ۸۶
- جدول (۱-۶): طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (Saaty, 1980) ..... ۹۵
- جدول (۲-۶): اهمیت وزن فاکتورها توسط متخصصین ( $E_i, i=1,2,\dots,5$ ) ..... ۹۶
- جدول (۳-۶): شرایط مختلف تست‌های خردایش به همراه مقادیر نرخ خوردگی محاسبه شده ..... ۹۹
- جدول (۴-۶): درصد اتلاف جرم گلوله در فرسایش حاصل از خوردگی و فرسایش کل تحت شرایط مختلف خردایش ..... ۱۰۷
- جدول (۱-۷): سطوح انتخاب شده فاکتورها برحسب مقادیر واقعی و کد براساس طرح مرکب مرکزی ..... ۱۱۳
- جدول (۲-۷): ماتریس طرح مرکب مرکزی انجام آزمایش‌ها و مقادیر پاسخ (نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (LS) و کربن-کروم بالا (HS)) ..... ۱۱۳
- جدول (۳-۷): آنالیز آماری مدل‌ها ..... ۱۱۶

- جدول (۴-۷): آنالیز واریانس مدل Quadratic با حذف پارامترهای بی اهمیت در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین ..... ۱۱۷
- جدول (۵-۷): آنالیز واریانس مدل Quadratic با حذف پارامترهای بی اهمیت در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی کربن-کروم بالا ..... ۱۲۰
- جدول (۶-۷): آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه توسط نرم افزار بر اساس مقادیر کد برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین ..... ۱۳۰
- جدول (۷-۷): آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه توسط نرم افزار بر اساس مقادیر کد برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا ..... ۱۳۱
- جدول (۸-۷) : سطح بهینه پیشنهادی برای نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین (LS) و گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا (HS) بوسیله مدل به همراه آزمایش‌های اعتبار سنجی مدل بر اساس مقادیر کد و واقعی ..... ۱۳۱

# فصل اول:

مقدمه



## ۱-۱. مقدمه

در صنعت فرآوری مواد معدنی محیط‌های خردایش متفاوتی (آسیاهای نیمه خود شکن، آسیاهای میله‌ای، آسیاهای گلوله‌ای و ...) وجود دارد که در آن واسطه خردایش استفاده می‌گردد. انواع مختلفی از واسطه خردایش شامل میله‌های خردکننده غلتان، گلوله‌های فولادی آهنی، گلوله‌های فولادی چدنی، گلوله‌های آهنی با کروم بالا و گلوله‌های فولادی با کربن بالا به عنوان بار خردکننده استفاده می‌شود. گلوله‌های فولادی بیشترین کاربرد را به ترتیب در آسیاهای گلوله‌ای و نیمه خودشکن دارند که به تدریج در اثر کارکرد به دلیل فرسایش تغییر شکل می‌دهند.

فرسایش گلوله‌های واسطه خردایش در اثر سه مکانیزم ساییش<sup>۱</sup>، ضربه<sup>۲</sup> و خوردگی<sup>۳</sup> بوجود می‌آیند. در اثر فرسایش، قطر گلوله‌ها به تدریج کاهش یافته و این کاهش ابعاد منجر به کاهش وزن و تغییر شکل آن‌ها می‌شود. در این صورت کارائی گلوله‌ها کاهش یافته و باید با توقف آسیا آن‌ها را خارج کرد (Meulendyke and Purdue, 1989; Dun, 1985). علاوه بر این امروزه کاهش عیار مواد معدنی و افزایش پیچیدگی کانی‌شناسی آن‌ها و ضرورت خردایش کانسنگ‌های سخت و ساینده تا ابعاد بسیار ریز منجر به افزایش مصرف گلوله‌ها و یا سایر بار خردکننده‌ها می‌شود و هزینه‌های زیادی را به فرآیند خردایش تحمیل می‌نماید (Gangopadhyay and Moore, 1985). تخمین زده شد حدود ۵۰ درصد از هزینه‌های فرآیند خردایش مربوط به فرسایش آستر و بار خردکننده و ۵۰ درصد بقیه از آن انرژی می‌باشد (Radziszewski, 2000).

تحقیقات نشان می‌دهد که از بین سه مکانیزم فوق‌الذکر برای فرسایش، مکانیزم خوردگی یا انحلال اکسیدی سطوح فلزی تقریباً نیمی از فرسایش واسطه خردایش را در خردایش نوع تر به خود اختصاص می‌دهد (Jang et al, 1989; Tao et al, 2007). فرسایش ساییشی و ضربه‌ای اتلاف فلز به علت نیروهای مکانیکی روی واسطه خردایش است، در حالی که فرسایش حاصل از خوردگی، افت وزنی

---

1- Abrasion  
2- Impact  
3 - Corrosion

مواد سازنده گلوله در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و الکتروشیمیایی است که در یک محیط فعال (نظیر پالپ داخل آسیا در حضور اکسیژن) در سطح گلوله‌ها به وجود می‌آید، می‌باشد (Natarjan, 1996; Chenje et al, 2003). تحقیقات بر روی فرسایش آسیاهای گلوله‌ای بیانگر آن است که می‌توان نرخ فرسایش آسیاها و واسطه خردایش را به طور قابل ملاحظه‌ای با کنترل شیمی خوردگی داخل آسیاها کاهش داد (Radziszewski, 2000).

از طرفی دیگر، پذیرفته شده است که روش آسیای تر در آسیاهای گلوله‌ای و به دنبال آن فرآیند فلوتاسیون، یک مدار بهینه در فرآوری یک کانسنگ مس سولفیدی (مانند کانسنگ مس سرچشمه) می‌باشد. بنابراین فرآیند فلوتاسیون می‌تواند به شدت تحت تاثیر شرایط خردایش قرار گیرد. بروکارد و همکاران (Bruckard et al, 2011) بیان کرده‌اند که راندمان فلوتاسیون به شرایط و محیط خردایش کانه مس سولفیدی یعنی به برهم کنش میان کانی‌ها و بار خردکننده، تولید یا حضور انواع اکسی هیدروکسیدها در پالپ آسیا، گازهای مختلف مورد استفاده در آسیا برای تغییر شرایط اکسایش و کاهش، اثرات معرف‌ها یا مواد شیمیایی مورد استفاده در آسیا و روش خردایش وابسته هستند.

برهم کنش‌های پیچیده‌ای که بین کانی‌های سولفیدی در کانه و نیز بین کانی‌های سولفیدی و بارهای خردکننده رخ می‌دهند، در نتیجه‌ی پیل الکتروشیمیایی است که بین کانی‌های سولفیدی (بدلیل نیمه رسانا بودن) با گلوله‌های فولادی تشکیل می‌شوند. این برهم کنش‌ها به ندرت شناخته شده هستند. شناخت این مسائل با بررسی‌های الکتروشیمیایی و مطالعه واکنش‌های اکسیداسیون و احیا انجام شده در سطح کانی‌ها و همچنین واسطه خردکننده امکان پذیر است. موضوع اتصال گالوانیکی یا برهم کنش بین کانی‌های سولفیدی و بارهای خردکننده و همچنین تاثیر محیط خردایش بر فرآیند فلوتاسیون توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است.

به دلیل اهمیت مطالب بیان شده، این رساله بر روی مطالعه الکتروشیمی محیط خردایش کانه سولفیدی مس (مطالعه موردی: کانسنگ مس سرچشمه) و نیز مطالعه فرسایش گلوله‌های فولادی در

اثر مکانیزم حاصل از خوردگی که یک ماهیت شیمیایی-الکتروشیمیایی دارند، متمرکز شده است. اهداف رساله عبارتند از:

الف) بررسی رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش کانه مس سولفیدی سرچشمه (به عنوان مطالعه موردی) و کانی کالکوپیریت به عنوان کانی اصلی و نیز کانی پیریت به عنوان باطله همراه کالکوپیریت در کانه‌های مس می‌باشد. اندازه‌گیری پتانسیل پالپ، غلظت اکسیژن محلول، پتانسیل استراحت الکترودهای کانی‌ها و گلوله فولادی و تعیین برهم کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و گلوله‌های فولادی در طول خردایش از جمله پارامترهای الکتروشیمیایی مورد مطالعه می‌باشند.

ب) بررسی رفتار فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی، ارزیابی پارامترهای موثر بر فرسایش خوردگی گلوله‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی واسطه خردایش و ارائه یک مدل ریاضی جهت ارتباط پارامترهای موثر با میزان فرسایش حاصل از خوردگی با هدف حداقل کردن میزان خوردگی.

برهم‌کنش گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی، کنترل شرایط خردایش جهت کاهش نرخ خوردگی، تعیین خصوصیات الکتروشیمی و شیمی محیط خردایش و رفتار الکتروشیمیایی کانی‌های سولفیدی با واسطه خردایش توسط محققان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج و تجربیات آن‌ها، هرچند برای هر کارخانه فرآوری ممکن است متفاوت باشد، ولی به عنوان راهنمای عمل و تسلط بر مبانی نظری در مطالعات این رساله برای دستیابی به اهداف فوق‌الذکر مورد استفاده قرار گرفت.

ماده معدنی مورد مطالعه کانسنگ مس سولفیدی سرچشمه و بار ورودی آسیاهای گلوله‌ای آن می‌باشد. در ادامه به معرفی معدن مس سرچشمه و مدار آسیاهای گلوله‌ای آن پرداخته می‌شود.

## ۱-۲. معرفی معدن مس سرچشمه

معدن مس سرچشمه، یکی از بزرگ‌ترین ذخایر شناخته شده مس پورفیری در جهان می‌باشد که در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان واقع است. ذخیره‌ی

این معدن بیش از یک میلیارد تن با عیار متوسط ۰/۷ درصد مس می‌باشد و روزانه به طور متوسط حدود ۴۰ هزار تن سنگ معدن وارد خط اولیه و قدیمی پرعیارسازی می‌شود. محصول آسیا پس از جدایش توسط سیکلون‌ها، به شکل دوغاب به سلول‌های فلوتاسیون وارد می‌گردد. این واحد بر اساس طرح برای تولید روزانه ۱۳۴۸ تن کنسانتره مس-مولیبدن با میانگین عیار مس ۳۲/۱۷ درصد طراحی شده است. لازم به ذکر است با توجه به کاهش عیار مس ورودی به کارخانه تغلیظ از ۱/۱۷ به حدود ۰/۸۶ درصد در شرایط جاری (بر اثر تغییر عیار حد اقتصادی) عیار کنسانتره تولیدی نیز به حدود ۲۷ درصد رسیده است (حسن زاده محله، ۱۳۹۱).

#### ۱-۲-۱. معرفی مدار آسیای کارخانه پرعیارسازی مجتمع مس سرچشمه

خرد کردن سنگ معدن توسط آسیاهای گلوله‌ای و در محیط تر صورت می‌گیرد. تعداد این آسیاها ۸ عدد است که به دو بخش چهارتایی تقسیم شده‌اند و هر آسیا با یک مجموعه سیکلون ۷ تایی در مدار بسته کار می‌کند. نوع آسیاها از نوع سرریز می‌باشد (جدول (۱-۱)). بر اساس طرح اولیه کارخانه، تناژ جامد ورودی هر آسیای گلوله‌ای ۲۲۵/۸ تن بر ساعت با ابعاد ۸۰ درصد ریزتر از ۰/۵ اینچ می‌باشد که به همراه آن آب و شیرآهک به مقدار لازم اضافه می‌شود تا مواد داخل آسیا به صورت دوغاب در آیند و pH آن برای بخش فلوتاسیون تنظیم گردد. بر اساس طرح اولیه، بار در گردش آسیا ۴۰۰ درصد است که معادل ۹۰۳ تن ماده جامد خشک در ساعت می‌باشد. اندیس کار ماده معدنی خوراک آسیا ۱۲/۵، وزن مخصوص جامد ۲/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد جامد دوغاب داخل آسیا ۷۰ است (زید آبادی و بنیسی، ۱۳۸۰).

جدول (۱-۱): مشخصات فنی آسیای گلوله‌ای کارخانه تغلیظ ۱ (Wunder, 1979)

| تعداد آسیا | زمان ماند (min) | ابعاد آسیا |         | بار در گردش |      | برق مصرفی (kW/h) | قدرت موتور (hp) |
|------------|-----------------|------------|---------|-------------|------|------------------|-----------------|
|            |                 | طول (m)    | قطر (m) | درصد        | تناژ |                  |                 |
| ۸          | ۷ تا ۸          | ۸/۲۳       | ۵/۰۳    | ۴۰۰         | ۹۰۳  | ۳۲۵۰             | ۵/۰۳            |

### ۱-۳. سازماندهی رساله

در این رساله سعی شد تا ابتدا مقدمه‌ای از تحقیق، ضرورت انجام تحقیق و اهداف رساله و معرفی مختصری از ماده معدنی مورد مطالعه ارائه گردد که در فصل اول به آن پرداخته شده است. به منظور مطالعه و دستیابی به اهداف تحقیق نیاز به موضوعات و تئوری‌های تحقیق و مروری بر کارهای انجام شده قبلی می‌باشد که در فصل‌های دوم و سوم ارائه می‌گردد. مواد و تجهیزات مورد نیاز و روش انجام آزمایش‌ها در فصل چهارم بیان می‌شود. ارائه نتایج و تجزیه و تحلیل نتایج در سه فصل پنجم، ششم و هفتم آورده می‌شود. فصل پنجم نتایج مربوط به مطالعه الکتروشیمیایی محیط خردایش کانه مس سرچشمه و ویژگی‌های الکتروشیمیایی گلوله‌های فولادی و کانی‌های پیریت و کالکوپیریت ارائه می‌دهد. فصل ششم به ارزیابی فاکتورهای موثر بر میزان خوردگی گلوله‌های فولادی می‌پردازد. در این فصل همچنین نوع مکانیزم خوردگی از طریق مطالعات SEM و سهم مکانیزم خوردگی از فرسایش کل گلوله‌ها تعیین می‌شود. فصل هفتم به مدل‌سازی و ارائه مدل مناسب برای ارتباط بین برخی فاکتورهای مهم و میزان خوردگی گلوله‌ها و همچنین به بررسی تاثیر اندرکنش این فاکتورها بر میزان خوردگی گلوله‌ها با استفاده از مدل‌سازی آماری می‌پردازد. در نهایت نتایج اصلی کار تحقیق ارائه شده در این رساله به همراه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در فصل هشتم ارائه می‌گردد.

فصل دوم:  
کلیات و مبانی نظری تحقیق

## ۱-۲. مقدمه

واکنش‌های شیمیایی که در سطح تشکیل می‌شود، منشاء الکتروشیمیایی دارند که این نظریه اولین بار توسط سالامی<sup>۱</sup> و نیکسون<sup>۲</sup> ارائه شده است (رضائی، ۱۳۷۵). از آنجایی که کانی‌های سولفیدی نیمه هادی هستند پس منبع الکترون بوده و می‌توانند واکنش‌ها را در سطح تشکیل دهند. علاوه بر این کانی‌های سولفیدی قابلیت واکنش شیمیایی با اکسیژن محلول در آب را دارند که این خاصیت به دلیل ناپایداری سولفور رخ می‌دهد. به خاطر این ویژگی‌ها، در محیط آسیا واکنش‌هایی بین کانی‌های سولفیدی و گلوله‌های فولادی در نتیجه انتقال الکترون تشکیل می‌شود که ماهیت الکتروشیمیایی دارند. در فصل‌های بعد توضیح داده می‌شود که این پدیده چه تاثیراتی می‌تواند بر خردایش کانی‌های سولفیدی، فلوتاسیون و خوردگی بار خردکننده داشته باشد. قبل از آشنایی با پدیده الکتروشیمیایی و نقش الکتروشیمی در محیط خردایش یک کانه سولفیدی و فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده، مروری بر تعاریف و مفاهیم کلی در این مبحث ضروری می‌باشد.

## ۲-۲. کلیات و مفاهیم

### ۱-۲-۲. الکتروشیمی، سلول گالوانیکی و مفهوم الکتروود

الکتروشیمی به مفهوم مطالعه پدیده‌های فیزیکی و یا شیمیایی است که در نتیجه تماس یک هدایت کننده الکترونی (اکثراً فلزات) و یک هدایت کننده الکترولیتی (الکترولیت‌ها) رخ می‌دهد. مجموعه حاصل از تماس این دو نوع هدایت کننده، یک الکتروود و یا یک نیم پیل نامیده می‌شود. در واقع الکتروود ماده‌ای رسانا است که از یک سو به بخش فلزی (مانند سیم مسی) و از سوی دیگر به بخش غیرفلزی (نیمه‌رسانا، الکترولیت و یا خلأ) مدار الکتریکی متصل شده و بین آن‌ها ارتباط برقرار می‌کند.

<sup>1</sup> -Salamy

<sup>2</sup> -Nikxon

مفهوم الکتروود در خوردگی هم از همین تعریف اولیه الکتروود گرفته شده است که به صورت یک رسانای فلزی الکتروسیته را به محلول منتقل کرده و یا از آن خارج می‌کند (گل‌عذار و ریاحی، ۱۳۷۸). هر تغییر شیمیایی همراه با تغییر در ساختار الکترونی است. زیرا در پیوندهای شیمیایی، الکترون‌ها دخالت دارند. یک تغییر شیمیایی که در نتیجه انتقال الکترون رخ می‌دهد فرآیند اکسیداسیون و احیاء نامیده می‌شود که الکترون‌ها از ماده‌ای که اکسید می‌شوند به ماده‌ای که احیاء می‌شوند منتقل می‌شوند. الکتروشیمی در واقع بررسی پدیده‌های اکسیداسیون و احیاء است (مفیدی، ۱۳۷۲ و طوسی و همکاران، ۱۳۷۲). فرآیند اکسیداسیون و احیاء می‌تواند حتی زمانی که واکنش دهنده‌ها از یکدیگر مجزا هستند رخ دهد. با توجه به اینکه انتقال الکترون از یک واکنش دهنده به واکنش دهنده‌ی دیگر از طریق یک هادی صورت می‌گیرد، دستگاهی که در آن فرآیند اکسیداسیون و احیاء با این روش انجام می‌شود، سلول گالوانیکی یا ولتایی نامیده می‌شود.

## ۲-۲-۲. پتانسیل سلول، پتانسیل استاندارد و الکتروود مرجع

در اثر اختلاف انرژی بین دو الکتروود در یک سلول گالوانیکی، جریان الکتریکی برقرار می‌شود. این اختلاف انرژی به صورت انرژی پتانسیل بر واحد بار بیان می‌شود، که پتانسیل نام دارد. پتانسیل در هر نقطه به تنهایی قابل اندازه‌گیری نیست اما اختلاف پتانسیل بین دو نقطه با استفاده از ولت‌متر قابل اندازه‌گیری است. ولت‌متر در حد فاصل بین دو الکتروود نصب می‌شود و آنچه که خوانده می‌شود، پتانسیل سلول است. به منظور مقایسه پتانسیل سلول‌های مختلف، یک حالت استاندارد یعنی غلظت مواد حل شده (یون‌ها) یک مولار و فشار گاز یک اتمسفر، برای یک سلول گالوانیکی تعریف می‌شود. در شرایط غلظت و فشار فوق پتانسیل اندازه‌گیری شده پتانسیل استاندارد نامیده می‌شود و با علامت  $E^0$  نمایش داده می‌شود (Boikess and Edelson, 1978; Bard and Faulkner, 2000).

از آنجایی که پتانسیل یک سلول، اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود تشکیل دهنده آن است، بوسیله پتانسیل نسبی دو الکتروود می‌توان مقدار آن را تعیین کرد. به منظور تعیین پتانسیل نسبی یک



الکتروُد، یک سلول گالوانیکی تهیه می‌شود که شامل الکتروُد مورد نظر و مرجع است. الکتروُد مرجع طبق قرارداد همان الکتروُد استاندارد هیدروژن (SHE)<sup>۱</sup> است که شامل گاز  $H_2$  در فشار یک اتمسفر در تماس با یک صفحه پلاتینی و یک محلول با غلظت یک مولار در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است که پتانسیل آن صفر ولت است (Boikess and Edelson, 1978; Bard and Faulkner, 2000). به طور کلی پتانسیل‌ها نسبت به الکتروُد استاندارد هیدروژن بیان می‌شوند اما از آن جا که تامین شرایط استاندارد برای الکتروُد هیدروژن مشکل است، الکتروُد های مبنای دیگری از قبیل الکتروُد نقره-کلرید نقره اشباع و الکتروُد کالومل که از دقت بالایی برخوردارند، به عنوان الکتروُد مرجع استفاده می‌شوند.

در این تحقیق از الکتروُد نقره-کلرید نقره اشباع از ۳ مولار KCl استفاده شد که میزان آن در مقابل الکتروُد استاندارد هیدروژن ۰/۲۱۰ ولت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است (Friis et al., 1998).

## ۲-۳. اصول الکتروشیمیایی محیط خردایش کانی‌های سولفیدی مس

در این بخش، مبانی الکتروشیمی مربوط به خوردگی گلوله‌های فولادی و برهم کنش الکتروشیمیایی (برهم کنش گالوانیکی) که بین کانی‌های سولفیدی و گلوله‌ها در طول فرآیند خردایش رخ می‌دهد، بیان می‌شود. این مبانی برای خوردگی و برهم کنش گالوانیکی تقریباً یکسان است.

### ۲-۳-۱. اصول خوردگی الکتروشیمیایی

#### ۲-۳-۱-۱. تئوری خوردگی

وقوع طبیعی واکنش‌های مربوط به خوردگی را می‌توان به زمان‌های بسیار دور استناد نمود. البته برخوردهای علمی و اصولی با این پدیده به مطالعات و تحقیقات بسیار ارزشمند دانشمند معروف

---

<sup>1</sup> Standard Hydrogen Electrode

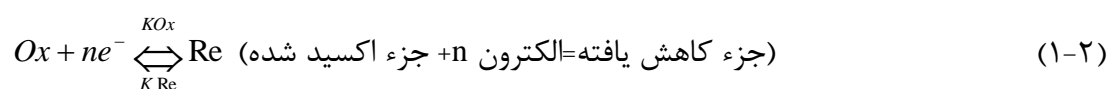
ایتالیایی میشل فارادی<sup>۱</sup> نسبت داده می‌شود. این دانشمند در سال‌های ۱۸۴۰-۱۸۳۰ رابطه بین فعالیت‌های شیمیایی و جریان‌های الکتریکی (نسبت بین مقدار فلز حل شده و جریان برق) را به صورت رابطه معروف  $M=Kit$  ارائه و گزارش نمود که روئین شدن آهن ناشی از تشکیل فیلم بر روی آن است و برای اولین بار گزارش شد که انحلال فلزات ماهیت الکتروشیمیایی دارد (زمانیان، ۱۳۷۶).

### ۲-۳-۱-۲. ملاحظات ترمودینامیکی واکنش‌های خوردگی

خوردگی فلزات در محیط‌های آبی دارای طبیعت الکتروشیمیایی است که شامل دو یا چند واکنش الکتروشیمیایی می‌باشد که روی سطح فلز رخ می‌دهد. تغییر در پتانسیل الکتروشیمیایی یا فعالیت الکترون یا حضور در سطح یک فلز، تاثیر عمیقی روی نرخ واکنش خوردگی می‌گذارد. به همین علت گفته می‌شود واکنش‌های خوردگی الکتروشیمیایی هستند.

در خوردگی الکتروشیمیایی، واکنش اکسایش-کاهش بوسیله‌ی واکنش آندیک (اکسایش) و واکنش کاتدیک (کاهش) که به طور هم‌زمان و به ترتیب اتفاق می‌افتد، انجام می‌شود که شبیه به یک سلول است به همین دلیل فرآیند خوردگی الکتروشیمیایی گلوله را به عنوان یک مدار سلول خوردگی هم توصیف می‌کنند (Fontana, 1986).

یک واکنش الکتروشیمیایی شامل یک جفت واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء می‌باشد که به ترتیب دهنده و گیرنده الکترون هستند. به طور کلی نیم واکنش، ممکن است به شکل ذیل ارائه گردد (گل‌عذار و ریاحی، ۱۳۷۸):



در کل حالت اکسید - احیاء با اختلاف پتانسیل‌ها بیان می‌شود. پتانسیل واکنش را می‌توان با معادله نرنست<sup>۲</sup> محاسبه کرد (گل‌عذار و ریاحی، ۱۳۷۸):

<sup>1</sup> - Michael Faraday

<sup>2</sup> - Nernst

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[Re]} \quad (2-2)$$

که  $E^0$  پتانسیل استاندارد است که نسبت به الکتروود هیدروژن استاندارد سنجیده می‌شود، R ثابت گاز، T دمای مطلق، n تعداد الکترون‌های شرکت کننده در واکنش الکتروشیمیایی، [Ox] انواع اکسید شده، [Re] انواع احیا شده و F ثابت فاراده (۹۶۵۰۰ کیلو کالری) می‌باشد.

یکی از اصول ترمودینامیک آن است که ماده همیشه تمایل به کمترین سطح انرژی دارد. بسیاری از مواد از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند و تمایل به رسیدن به کمترین سطح انرژی را دارند که می‌تواند از طریق تشکیل اکسید یا ترکیب‌های دیگر باشد (احتشام زاده و فهام، ۱۳۸۸). بنابراین مطابق این قوانین فلزات تمایل دارند به حالات پایدارتر اکسیدی خود باز گردند که این امر دلیل بوجود آمدن خوردگی است (گلغذار و ریاحی، ۱۳۷۸). این تغییر انرژی که با برگشت فلزات به حالت طبیعی خودشان همراه است به تغییر انرژی آزاد سیستم یا انرژی آزاد گیبس معروف است که با نماد  $\Delta G$  نشان داده می‌شود. شرط انجام خودبخودی یک فرآیند مانند خوردگی منفی بودن  $\Delta G$  آن می‌باشد. هنگامی که محصولات واکنش انرژی پایین‌تری از واکنش‌کننده‌ها دارند،  $\Delta G$  ممکن است در حالت تعادل با یک ارتباط اصولی به پتانسیل الکتروشیمیایی (Eh) مربوط گردد.

$$\Delta G = -nFE \quad (3-2)$$

دو رابطه (۲-۲) و (۳-۲) در الکتروشیمی اهمیت بسیار زیادی دارند. این روابط امکان تعیین تمایل به خوردگی فلزات مختلف را میسر می‌کنند و اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه‌ی خوردگی به ما می‌دهند. به عنوان مثال، وقتی که یک صفحه مسی در محلولی حاوی یون‌های  $Cu^{2+}$  غوطه‌ور شود، پتانسیل بازگشتی، پتانسیل الکتروودی مربوط به حالت تعادلی  $Cu^{2+}$  و مس فلزی را می‌دهد. برای مثال برای غلظت  $0.01 \text{ g ion/L}$ ، پتانسیل بازگشتی برابر با  $+0.28$  ولت است. حال اگر پتانسیلی که نجیب‌تر از  $+0.28$  است مثلاً  $+0.32$  ولت، به سیستم در حال تعادل اعمال گردد، دیگر سیستم در تعادل نیست و اکسایش مس فلزی مطابق رابطه (۴-۲) منجر به تولید  $Cu^{2+}$  بیشتری می‌شود. این

نشان دهنده شرایط لازم برای خوردگی است. یعنی وقتی یک فلز خورده می‌شود که پتانسیل آن از پتانسیل بازگشتی نجیب‌تر باشد. بر عکس اگر پتانسیل فلز فعالتر از پتانسیل بازگشتی باشد مطابق رابطه (۲-۵) واکنش احیا صورت گرفته، در نتیجه خوردگی نخواهیم داشت، بعبارتی فلز در حالت مصونیت است (گلغزار و ریاحی، ۱۳۷۸).



قابل ذکر است که روابط ترمودینامیکی (۲-۲) و (۲-۳) تنها دامنه‌ای از پتانسیل خوردگی را تعیین می‌کنند که طبیعتاً تمایل به خوردگی دارد و هیچ اطلاعی راجع به میزان یا آهنگ خوردگی نمی‌دهد.

### ۲-۳-۱-۳. اساس سل خوردگی

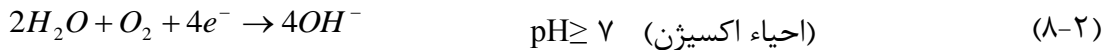
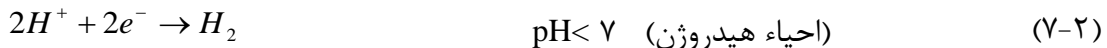
غالباً واکنش‌های کاتدی و آندی خوردگی می‌توانند توأم در روی یک سطح فلزی به وقوع بپیوندند. مناطقی که این واکنش‌ها صورت می‌گیرند به ترتیب مناطق کاتدی و آندی خوانده می‌شوند. سیستمی مشابه شکل (۲-۱) را مبنای سل خوردگی می‌نامند که از ۴ جزء اصلی تشکیل شده است:

الف) آند: آند، فلز و یا محلی در روی سطح فلز است که در آن عمل خوردگی صورت می‌گیرد. این واکنش خوردگی با از دست دادن الکترون توأم بوده و اتم‌های فلز به صورت یون‌های فلزی خورده شده و این یون‌ها به داخل محلول نفوذ می‌کنند. چنانچه محصولات خوردگی به صورت نامحلول ایجاد شوند و این محصولات قادر باشند تا لایه محافظی را بر روی سطح فلز ایجاد نمایند، در این صورت آن را روئین می‌نامند. واکنش خوردگی فلز M به صورت زیر است:



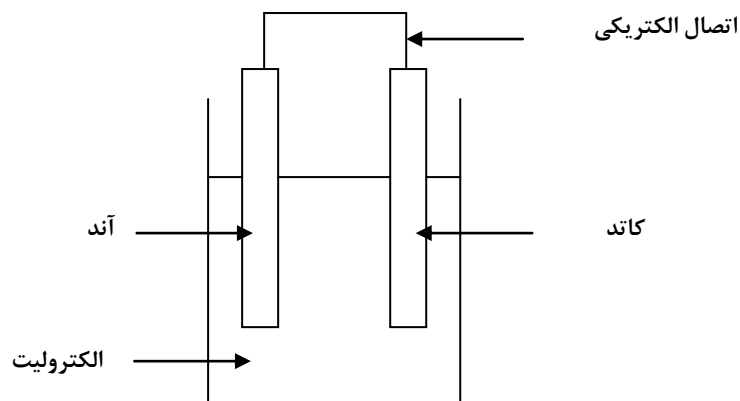
که در آن n تعداد الکترون‌ها است و می‌تواند ۱، ۲ و ۳ باشد.

ب) کاتد: کاتد معمولاً خورده نمی‌شود هر چند ممکن است تحت شرایط ویژه‌ای تخریب گردد. دو واکنش مهم و معمول که در کاتد انجام می‌شود و بستگی به pH محلول دارد عبارتند از:



ج) الکترولیت: به محلولی که قادر است تا جریان الکتریکی بین کاتد و آند را برقرار نماید، الکترولیت گفته می‌شود. آب خیلی خالص به دلیل خاصیت غیر هادی بودن آن الکترولیت نیست. ولی قابل ذکر است که اکثر محیط‌های آبی حداقل هدایت مناسب برای عملکردی همانند یک الکترولیت را دارا می‌باشند.

د) اتصال الکتریکی: برای آن که یک جریان الکتریکی در داخل سل خوردگی بین آند و کاتد برقرار شود نیاز به اتصال الکتریکی می‌باشد (البته وقتی که آند و کاتد قسمتی از یک فلز باشند احتیاج به ارتباط الکتریکی ندارند) و اختلاف انرژی بوجود آمده در یک پیل با اندازه‌گیری میزان پتانسیل به وسیله ولت‌متر امکان‌پذیر می‌باشد. این پتانسیل میزان تمایل خوردگی را بیان می‌کند به طور خلاصه می‌توان اظهار داشت که برای انجام واکنش خوردگی حضور این چهار عامل ضروری است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حذف هر یک از این چهار عامل می‌تواند سبب توقف واکنش خوردگی گردد (سید رضی، ۱۳۷۵).



شکل (۱-۲): اساس سل خوردگی تر (سید رضی، ۱۳۷۵)

## ۲-۳-۱-۴. ملاحظات سینتیکی واکنش‌های خوردگی

در بخش پیشین مفهوم ترمودینامیکی واکنش‌های خوردگی ارائه شد و به دست آمد که با قوانین ترمودینامیک صرفاً تمایل یک سیستم به خورده شدن قابل پیش‌بینی می‌باشد، در حالی که برای بررسی سرعت خوردگی باید سینتیک واکنش‌های خوردگی مورد مطالعه قرار گیرد و می‌توان گفت که مهم‌ترین موضوعی که در رابطه با خوردگی اهمیت دارد سینتیک خوردگی است. قبل از بیان سینتیک واکنش‌ها لازم است تا مفاهیم پلاریزاسیون و پتانسیل مختلط توضیح داده شوند.

الف) پلاریزاسیون: در یک دستگاه شامل الکتروود در حال تعادل، وقتی جریان عبور نکند واکنش شیمیایی صورت نمی‌گیرد و می‌گویند دستگاه بازگشتنی<sup>۱</sup> است. پتانسیل این الکتروود را می‌توان از روی جداول استاندارد و آکتیویته یون مربوط بدست آورد، اما اگر جریان از دستگاه عبور کند تعادل به هم خورده و واکنشی صورت می‌گیرد که می‌گویند دستگاه غیر بازگشتنی<sup>۲</sup> است. پتانسیل آن با مقدار قبل تفاوت خواهد داشت که این اثر را پلاریزاسیون نامیده، و تغییر حاصل در پتانسیل الکتروود نیز پتانسیل اضافی<sup>۳</sup> می‌باشد (زمانیان، ۱۳۷۶). به معنای دیگر پلاریزاسیون به تغییر پتانسیل از پتانسیل تعادلی به پتانسیل خوردگی گفته می‌شود و در حالت کلی به معنی هر نوع تغییر در پتانسیل است که معمولاً با نماد  $\eta$  نشان داده می‌شود (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸).

ب) پتانسیل ترکیبی یا چندگانه: تئوری پتانسیل مخلوط<sup>۴</sup> بیانگر پتانسیل یک الکتروود (برخلاف الکتروودهای مرجع مانند الکتروود استاندارد هیدروژن) است هنگامیکه بخش قابل توجهی جریان آندی یا کاتدی از دو یا چند واکنش اکسایش و کاهش تولید می‌شود اما همزمان جریان کل الکتروود صفر است. در واقع پتانسیل چندگانه یک اصطلاح برای بیان پتانسیل اندازه‌گیری شده در سیستم‌های مرکب از چند جزء می‌باشد. پتانسیل ترکیبی یا چندگانه هنگامی ایجاد می‌شود که دو یا چند جفت واکنش اکسایش-کاهش به طور همزمان در یک سیستم رخ دهد، در حالی که هیچ یک در تعادل

1 - Reversible

6 - Irreversible

3 - Overvoltage

4 - Mixed potential theory

نباشند. در این حالت پتانسیل ایجاد شده در اثر هریک از جفت واکنش‌ها با دیگری متفاوت خواهد بود (رابطه ۹-۲).

$$E_{\text{Re1/Ox1}}^0 + \frac{RT}{n_1 F} \ln \frac{[\text{Ox}_1]}{[\text{Re}_1]} \neq E_{\text{Re2/Ox2}}^0 + \frac{RT}{n_2 F} \ln \frac{[\text{Ox}_2]}{[\text{Re}_2]} \quad (9-2)$$

در پتانسیل ترکیبی مجموع سرعت واکنش‌های کاتدی باید برابر با مجموع سرعت واکنش‌های آندی باشد، بنابراین جریان موثر آن صفر است (Rand and Woods, 1984).

### ۲-۳-۱-۵. سینتیک خوردگی

واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء روی یک فلز در حال خورده شدن در یک پتانسیل پولاریزه شده نسبت به حالت تعادلی اتفاق می‌افتند. بنابراین هنگامی که خوردگی رخ می‌دهد و جریان میان نواحی آند و کاتد برقرار می‌شود، پتانسیل آند به سمت مقادیر مثبت‌تر (نجیب‌تر) افزایش و پتانسیل کاتد به سمت مقادیر منفی‌تر (فعال‌تر) کاهش می‌یابد. با نادیده گرفتن مقاومت پیل الکتروشیمیایی، در یک لحظه پتانسیل آند و کاتد به مقدار مشترک به نام پتانسیل خوردگی  $E_{\text{corr}}$  می‌رسند. پتانسیل خوردگی فلز در یک محیط، پتانسیلی است که در آن مجموع خالص واکنش‌های احیاء با مجموع خالص واکنش‌های اکسیداسیون برابر است. زیرا در این حالت هیچ تجمع بار خالصی وجود ندارد و تمام الکترون‌های آزاد شده توسط واکنش اکسیداسیون بوسیله‌ی واکنش احیاء مصرف می‌شوند (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸). در این پتانسیل، شدت جریان آندی و کاتدی، مطابق تئوری پتانسیل مختلط، یکسان و برابر شدت جریان خوردگی ( $i_{\text{corr}}$ ) است که مستقیماً متناسب با سرعت خوردگی است. با داشتن مساحت سطحی که جریان از آن می‌گذرد و با استفاده از قانون فارادی (معادله ۲-۱۰) می‌توان جریان را تبدیل به سرعت خوردگی کرد (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸).

$$CR = \frac{iM}{nF\rho} \quad (10-2)$$

که  $i$  دانسیته جریان (آمپر بر سانتی متر مربع)،  $M$  وزن اتمی فلز (گرم بر مول)،  $n$  تعداد الکترون‌های منتقل شده (گرم اکی‌والان بر مول)،  $F$  ثابت فارادی (۹۶۵۰۰ کولمب بر گرم اکی‌والان) و  $\rho$  چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب) می‌باشد. در این حالت واحد سرعت خوردگی بر حسب سانتی متر بر ثانیه بدست می‌آید که حالت عمومی ندارد، با ضرب کردن در  $10^{10} \times 1/242$  می‌توان این واحد را به هزارم اینچ در سال یعنی mpy تبدیل کرد.

## ۲-۳-۲. برهم کنش‌های گالوانیکی در محیط آسیا در طول خردایش کانه

### ۲-۳-۲-۱. برهم کنش گالوانیکی

هدایت الکتریکی کانی‌های سولفیدی منجر به انتقال الکترون نه فقط میان یون‌های محلول و سطح کانی می‌شود بلکه منجر به انتقال الکترون میان کانی‌های سولفیدی و واسطه خردایش هم می‌شود. برهم کنش میان کانی‌های سولفیدی و واسطه خردایش واکنش‌های الکتروشیمیایی را تشکیل می‌دهد که برهم کنش گالوانیکی نامیده می‌شود (Huang, 2005). نقش کانی‌های سولفیدی به عنوان کاند یا آند بوسیله واکنش‌پذیری الکتروشیمیایی که با پتانسیل مدار باز<sup>۱</sup> نشان داده می‌شود، تعیین می‌گردد. پتانسیل اندازه‌گیری شده یک پیل در حالی که از آن هیچ جریانی عبور نمی‌کند را پتانسیل مدار باز یا پتانسیل استراحت<sup>۲</sup> می‌گویند. در طول اندازه‌گیری‌های پتانسیل استراحت (ساکن)، هیچ جریانی در سیستم وجود ندارد و پتانسیل به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود تا به یک مقدار ثابت برسد. با استفاده از پتانسیل استراحت به راحتی می‌توان فهمید که در یک واکنش الکتروشیمیایی شامل دو نیم سلول، پتانسیل استراحت پایین‌تر نشانه اکسایش و پتانسیل استراحت بالاتر نشانه احیا می‌باشد (Cheng, 1991). اگر واکنش کلی اکسیداسیون و احیا را به صورت معادله (۲-۱۱) در نظر

<sup>۱</sup> - Circuit open potential

<sup>۲</sup> - Rest potential

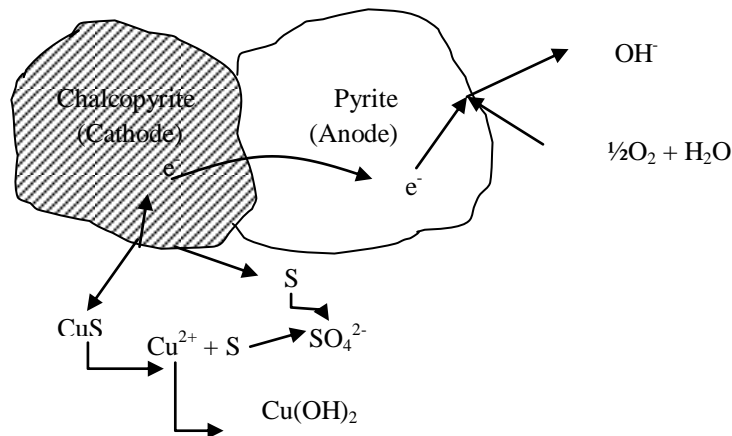


گرفته شود، آنگاه پتانسیل چنین نیم واکنش‌هایی در ۲۵ درجه سانتیگراد با توجه به رابطه (۲-۲) به وسیله معادله (۱۲-۲) بیان می‌شود (گل‌عذار و ریاحی، ۱۳۷۸):



$$Eh = E^0 - 0.059 \left( \frac{m}{n} \right) pH + \left( \frac{0.059}{n} \right) \text{Log} \left( \frac{[Ox]^x}{[Re]^y} \right) \quad (12-2)$$

به طور خلاصه سه سیستم الکتروشیمیایی برای توصیف برهم کنش گالوانیکی قابل توصیف است: الف) سیستم کانی-کانی، ب) سیستم کانی-واسطه خردایش و ج) سیستم کانی-کانی-واسطه خردایش الف) سیستم کانی-کانی: هنگامی که دو کانی سولفیدی در تماس با یکدیگر در محلول قرار می‌گیرند یک سلول گالوانیک تشکیل می‌شود که کانی با پتانسیل استراحت بالاتر الکترون‌ها را از کانی با پتانسیل استراحت پایین‌تر دریافت می‌کند (شکل (۲-۲)). لذا کانی با پتانسیل استراحت بالاتر کاهش می‌یابد و کانی با پتانسیل استراحت پایین‌تر اکسید می‌شود (Holmes and Crundwell, 1995).

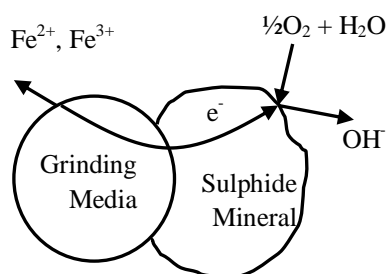


شکل (۲-۲): مدل برهم‌کنش گالوانیکی بین دو کانی سولفیدی (Ekmeççi and Demirel, 1997)

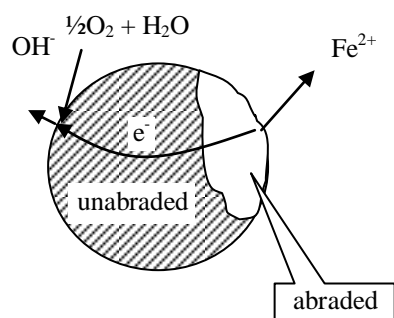
ب) سیستم کانی-واسطه خردایش: مکانیزم برهم کنش گالوانیکی میان تک کانی سولفیدی و واسطه فولادی در شکل (۳-۲) نمایش داده شده است. این مدل الکتروشیمیایی توسط تعدادی زیادی از محققان تایید شده است (Adam et al., 1984; Yelloji Rao and Natarajan, 1988; Martin et al., 1984).

al.,1991; Peng et al, 2003a; 2003b). واسطه فولادی نسبت به همه کانی‌های سولفیدی آند است

و بنابراین الکترون‌ها از واسطه به طرف کانی‌ها جریان می‌یابند و واسطه با نرخ سریع خورده می‌شود. خوردگی واسطه خردایش موجب سائیدگی هم می‌شود که در آن صورت سطح سائیده شده با سطح سائیده نشده به ترتیب به عنوان آند و کاتد عمل می‌کنند (شکل (۲-۴)) و الکترون‌ها از منطقه سائیده شده به سمت ناحیه سائیده نشده به علت اختلاف در پتانسیل الکتروشیمیایی میان این دو ناحیه جریان می‌یابند. بنابراین اکسیژن محلول در ناحیه سائیده نشده بواسطه کاهش کاتدیک اکسیژن کاهش می‌یابد و آهن فلزی با تولید یون‌های فرو در سطح مشترک آب-گلوله اکسید می‌شود.



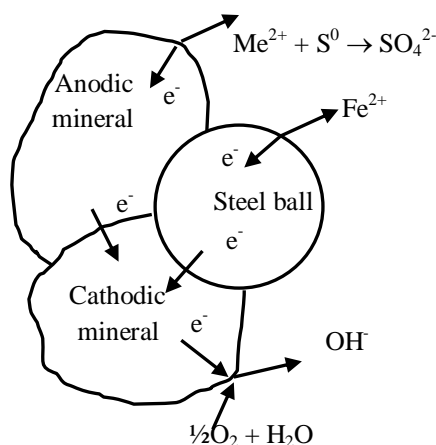
شکل (۲-۳): مدل برهم‌کنش گالوانیکی میان تک کانی سولفیدی و واسطه فولادی (Adam, 1983)



شکل (۲-۴): مدل خوردگی یک گلوله فولادی شامل ناحیه سائیده شده و غیر سائیده شده (Adam, 1983)

ج) سیستم کانی-کانی-واسطه خردایش: پوزو و ایواساکی (Pozzo and Iwasaki, 1989) یک مدل الکتروشیمیایی را برای کانی-کانی-واسطه خردایش در یک سیستم مدار کوتاه ۳ الکترودی توسعه دادند که در شکل (۲-۵) نمایش داده شده است. آن‌ها گزارش دادند که در خردایش کانه سولفیدی

کمپلکس Cu-Pb-Zn متشکل از کالکوپیریت، گالن و اسفالریت، نجیب‌ترین الکتروود (بالاترین پتانسیل استراحت)، کالکوپیریت است. کالکوپیریت به عنوان کاتد و واسطه خردایش همیشه به عنوان آند عمل می‌کند. کانی‌های سولفیدی دیگر رفتار حد واسطه آندیک و کاتدیک را با توجه به پتانسیل استراحت نسبت به یکدیگر دارند.



شکل (۲-۵): مدل برهم‌کنش گالوانیکی میان دو کانی سولفیدی و واسطه خردایش (Pozzo and Iwasaki, 1989)

## ۲-۲-۳-۲. سینتیک واکنش‌های گالوانیکی

هنگامی که جریان I از یک الکتروود انتقال می‌یابد دو جریان مخالف آند ( $i_a$ ) و کاتد ( $i_c$ ) را خواهیم داشت که مجموع جبری این جریان‌ها مساوی با I در معادله (۲-۱۳) است.

$$I = i_c + i_a \quad (۲-۱۳)$$

هنگامی که به وضعیت تعادل می‌رسیم مقدار جریان آندی مساوی مقدار جریان کاتدی و در جهت مخالف آن می‌باشد ( $i_a = -i_c$ ) یعنی جریان خالص سیستم در این حالت صفر می‌شود، در حالی که  $i_c$  و  $i_a$  مقادیر صفر را دارا نمی‌باشند، این مقادیر قابل اندازه‌گیری نیست. این جریان را جریان تبدیلی<sup>۱</sup> می‌نامند که با علامت  $i_o$  نشان می‌دهند ( $i_a = -i_c = i_o$ ) و بیان می‌کند که حتی در حال تعادل، هر یک از واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء با یک سرعت مشخص رخ می‌دهند (سید رضی،

<sup>۱</sup> -Exchange current

۱۳۷۵ و احتشامزاده و مهام، ۱۳۸۸). در واکنش‌های الکتروشیمیایی اگر سرعت واکنش توسط سرعت گونه‌های واکنش‌دهنده از محلول به سطح الکتروود محدود گردد، اصطلاحاً گفته می‌شود واکنش تحت کنترل انتقال جرم قرار دارد. در این حالت مقدار دانسیته جریان که معادل سرعت واکنش محسوب می‌شود از رابطه فیک<sup>۱</sup> بدست می‌آید (Li et al, 1992).

$$i = nFD \frac{C_b - C_o}{\delta} \quad (14-2)$$

در این رابطه: n تعداد بار، F ثابت فارادی، D ضریب نفوذ (متر مربع بر ثانیه)،  $C_b$  غلظت واکنش‌دهنده‌ها در توده محلول (مول بر متر مکعب)،  $C_o$  غلظت واکنش‌دهنده‌ها در مجاور سطح الکتروود (مول بر متر مکعب) و  $\delta$  ضخامت لایه نفوذی (متر) است.

ضخامت لایه نفوذی به پارامترهای فیزیکی الکتروولیت بستگی دارد و با افزایش حرکت الکتروولیت کاهش می‌یابد. در این حالت چنانچه سرعت نفوذ خیلی کمتر از سرعت انتقال بار باشد مقدار  $C_o$  به صفر میل می‌کند و سرعت واکنش به مقدار دانسیته جریان حد ( $i_L$ ) محدود می‌شود (معادله ۲-۱۴). در شرایطی که کندترین مرحله در بین مراحل مختلف فرآیند انجام یک واکنش الکتروشیمیایی، مربوط به انتقال الکترون بین الکتروود و گونه واکنش‌دهنده باشد، واکنش تحت کنترل اکتیواسیون یا انتقال بار خواهد بود (سید رضی، ۱۳۷۵ و احتشام زاده و فهام، ۱۳۸۸).

$$i_L = nFD \frac{C_b}{\delta} \quad (15-2)$$

هنگامی یک واکنش تحت کنترل انتقال بار می‌باشد، ارتباط بین جریان و پتانسیل برای واکنش در عدم حضور تاثیرات انتقال جرم مطابق معادله باتلر-والمر<sup>۲</sup> می‌باشد (سید رضی، ۱۳۷۵، گلعدار و ریاحی، ۱۳۷۸ و احتشام زاده و فهام، ۱۳۸۸):

$$i = i_o \left[ e^{\frac{-\alpha n F \eta}{RT}} - e^{\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}} \right] \quad (16-2)$$

<sup>1</sup> - Fick

<sup>2</sup> - Butler-Volmer

که  $i_o$  دانسیته جریان تبادلی،  $\alpha$  ضریب انتقال بار و  $\eta$  پتانسیل یا ولتاژ اضافی (ولت) است. همچنین  $\alpha\eta$  پلاریزاسیون آندی و  $(1-\alpha)\eta$  پلاریزاسیون کاتدی را مشخص می‌کند. بقیه پارامترها هم که در معادلات پیشین معرفی شدند.

اگر مقدار پتانسیل اضافی بیش از حد بزرگ باشد معادله باتلر-والمر به معادله زیر که به معادله تافل مشهور است تغییر می‌کند.

$$\log i = \log i_o + \frac{-\alpha nF \eta}{2.3RT} \quad (17-2)$$

در معادله تافل به راحتی می‌توان مقادیر پلاریزاسیون آندی و کاتدی را از معادلات (2-18) و (2-19) بدست آورد.

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_o} \quad (18-2)$$

$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_o} \quad (19-2)$$

که  $\beta_a$  و  $\beta_c$  به ترتیب ثابت‌های تافل برای واکنش‌های نیم پیل آندیک و کاتدیک هستند که با توجه به کاربردشان می‌توانند +1 و -1 ولت باشند و از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$\beta_a = 2.3 \frac{RT}{\alpha nF} \quad (20-2)$$

$$\beta_c = 2.3 \frac{RT}{(1-\alpha)nF} \quad (21-2)$$

در مقادیر پایین پتانسیل اضافی (تحت پلاریزاسیون کم) با فرض  $2\alpha = 1$ ، با استفاده از خواص خطی تابع نمایی ( $e^x = 1+x$ ) معادله باتلر-والمر به صورت زیر خلاصه می‌گردد (گلعدار و ریاحی، 1378):

$$i = i_o + \frac{nF \eta}{RT} \quad (22-2)$$

هولمز و کروندول (Holmes and Crundwell, 1995) بیان کردند اگر نرخ واکنش هم به انتقال جرم و هم انتقال بار محدود گردد در آن صورت مدل ریاضی زیر برای بیان برهم کنش گالوانیکی در ولتاژ اضافی بالا مناسب می‌باشد که از ترکیب دو معادله (2-14) و (2-16) بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left[ \frac{i_L - i}{i_L \left( \frac{i}{i_o} + 1 \right)} \right] \quad (2-23)$$

معادلات فوق علاوه بر درک پدیده گالوانیک (تعیین جریان گالوانیک و پتانسیل مختلط)، ابزاری مفید برای درک پدیده خوردگی و محاسبات مربوط می‌باشند که در بحث خوردگی در معادلات فوق به جای دانسیته جریان تبادلی ( $i_o$ )، دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) قرار می‌گیرد.

### ۳-۳-۲. روش‌های الکتروشیمیایی برای مطالعه پدیده‌های خوردگی و برهم‌کنش گالوانیکی

در این تحقیق برای مطالعه برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌های سولفیدی و گلوله‌های فولادی و نیز مطالعه خوردگی گلوله‌های فولادی در آسیاهای گلوله‌ای از روش ولتامتری روبش خطی و تکنیک پلاریزاسیون استفاده گردید.

#### ۳-۳-۲-۱. ولتامتری روبش خطی (LSV)<sup>۱</sup>

ولتامتری شامل گروهی از روش‌های الکتروشیمیایی است که بر اساس اندازه‌گیری جریان منتج شده از اکسیداسیون یا احیاء در سطح الکتروود و به دنبال اعمال یک پتانسیل متغیر به سل الکتروشیمیایی بنا شده‌اند. در ولتامتری پتانسیل به وسیله پتانسیواستات بین الکتروود کار و مرجع اعمال می‌شود و جریان اندازه‌گیری می‌شود و در پایان منحنی جریان بر حسب پتانسیل رسم می‌شود.

ولتامتری با روبش خطی پتانسیل ساده‌ترین روش ولتامتری است که در آن، پتانسیل شیب داری را به الکتروود ساکن شناور در محلول ساکن اعمال می‌کنند و تغییرات جریان حاصل را نسبت به پتانسیل الکتروود ثبت می‌نمایند. منحنی بدست آمده ولتاموگرام نامیده می‌شود. در این روش که جزء روش‌های پتانسیوستایی است از سه الکتروود کار، کمکی و مرجع استفاده می‌شود و بسته به جهت روبش پتانسیل، فرآیند الکتروودی و جریان وابسته به آن ممکن است ماهیت آندی یا کاتدی داشته باشد. در

<sup>۱</sup> - Linear sweep voltammetry

این روش پتانسیل بر اساس یک برنامه زمانی معینی از یک مقدار اولیه  $E_1$  با سرعت معینی تا یک پتانسیل نهایی  $E_2$  روبش می‌کند. با افزایش پتانسیل، شدت جریان افزایش می‌یابد و با رسیدن به نقطه‌ای که در آن سیستم تحت کنترل انتقال جرم باشد به مقدار ماکزیمم رسیده و سپس با تخلیه شدن لایه نفوذ از گونه‌های فعال الکتروشیمیایی، شدت جریان کاهش می‌یابد. حال اگر پتانسیل از میزان اخیر  $E_2$  در جهت عکس روبیده شود بسته به نوع سیستم، منحنی شدت جریان-زمان (پتانسیل) متفاوتی ایجاد می‌شود در این صورت روش ولتامتری چرخه‌ای (CV) را خواهیم داشت و از روی شکل منحنی‌های ایجاد شده می‌توان به نوع سیستم از نظر برگشت‌پذیری یا برگشت‌ناپذیری پی برد و یا با اطلاع از نوع سیستم می‌توان تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش الکترودی را بدست آورد (Kissinger and Heineman, 1996; Bard and Faulkner, 2000; Wang, 2000; Zoski, 2007).

## ۲-۳-۳-۲. تکنیک پلاریزاسیون

روش پلاریزاسیون الکتروشیمیایی ابزار نسبتاً سریعی برای تعیین تجربی رفتار پلاریزاسیون یک فلز در شرایط مشخص محسوب می‌شود. دو نوع اصلی رفتار پلاریزاسیون، پلاریزاسیون فعال‌سازی و پلاریزاسیون غلظتی است. پلاریزاسیون فعال‌سازی توسط انرژی آزاد یا نیروی محرکه پتانسیل در سطح الکتروود کنترل می‌شود. پلاریزاسیون غلظتی پلاریزاسیونی است که با انتقال جرم گونه‌های واکنشگر به سطح الکتروود و یا انتقال جرم محصولات واکنش از سطح الکتروود کنترل می‌شود (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸).

میزان خوردگی یک فلز و جریان گالوانیک بین کانی و گلوله فولادی را می‌توان از منحنی پلاریزاسیون آن تخمین زد. منحنی‌های پلاریزاسیون، رسم جریان به یا از سطح الکتروود کاری بر حسب پتانسیل الکتروشیمیایی سطح الکتروود می‌باشند (Tao and Parekh, 2004). با تغییر پتانسیل الکتروود حالت‌های اکسیداسیون متفاوت در سطح الکتروود را می‌توان بررسی کرد. جریان حاصله معیاری از سرعت واکنش‌ها در هر پتانسیل می‌باشد و یا بر عکس می‌توان جریان را تغییر داد تا اکسیداسیون متفاوتی به

وجود آورد و پتانسیل حاصل را اندازه گرفت. این منحنی‌ها با استفاده از فنون پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک، پتانسیودینامیک، گالوانوستاتیک و گالوانودینامیک بدست می‌آید. فنون پلاریزاسیون پتانسیواستات و پتانسیودینامیک بر اساس کنترل پتانسیل الکتروشیمیایی الکتروود و اندازه‌گیری جریان می‌باشند که اندازه‌گیری‌ها بوسیله دستگاه پتانسیواستات انجام می‌گیرد. در حالی که فنون پلاریزاسیون گالوانوستاتیک و گالوانودینامیک شامل کنترل جریان و اندازه‌گیری پتانسیل الکتروشیمیایی مربوط می‌باشد و اندازه‌گیری‌های بوسیله دستگاه گالوانوستات انجام می‌پذیرد (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸).

در این تحقیق برای تعیین منحنی‌های پلاریزاسیون یا تافل از روش اعمال پتانسیل و اندازه‌گیری جریان و از فنون پتانسیودینامیک به دلیل توانایی آن‌ها در جمع‌آوری داده‌ها نسبت به فنون پتانسیواستاتیک (احتشام‌زاده و مهام، ۱۳۸۸)، استفاده گردید. رسم منحنی‌های پلاریزاسیون با روش پتانسیودینامیک بوسیله دستگاه پتانسیواستات انجام می‌گیرد که بوسیله این دستگاه ولتاژ ثابتی که ولتاژ اعمالی یا ولتاژ تنظیم خوانده می‌شود، بین الکترودهای کاری و مرجع اعمال شده و جریان اندازه‌گیری می‌شود. اصول کار دستگاه پتانسیواستات بر مبنای سیستم سه الکتروود است که شامل: ۱- الکتروود کاری که تکه‌ای از ماده مورد بررسی است و بوسیله سیمی ارتباط الکتریکی برقرار می‌کند (الکتروود کانی و گلوله فولادی)، ۲- الکتروود مرجع که برای سنجش پتانسیل بکار می‌رود و معمولاً الکتروود استاندارد کالومل یا الکتروود نقره/کلرور نقره بکار می‌رود و ۳- الکتروود خنثی معمولاً از پلاتین است و تغییری در محیط مورد آزمایش نمی‌دهد.



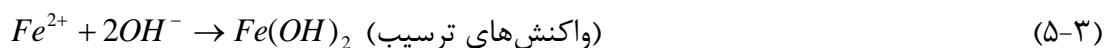
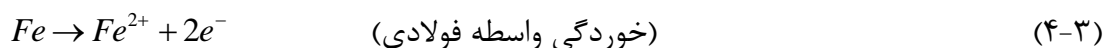
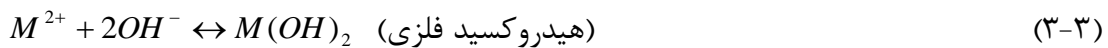
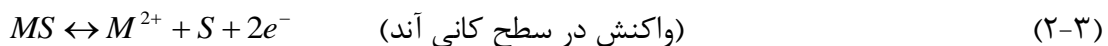
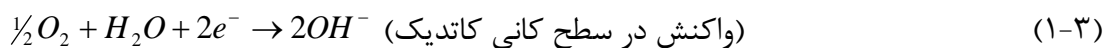
فصل سوم:

مروری بر تحقیقات گذشته

### ۳-۱. مروری بر کارهای انجام شده قبلی

با توجه به اهداف رساله که مطالعه الکتروشیمی محیط خردایش کانی‌های سولفیدی و مدل‌سازی آن برای کنترل میزان خوردگی بار خردکننده می‌باشد، مروری بر تحقیقات مرتبط ارائه می‌شود. ری و فرمانک (Rey and Formanek, 1960)، اولین کسانی بودند که اثر آسیا را بر فلوتاسیون انتخابی کانه‌های سرب و روی گزارش دادند و تاثیر واسطه خردایش و اهمیت برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی سولفیدی و واسطه خردایش را تشخیص دادند. آن‌ها مشاهده کردند که شناورسازی اسفالریت بوسیله گلوله‌های فولادی تغییر می‌کند و خردایش کانه سرب و روی در یک آسیای آهنی، قابلیت شناورسازی اسفالریت را کاهش می‌دهد.

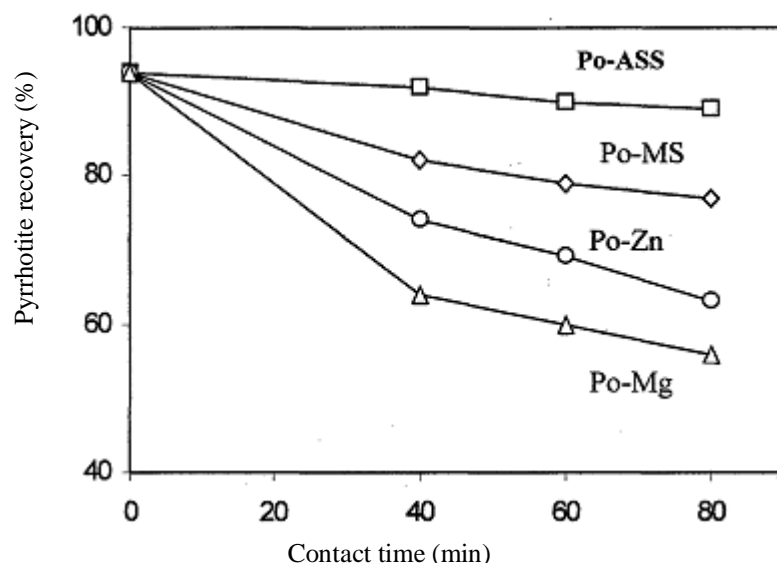
باند (Bond, 1964)، در بررسی اهمیت خوردگی واسطه خردایش بیان کرد که در خردایش تر فرسایش فلز حدود ۷ بار بیشتر از خردایش خشک است و آن را به خوردگی نسبت داد. هوی و همکاران (Hoey et al., 1975)، گزارش دادند فرسایش فلز با تغییر روش خردایش از خشک به تر برای همان کانی افزایش می‌یابد و نتیجه گرفتند که این اختلاف به علت خوردگی است. پاولیکا و ایواساکی (Pavlica and Iwasaki, 1982)، در بررسی‌های خود مشاهده کردند که واکنش‌های ذیل در سطح تماس کانی‌های سولفیدی و واسطه خردایش رخ می‌دهد.



آدام (Adam, 1983)، یک مدل الکتروشیمیایی برای توصیف اثر برهم‌کنش گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی‌های سولفیدی روی خصوصیات سطح و شناورسازی کانی‌ها توسعه دادند. این مدل الکتروشیمیایی در شکل‌های (۲-۳) و (۲-۴) در فصل دوم نشان داده شده‌اند.

ناتاراجان و ایواساکی (Natarajan and Iwasak, 1984)، در بررسی جنبه‌های الکتروشیمیایی بار خردکننده مشاهده نمودند که اتصال گالوانیکی گلوله فولادی نرم با مگنتیت یا پیروتیت منجر به تشکیل انواع هیدروکسیدهای آهن روی سطح کانی می‌شود. اکسیژن نیز خوردگی بار خردکننده را تسریع می‌بخشد و منجر به تولید انواع آهن هیدروکسی بیشتری بر روی سطح کانی می‌شود.

آدام و همکاران (Adam et al., 1984) و پوزو و ایواساکی (Pozzo and Iwasaki, 1989)، برهم‌کنش گالوانیکی با کانی‌های سولفیدی آهن‌دار را بررسی و جریان گالوانیک بین کانی‌های سولفیدی آهن‌دار از قبیل پیریت و پیروتیت با واسطه‌های خردایش مختلف را اندازه‌گیری نمودند (جدول (۳-۱) و شکل (۳-۱)). آن‌ها مشاهده نمودند که تماس الکتروشیمیایی کانی‌های سولفیدی آهن‌دار از قبیل پیریت و پیروتیت با فعالیت الکتروشیمیایی بیشتر تاثیر منفی بر شناورسازی دارند.



شکل (۳-۱): تاثیر برهم‌کنش گالوانیکی بر فلوتاسیون پیروتیت (Adam et al., 1984)

جدول (۱-۳): جریان گالوانیک اندازه گیری شده بعد از تماس کانی های پیریت (Py) و پیروتیت (Po) با فولاد ضد زنگ (SS)، فولاد نرم (MS)

| مرجع                    | بازیابی فلوتاسیون (%) |                | جریان گالوانیک (میکروآمپر) | ترکیب الکتروود   | کانی |
|-------------------------|-----------------------|----------------|----------------------------|------------------|------|
|                         | بدون تماس             | ۱۲۰ دقیقه تماس |                            |                  |      |
| Pozzo and Iwasaki, 1989 | ۹۰                    | ۶۷             | ۳/۱                        | Py-MS            | Py   |
|                         | ۹۰                    | ۸۰             | ۲/۳-۳/۲                    | Py-Po-MS         | Py   |
|                         | ۹۰                    | ۲۳             | ۱/۶                        | Po-MS            | Po   |
|                         | ۹۰                    | ۷۰             | ۰/۷                        | Po-Py-MS         | Po   |
| Adam et al., 1984       | شکل (۱-۳)             |                | ۰/۰۲۲                      | ASS <sup>۱</sup> | Po   |
|                         |                       |                | ۰/۴۳                       | MSS <sup>۲</sup> | Po   |
|                         |                       |                | ۵/۷                        | MS               | Po   |
|                         |                       |                | ۶/۲                        | Zn               | Po   |
|                         |                       |                | ۷                          | Mg               | Po   |

**ایواساکی و همکاران** (Iwasaki et al., 1985, Iwasaki et al., 1988)، اهمیت نسبی فرسایش حاصل از خوردگی و سایشی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی های آنها نشان داد که در عدم حضور سولفیدها، فرسایش سایشی مکانیزم عمده فرسایش واسطه خردایش می باشد و این نوع فرسایش بیشتر به خصوصیات رئولوژی پالپ بستگی دارد، در حالی که در حضور سولفیدها و بویژه در حضور اکسیژن فرسایش گلوله ها به شدت افزایش می یابد که این را به خوردگی نسبت دادند. آنها همچنین نشان دادند که فرسایش حاصل از خوردگی آسیا تاثیر معکوسی بر فلوتاسیون داشته و با بکارگیری نیتروژن در آسیا، استفاده از ترکیب های آلیاژی مس و آسیاهای نیمه خود شکن می تواند کاهش یابد.

**دان (Dun, 1985) و آبوزریبا و همکارانش** (Abuzriba et al., 1992)، در بررسی های خود بر روی خوردگی به این نتیجه رسیدند که سایش و خوردگی اثرات هم افزائی را نسبت به هم نشان می دهند و ضایعات فلزی را در محیط های آبی افزایش می دهند. ضمناً آنها اشاره داشتند به اینکه جلوگیری و کنترل خوردگی، به طور ویژه ای سایش را هم کاهش می دهد.

<sup>1</sup> - Austenitic stainless steel

<sup>2</sup> - Martensitic stainless steel

**موری و همکاران** (Moore et al., 1988)، در بررسی فاکتورهای موثر بر فرسایش آسیاهای گردان گزارش دادند که نرخ فرسایش بار خردکننده به میکروساختارها مانند خصوصیات مکانیکی و الکتروشیمیایی گلوله، نسبت سختی گلوله به مواد، مینرالوژی کانه از قبیل حضور سولفیدها، pH گلاب و غلظت اکسیژن داخل آسیا، اندازه گلوله و توزیع ابعادی گلوله بستگی دارد.

**جانگ و همکاران** (Jang et al., 1989)، تاثیر برهم کنش گالوانیکی بر فرسایش بار خردکننده را مورد بررسی قرار داده و گزارش دادند که از بین سه مکانیزم فرسایش، مکانیزم خوردگی یا انحلال اکسیدی سطوح فلزی تقریباً نیمی از فرسایش واسطه خردایش را به خود اختصاص می دهد.

**گوندوآر و همکاران** (Gundewar et al., 1990)، در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی فرسایش گلوله در خردایش یک هماتی-مگنتیتی نشان دادند که حضور ۲٪ پیریت با یک کانه هماتیت-مگنتیت در طول خردایش تر که تحت اکسیژن می باشد، فرسایش واسطه خردایش را تا ۳۳/۵٪ افزایش می دهد و حضور ۱۰ درصد وزنی پیریت تا ۵۴ درصد فرسایش بار خردکننده را تحت شرایط مشابه افزایش می دهد. آن ها تایید کردند که با افزایش زمان خردایش و ریزتر شدن اندازه ذرات تولید شده (افزایش سطح ذرات خرد شده) فرسایش بار خردکننده افزایش می یابد. همچنین آن ها نشان دادند که در طول خردایش تحت شرایط مختلف گازدهی فرسایش بار خردکننده با نوع گلوله تغییر می کند و گلوله های فولادی چدنی با کروم بالا فرسایش حاصل از خوردگی کمی دارند و این رفتار را به رویبندی گلوله های کروم بالا به ویژه در حضور اکسیژن نسبت دادند.

**وانگ و زی** (Wang and Xie, 1990)، با بازنگری تأثیر واسطه خردکننده و محیط واکنش های فلوتاسیون کانی های سولفیدی، نتیجه گرفتند که واکنش الکتروشیمیایی و مرفولوژی سطح خاصیت شناوری کانی های سولفیدی و خصوصیات سطح کانی ها را تحت تأثیر قرار می دهد و اندازه سطح و ترکیب محلول نیز از عوامل مؤثر دیگر در شناوری کانی های سولفیدی است. انتخاب گلوله ها و میله های سرامیکی یا ضد زنگ، هوادهی با نیتروژن، خردکردن کانی به طور جداگانه و ترکیب

صحیحی از آن‌ها قبل از فلوتاسیون از پارامترهای مؤثر برای کم کردن تأثیرات متقابل گالوانیکی هستند. حضور اکسیژن تأثیرات متقابل گالوانیکی را افزایش می‌دهد.

هیس و رالستون (Hayes and Ralston, 1988)، گرانو و همکاران (Grano et al., 1990)، در مطالعه تاثیر واسطه خردایش بر شیمی پالپ بویژه Eh نشان دادند که واسطه کروم بالا با فعالیت الکتروشیمیایی کم، ۲۰۰ میلی‌ولت پتانسیل پالپ بالاتری را در مقایسه با فولاد نرم در طول خردایش کانه سرب-روی تولید می‌کند. بنابراین واسطه خردایش با فعالیت الکتروشیمیایی کمتر، شناورسازی کانی‌های سولفیدی با قابلیت فلوته شدن بالا از قبیل کالکوپیریت را بهبود می‌بخشد.

گرانو و همکاران (Grano et al., 1990)، تأثیر محیط الکتروشیمیایی در رفتار فلوتاسیون کانسنگ‌های پیچیده سولفیدی مس و سرب را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اگر کانسنگ سرب-روی در یک آسیای سرامیکی خرد شود، به دلیل آنکه حاوی کانی سولفیدی بیشتری است پتانسیل آن نسبت به کانسنگ مس کمتر است و هنگامی که خردایش در یک آسیای گلوله‌ای آهنی صورت گیرد پتانسیل نسبت به آسیای سرامیکی کاهش می‌یابد. آن‌ها مشاهده کردند این کاهش برای کانسنگ سرب-روی ۴۱۰ میلی‌ولت و برای کانسنگ مس ۴۵۴ میلی‌ولت است و بیان کردند کاهش در پتانسیل نتیجه واکنش‌های اکسایش و احیاء ذیل می‌باشد:



همچنین آن‌ها نشان دادند که بازیابی فلوتاسیون کالکوپیریت و بازیابی سولفیدهای آهنی پس از خردایش در یک آسیای سرامیکی نسبت به آسیای گلوله‌ای افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.

آن و گبهارت (Ahn and Gebhardt, 1991)، در بررسی تاثیر بر هم‌کنش گالوانیکی بین واسطه خردایش و کالکوپیریت بر فلوتاسیون کالکوپیریت، جریان گالوانیک میان واسطه فولادی با کربن بالا و کالکوپیریت را اندازه‌گیری کردند و تشخیص دادند که اندازه برهم‌کنش گالوانیکی میان واسطه فولادی با کربن بالا و کالکوپیریت به نسبت مساحت سطح و نیز محیط شیمیایی (pH و غلظت اکسیژن)

وابسته است. همچنین نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که: ۱- خردایش با واسطه فولادی کربن بالا در یک آسیای تحت گاز نیتروژن که pH محلول خردایش آن هم پایین است، تاثیر مضرّی بر بازیابی کالکوپیریت در یک pH ثابت فلوتاسیون دارد، ۲- در حضور هوا فلوتاسیون کالکوپیریت چندان تحت تاثیر pH خردایش قرار نمی‌گیرد و ۳- اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی (پتانسیل استراحت و منحنی-های پلاریزاسیون) برای دو نوع واسطه فولادی ضد زنگ و کربن بالا نشان می‌دهد که واسطه فولادی ضد زنگ آسانتر نسبت به واسطه کربن فولادی بالا غیر فعال می‌شود. ضمناً قابلیت فلوته شدن کالکوپیریت بعد از خردایش تحت هوا و نیتروژن با واسطه فولادی ضد زنگ، بیشتر می‌شود.

**مارتین و همکاران** (Martin et al., 1991)، در مطالعه مروری خود بر اثر بار خردکننده روی فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی بیان کردند که حضور کانی‌های سولفیدی، فرسایش حاصل از خوردگی واسطه خردایش فولادی را به علت برهم‌کنش گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی نیمه رسانا افزایش می‌دهد و واسطه فولادی ضد زنگ موجب بهبود فلوتاسیون کانی‌ها به ترتیب زیر می‌شود.

پنتلاندیت > کالکوپیریت > پیروتیت > گالن > اسفالریت غیر فعال (سطح آن فعال نشده باشد) همچنین آن‌ها بیان کردند که کارهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی تاثیر بار خردکننده بر فلوتاسیون پیریت نتایج متناقضی را نشان می‌دهد و هیچ روند قابل مشخصی برای آن وجود ندارد.

**یلوجی رائو و ناتاراجان** (Yelloji Rao and Natarjan, 1988, 1989, 1990a, 1990b, 1991)، تاثیر اندرکنش‌های گالوانیکی میان کانی‌های سولفیدی از قبیل کالکوپیریت، گالن و اسفالریت را، روی بازیابی فلوتاسیون اسفالریت و گالن بررسی کردند. آن‌ها تایید کردند که خصوصیات الکتروشیمیایی واسطه خردایش فاکتور بسیار موثری بر اندازه برهم‌کنش گالوانیکی است و فلز یا آلیاژ با فعالیت الکتروشیمیایی بیشتر (پتانسیل استراحت کمتر) از قبیل چدن و فولاد نرم جریان گالوانیک بزرگتری را با کالکوپیریت نتیجه می‌دهد. همچنین نتایج بررسی‌های آنان اشاره می‌کند که خوردگی نه فقط مهم است بلکه مکانیزم عمده حذف فلز درآسیا کنی به روش تر می‌باشد. یلوجی رائو و ناتاراجان

(Yelloji Rao and Natarjan, 1988) گزارش دادند که محیط خردایش تحت نیتروژن برای فلوتاسیون کالکوپیریت مطلوب است.

**راجاگوپال و ایواساکی** (Rajagopal and Iwasaki, 1992)، جنبه‌های الکتروشیمیایی واسطه فولادی چدنی و تاثیرش را بر فلوتاسیون پیرویت مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که پتانسیل استراحت با افزایش محتوی کروم بار خردکننده افزایش می‌یابد. واسطه دارای کروم بالاتر مقاومت خوردگی بیشتر داشته و منجر به بازیابی بیشتر پیرویت می‌گردد. گلوله حاوی ۲۹ درصد کروم منجر به بازیابی بسیار بالای پیرویت می‌شود.

**ناتاراجان** (Natarjan, 1992)، در تحقیقات خود روی فرسایش گلوله‌ها گزارش داد که فرسایش ۳ نوع گلوله فولادی سخت با آلیاژ پائین و کربن بالا، فولادی آهنی با آلیاژ پائین و کربن بالا و فولادی چدنی با کروم بالا برای کانه سرب و روی با افزایش زمان خردایش به صورت خطی افزایش می‌یابد. حضور اکسیژن در محیط خردایش، فرسایش گلوله بویژه خوردگی را تشدید می‌کند و در همه موارد، خوردگی مشاهده شده از نوع حفره‌ای است. مقاومت نسبی گلوله‌ها در مقابل فرسایش برای سه نوع گلوله به ترتیب گلوله‌های فولادی چدنی با کروم بالا، فولادی آهنی با آلیاژ پائین و کربن بالا و فولادی سخت با آلیاژ پائین و کربن بالا می‌باشد. او نشان داد که فرسایش گلوله با کنترل pH و افزایش مواد شیمیایی از قبیل سیلیکات سدیم، نیترات سدیم، سولفیت سدیم، هگزامتافسفات سدیم و برات سدیم می‌تواند کاهش یابد.

**ناتاراجان** (Natarjan, 1996)، در یک مطالعه آزمایشگاهی روی فرسایش گلوله به این نتیجه دست یافت که برای کانه‌های سولفیدی سرب-روی و مس، اکسیژن‌دهی در طول خردایش فرسایش واسطه خردایش را به ترتیب تقریباً ۷۰٪ و ۶۵٪ افزایش می‌دهد. ناتاراجان همچنین گزارش داد که نرخ فرسایش در طول آسیای تر دو بار بیشتر از آسیای خشک است و این اختلاف به علت اثرات خوردگی است. ناتاراجان خوردگی گلوله‌ها را به واکنش‌های (۳-۱) و (۳-۴) نسبت داد که به ترتیب روی سطح گلوله و روی سطح ذرات با فعالیت الکتروشیمیایی کمتر تشکیل می‌شود.



یوان و همکاران (Yuan et al., 1996a, 1996b)، فاکتورهای موثر بر فرسایش گلوله‌ها و نیز تاثیر محیط خردایش روی فلوتاسیون کانه‌های مس-روی و مس-آهن را بررسی نمودند. نتایج مطالعات آن-ها نشان داد که:

۱- واسطه خردایش روی شیمی پالپ، از قبیل Eh تاثیر دارد. آن‌ها مشاهده نمودند که Eh قبل از مرحله آماده‌سازی در خردایش کانه Cu-Zn با واسطه فولادی ضد زنگ، ۴۰۰ میلی‌ولت بالاتر از حالت خردایش با فولاد نرم می‌باشد، ۲- پتانسیل پالپ (Eh) معرف محیط اکسایش-کاهش است و تحت تاثیر انواع موجود در پالپ از قبیل اکسیژن،  $Fe^{2+}$ ،  $Fe^{3+}$ ،  $SO_3^{2-}$ ،  $S_2O_4^{2-}$  و  $SO_4^{2-}$  قرار می‌گیرد. واسطه خردایش با فعالیت الکتروشیمیایی بالا موجب غلظت بالاتر  $SO_3^{2-}$  در مقایسه با واسطه با فعالیت کمتر می‌گردد، ۳- آسیای تحت هوا، شناورسازی کالکوپیریت را از کانه مس بهبود می‌بخشد، و ۴- با وجود اینکه واسطه خردایش از جنس فولاد نرم در فلوتاسیون کالکوپیریت مضر است، در انتخاب پذیری کالکوپیریت از پیریت تاثیر مثبت دارد.

**کولینان (Cullinan, 1999)**، در بررسی‌های خود مشاهده نمود که شرایط خردایش تاثیر بسیار زیادی بر فلوتاسیون گالن دارند و گزارش داد که خردایش با واسطه فولادی کربن بالا منجر به بازیابی کمتر گالن در مقایسه با واسطه فولادی کروم بالا می‌شود. کولینان همچنین گزارش داد که خردایش با واسطه‌های فولادی کربن بالا و کروم بالا، شیمی پالپ بسیار متغیری را نسبت به هم ایجاد می‌کنند و نشان داد که خردایش با واسطه فولادی کربن بالا، مقادیر Eh و pH پایین‌تری و میزان انواع آهن اکسیدی (درصد آهن قابل استخراج بوسیله EDTA<sup>1</sup>) بیشتری را از واسطه فولادی کروم بالا در پالپ داخل آسیا تولید می‌کند (جدول (۲-۳)). کولینان همچنین نشان داد که با اضافه کردن پودر آهن هنگام خردایش با واسطه فولادی کروم بالا، شیمی پالپ و پاسخ فلوتاسیون مشابه حالت خردایش با واسطه کربن بالا بدست می‌آید.

<sup>1</sup> - Ethylene diamine tetraacetic acid

جدول (۳-۲): اندازه‌گیری‌های شیمی پالپ آسیای میله‌ای مونت ایسا (Mount Isa) بعد از خردایش کانه (Cullinan, 1999).

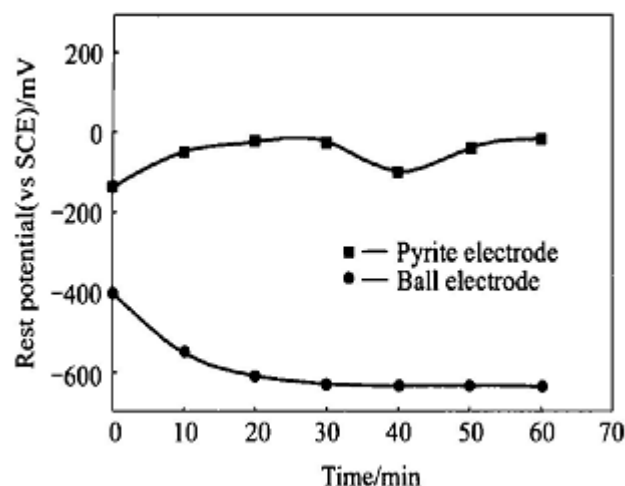
| درصد آهن قابل استخراج<br>بوسیله EDTA | pH  | Eh (mV) | اندازه خردایش<br>(میکرون/P <sub>80</sub> ) | واسطه خردایش       |
|--------------------------------------|-----|---------|--|--------------------|
| ۱/۱۱                                 | ۷/۸ | ۷۲      | ۹۰   | فولاد با کربن بالا |
| ۰/۷۱                                 | ۸/۲ | ۲۷۵     | ۹۰   | فولاد با کروم بالا |

**کولینان و همکاران (Cullinan et al., 1999)**، در بررسی بازیابی ذرات ریز (ریزتر از ۱۰ میکرون) گالن در مدار سرب معدن مونت ایسا (Mount Isa) مشاهده کردند که تغییر بار خردکننده از واسطه فولادی کربن بالا به واسطه فولادی کروم بالا، ماکزیمم بازیابی و ثابت نرخ فلوتاسیون ذرات ریز گالن را بسیار افزایش می‌دهد. آن‌ها مشاهده نمودند آهن قابل استخراج بوسیله واسطه فولادی کربن بالا بیشتر از واسطه کروم بالا است و نتیجه گرفتند که این به دلیل افزایش غلظت سطح لایه‌های آب‌پذیر انواع آهن اکسیدی روی سطح ذرات ریز گالن است، که سبب کاهش رفتار فلوتاسیون هم می‌شود. آن‌ها ثابت کردند که کاهش میزان لایه آب‌پذیر تولید شده در طول خردایش، روشی برای بهبود ذرات ریز گالن است. در این مطالعه کولینان و همکاران مشاهده کردند که بر خلاف نتایج بدست آمده برای ذرات ریز گالن، تغییر نوع واسطه برای ذرات متوسط تاثیر کمی بر فلوتاسیون دارد.

**لپینن و همکاران (Leppinen et al., 2000)**، تاثیر واسطه خردایش بر الکتروشیمی فلوتاسیون را مطالعه و پتانسیل پالپ، غلظت اکسیژن محلول و آهن قابل استخراج بوسیله EDTA را هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم در مقیاس صنعتی اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد هنگامی که خردایش با گلوله‌های فولادی سرامیکی و فولادی ضد زنگ انجام می‌شود، غلظت اکسیژن محلول و پتانسیل پالپ بیشتر از حالتی است که خردایش با گلوله فولادی نرم انجام می‌شود، اما آهن قابل استخراج بوسیله EDTA برای فولاد نرم بیشتر می‌باشد. این امر بدان علت است که واسطه نرم مصرف اکسیژن در پالپ و اکسایش آهن در بار خردکننده را افزایش می‌دهد. آن‌ها در بررسی‌های خود نشان دادند که استفاده از واسطه فولادی نرم به عنوان بار خردکننده برای فلوتاسیون کانی مضر است.

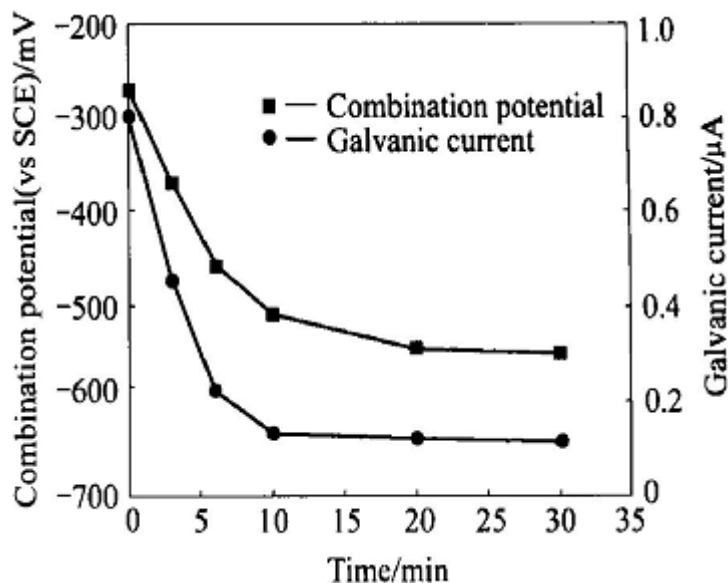
هنگ زینگ و همکاران (Heng-xing et al., 2003)، در مطالعه بر روی خوردگی الکتروشیمیایی گلوله‌های فولادی در خردایش تر، پتانسیل‌های استراحت الکترودهای گلوله فولادی و پیریت و نیز پتانسیل‌های ترکیبی و جریان گالوانیکی را در کوپل گالوانیکی گلوله فولادی-پیریت اندازه‌گیری و مشاهده نمودند:

۱- پتانسیل استراحت الکتروده پیریت با زمان افزایش و الکتروده گلوله در عدم حضور قراضه‌های آهن کاهش می‌یابد. ولی بعد از اضافه کردن قراضه آهن به محلول پتانسیل الکتروده پیریت کاهش می‌یابد، البته پتانسیل استراحت الکتروده گلوله هنوز حالت ثابتش را حفظ می‌کند (شکل (۲-۳)).



شکل (۲-۳): منحنی پتانسیل استراحت-زمان برای الکترودهای پیریت و گلوله فولادی در محلول در معرض هوا (Heng-xing et al., 2003)

۲- پتانسیل ترکیبی و جریان گالوانیکی کوپل گلوله-پیریت تحت اکسیژن‌دهی بزرگتر از حالتی است که تحت تاثیر هوا قرار می‌گیرد. ضمناً پتانسیل ترکیبی و جریان گالوانیکی تحت اکسیژن‌دهی بسیار سریع‌تر از حالت هوادهی کاهش می‌یابد (شکل (۳-۳)).



شکل (۳-۳): تغییرات پتانسیل ترکیبی (مختلط) و جریان گالوانیک نسبت به زمان (Heng-xing et al., 2003)

۳- دانسیته جریان خوردگی که در زمان‌های مختلف خردایش و از داده‌های تست فرسایش گلوله (و بر اساس قانون فارادی) محاسبه می‌گردند به خوبی با مقادیری که از منحنی‌های پلاریزاسیون پیریت و گلوله تخمین زده می‌شوند، همبستگی دارد، هر چند مقادیر منحنی پلاریزاسیون در تمامی موارد کمتر می‌باشد. این مقادیر کمتر بدان علت است که دانسیته‌های جریان از پلاریزاسیون تنها جریان بین پیریت و گلوله را بیان می‌کند، در حالی که در محیط کانی‌های سولفیدی دیگری هم وجود دارد.

جدول (۳-۳): مقایسه دانسیته‌های جریان خوردگی بدست آمده از دو روش منحنی پلاریزاسیون و تست فرسایش گلوله‌های علامت گذاری شده بر حسب میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع (Heng-xing et al., 2003)

| منحنی پلاریزاسیون | تست فرسایش گلوله‌های علامت گذاری شده | زمان خردایش (دقیقه) |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------|
| ۰/۹۳۶۷            | ۱/۱۵۲۰                               | ۲۰                  |
| ۲/۰۱۶۵            | ۲/۳۹۹۹                               | ۴۰                  |
| ۳/۰۹۵۸            | ۳/۶۴۷۹                               | ۶۰                  |

پنگ و همکاران (Peng, 2002; Peng et al., 2003a, 2003b)، تاثیر محیط خردایش بر فلوتاسیون گالن و کالکوپیریت و جدایش آن از پیریت، کنترل شرایط خردایش و برهم‌کنش‌های میان کانی‌های

سولفیدی و واسطه خردایش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای مطالعات خود از آسیای ویژه‌ای که توسط "کی سیز" و همکاران (Cases et al, 1990) طراحی شده بود (شکل (۳-۴))، استفاده نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد:

۱- حضور کانی‌های سولفیدی فرسایش حاصل از خوردگی واسطه خردایش فولادی را به علت برهم‌کنش گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی نیمه رسانا افزایش می‌دهد.

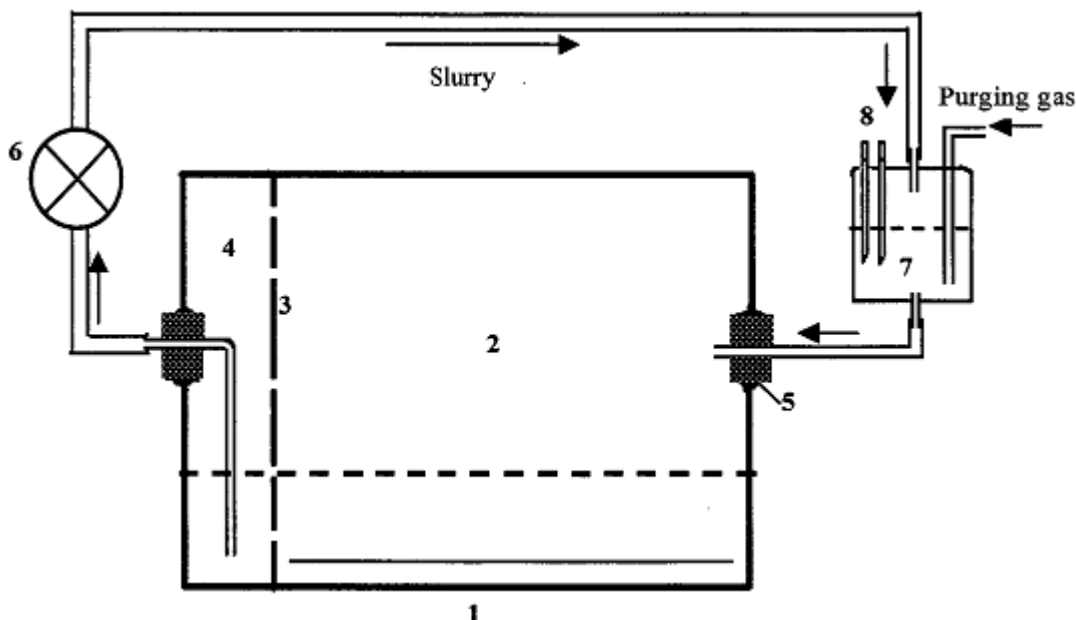
۲- شناورسازی کالکوپیریت تحت تاثیر برهم‌کنش گالوانیکی با واسطه خردایش در طول خردایش تر قرار می‌گیرد، برهم‌کنش گالوانیکی بین کالکوپیریت با واسطه خردایش می‌تواند با افزایش لایه روئین، نیتروژن‌دهی به محیط‌های خردایش و نیز با بکارگیری واسطه خردایش که مقاومت بالاتری برای اکسایش دارد، تضعیف گردد.

۳- شرایط خردایش تاثیر بسیار زیادی روی فلوتاسیون پیریت در حضور گالن یا کالکوپیریت دارد و با کنترل شرایط خردایش می‌توان فعالیت پیریت را کنترل کرد. در حضور گالن وقتی که خردایش تحت اکسیژن‌دهی با واسطه فولادی نرم در pH بالا انجام می‌شود فلوتاسیون پیریت کاهش می‌یابد، در حالی که در حضور کالکوپیریت با واسطه فولادی حاوی ۳۰ درصد کروم، فلوتاسیون پیریت کاهش می‌یابد. پنگ و همکاران (Peng et al., 2003a, 2003b) نشان دادند که در حضور گالن، یون‌های سرب از گالن سبب فعال شدن پیریت و انواع آهن اکسیدی مانع فعال شدن پیریت هستند و در نتیجه شرایط خردایش که در تولید انواع سرب و آهن اکسیدی تاثیر دارند، بر فعالیت پیریت تاثیر می‌گذارند. بنابراین نتیجه گرفتند که بازیابی فلوتاسیون پیریت به تعادل انواع سرب و آهن اکسیدی روی سطح بستگی دارد. علاوه بر این، آن‌ها در مطالعه روی کانی کالکوپیریت دریافتند که فلوتاسیون کالکوپیریت به تعادل (موازنه) انواع آهن اکسیدی و انواع سولفور تشکیل شده روی سطح وابسته است.

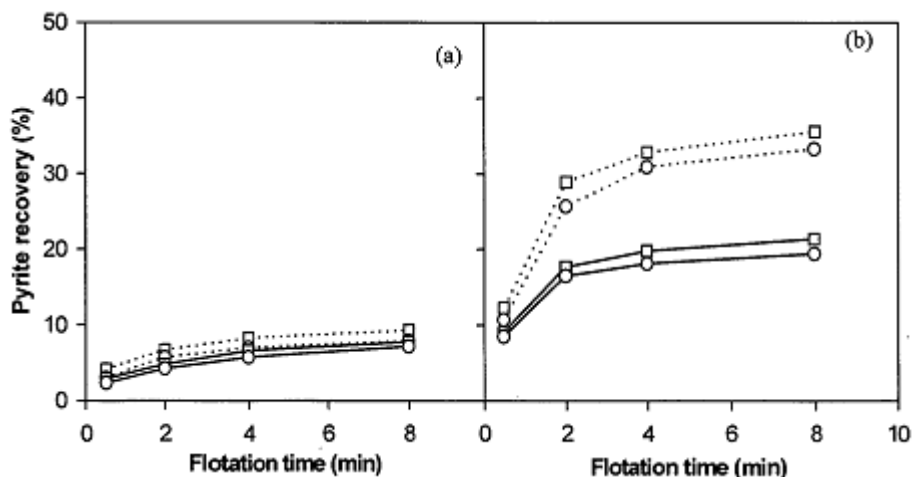
۴) میزان آهن از واسطه خردایش که با توجه به نوع واسطه، pH و نوع گازدهی به سیستم خردایش تغییر می‌کند، عامل اصلی در کاهش قابلیت شناورسازی گالن است و شرایط خردایشی که میزان انواع آهن اکسیدی کمتری تولید می‌کند، بازیابی فلوتاسیون را افزایش می‌دهد.

۵) پنگ و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی تاثیر شرایط خردایش بر فلوتاسیون کالکوپیریت و پیریت مشاهده کردند که شرایط خردایش بر فلوتاسیون ذرات ریز کالکوپیریت تاثیر دارد و بر فلوتاسیون ذرات متوسط کالکوپیریت تاثیر ندارد. خردایش با واسطه فولادی حاوی ۳۰ درصد کروم بازیابی ذرات ریز کالکوپیریت را بیشتر از فولاد نرم افزایش می‌دهد. در حالی که خردایش با واسطه فولادی نرم بازیابی ذرات متوسط کالکوپیریت را افزایش می‌دهد. در مقابل در مورد پیریت مشاهده کردند که شرایط خردایش بر فلوتاسیون ذرات متوسط تاثیر دارد اما بر ذرات ریز پیریت تاثیر ندارد.

۶- فلوتاسیون شدت به شرایط خردایش، بویژه نوع بار خردکننده و نوع هوادهی به سیستم خردایش وابسته است. واسطه با کروم بالا بهترین نتایج را در فلوتاسیون و جدایش کانی نسبت به واسطه فولادی نرم دارد و پیشنهاد نمودند که استفاده از واسطه خردایش با کروم بالا در آسیاهای صنعتی مطلوب می‌باشد. شکل (۳-۵) تاثیر واسطه خردایش و نوع گازدهی (نیتروژن و اکسیژن) به سیستم خردایش را در  $pH=9$  روی فلوتاسیون پیریت در حضور و عدم حضور کالکوپیریت نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): طرح شماتیک سیستم خردایش ویژه "کی سیز" و همکاران (Cases et al, 1990)، (اجزاء سیستم: ۱: استوانه، ۲: اتاق خردایش، ۳: صفحه مشبک (grate)، ۴: اتاق نمونه‌گیری، ۵: محل عبور گاز و پالپ است، ۶: پمپ، ۷: سلول اندازه‌گیری و ۸: الکترودهای اندازه‌گیری (Eh، pH و ...))

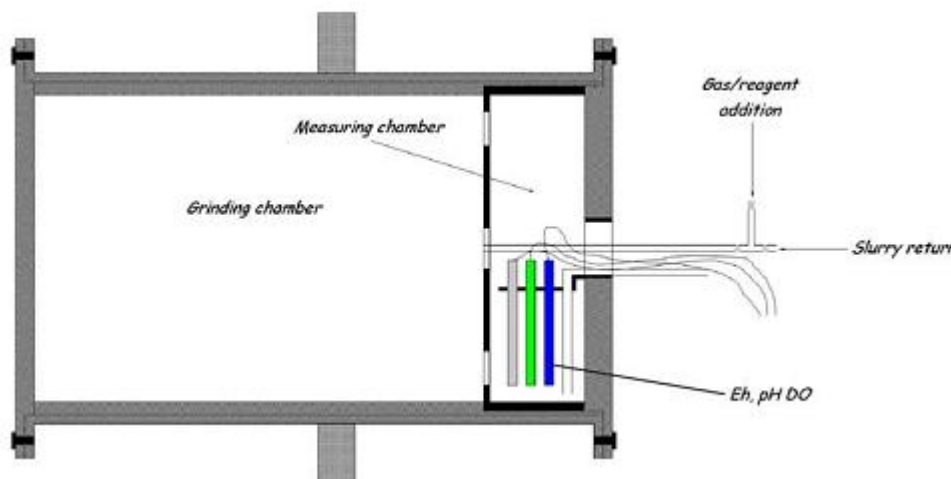


شکل (۳-۵): تاثیر واسطه خردایش و نوع گازدهی به محیط خردایش بر روی فلوتاسین پیریت در عدم حضور (a) و حضور (b) کالکوپیریت در pH=۹ (خط چین، واسطه فولادی نرم؛ خط کامل، واسطه کروم بالا (۳۰٪)؛ علامت □، نیتروژن و علامت ○ اکسیژن را نشان می‌دهد) (Peng, 2002)

**گریت و همکاران (Greet et al., 2004)**، تاثیر واسطه خردایش را بر شیمی پالپ و کارایی فلوتاسیون مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف سیستم خردایش ویژه‌ای را به نام آسیای Magotteaux، که هم قادر به اندازه‌گیری شیمی پالپ در طول خردایش و هم قادر به ارتباط بین داده‌های آزمایشگاهی و کارخانه بود، طراحی کردند. طرح شماتیک آسیای Magotteaux در شکل (۳-۶) آورده شده است. آن‌ها نیز همانند محققان دیگر گزارش دادند که واسطه خردایش با فعالیت الکتروشیمیایی کمتر، مقادیر Eh بالاتری در طول خردایش دارد و انواع کمتری میزان آهن اکسیدی در تخلیه آسیا تولید می‌کند.

گریت و همکاران (Greet et al., 2004, 2005) در مطالعه آزمایشگاهی روی کانه طلا/مس در آسیای Magotteaux نشان دادند که تغییر واسطه خردایش از واسطه فولاد آهنی به واسطه فولاد با کروم بالا منجر به تغییر شیمی پالپ سیستم می‌شود. Eh به سمت پتانسیل‌های احیایی کمتر تغییر می‌کند و تقاضای اکسیژن پالپ و میزان آهن اکسیدی تخلیه آسیا کاهش می‌یابد و این تغییرات شیمی پالپ همراه با بهبود بازیابی مس و طلا است.

گريت (Greet, 2008) اهميت محيط خردايش را روي فلوتاسيون كانه‌هاي UG2<sup>1</sup> مورد بررسي قرار داد. نتايج بررسي‌ها نشان مي‌دهد: ۱- با تغيير واسطه فولادي از واسطه فولادي آهني به کروم بالا، مقادير Eh به پتانسيل‌هاي اكسидي تغيير مي‌كنند، سطح اكسيژن پالپ افزايش مي‌يابد و ميزان آهن قابل استخراج بوسيله EDTA در پالپ كاهش مي‌يابد. اين نتايج به وضوح در جدول (۳-۴) مشهود است و ۲- واسطه فولادي با کروم بالا تاثير مثبتي روي كارايي متالورژيكي طلا، مس و نيكل دارد و به طور ويژه نرخ‌هاي فلوتاسيون طلا، مس و نيكل را افزايش مي‌دهد. واسطه فولادي حاوي ۱۵ درصد کروم بهترين آلياژ براي اين سيستم كانه مي‌باشد.



شكل (۳-۶): طرح شماتيك آسيابي Magotteux (Greet et al, 2004)

جدول (۳-۴): شيمي پالپ تخليه آسيابي Magotteux در خردايش كانه UG2 با استفاده از واسطه‌هاي فولادي مختلف (Greet, 2008)

| شيمي پالپ |          |                  |      | نوع واسطه خردايش |
|-----------|----------|------------------|------|------------------|
| EDTA Fe % | DO (ppm) | Eh (mV v.s. SHE) | pH   |                  |
| ۰/۲۹۰     | ۰/۱۶     | -۲۱۱             | ۹/۱۶ | فولادي آهني      |
| ۰/۰۳۴     | ۰/۲      | ۱۱               | ۹/۳۶ | ۱۲٪ کروم         |
| ۰/۰۲۱     | ۰/۰۷     | ۱۶               | ۹/۰۶ | ۱۵٪ کروم         |
| ۰/۰۲۰     | ۰/۰۴     | ۸۶               | ۹/۴۷ | ۲۱٪ کروم         |
| ۰/۰۱۴     | ۰/۰۲     | ۵۲               | ۹/۴۲ | ۳۰٪ کروم         |

<sup>۱</sup> - به كانه‌هاي حاوي سوفايد كم، كانه UG2 مي‌گويند.



تائو و همکاران (Tao, 2004; Tao et al., 2005; 2007) و چن و همکاران (Chen et al., 2006)، حفاظت از خوردگی آسیاها را در صنعت فسفات با بکارگیری تکنولوژی جریان موثر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌های خود از آسیای طراحی شده ویژه‌ای استفاده نمودند که شباهت نزدیکی به آسیاهای گلوله‌ای صنعتی داشت (شکل (۷-۳)). نتایج بررسی‌ها نشان داد که: ۱- با کنترل شرایط الکتروشیمیایی، فرسایش حاصل از خوردگی تا ۹۰٪ و نرخ فرسایش کل بیش از ۵۰٪ کاهش می‌یابد، ۲- اقتصادی ترین روش برای حفاظت از آسیاها (گلوله‌ای)، استفاده از فرایند حفاظت کاتدیک می‌باشد. به طوری که نرخ فرسایش کل تا ۴۶٪ و نرخ فرسایش حاصل از خوردگی تا ۸۶٪ کاهش می‌یابد، و ۳- معادلات رگرسیونی را برای ارتباط پارامترهای موثر بر روی نرخ فرسایش آلیاژ فولاد کربنی ۱۰۱۸ و آلیاژ با کروم بالای مورد استفاده در حفاظت آسیاها پیشنهاد کردند:

معادله رگرسیون برای نرخ فرسایش فولاد کربنی ۱۰۱۸

$$\text{Wear rate} = 530.34 - 177.50 \times A + 85.72 \times B - 54.58 \times C - 76.53 \times D + 46.41 \times B^2 - 43.95 \times B \times C \quad (9-3)$$

معادله رگرسیون برای نرخ فرسایش فولاد با کروم بالا

$$\text{Wear rate} = 156.24 - 50.31 \times A + 24.81 \times B - 14.63 \times C - 23.75 \times D \quad (10-3)$$

که A، pH محلول، B سرعت چرخش، C بار محصول و D درصد جامد می‌باشد.

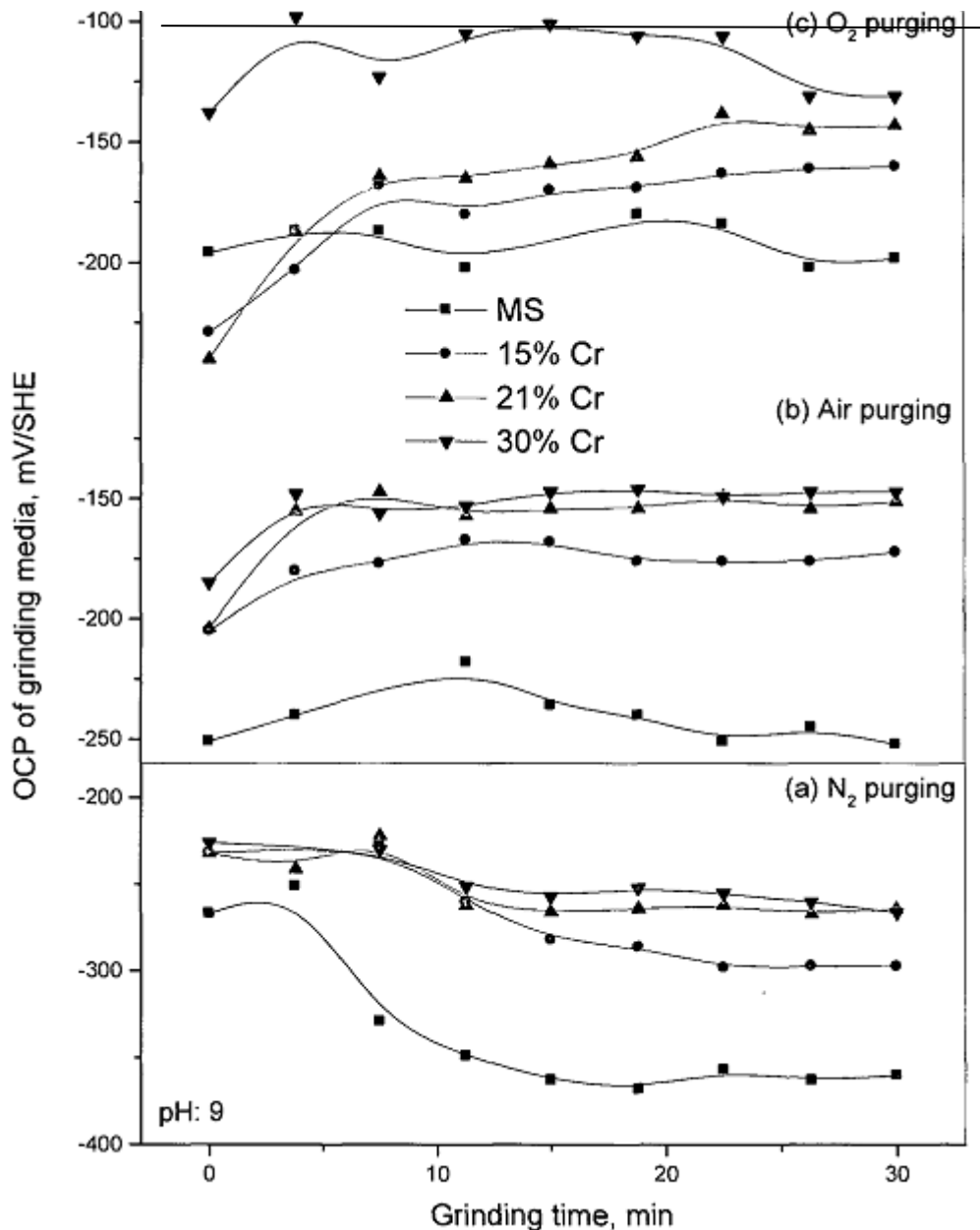


شکل (۷-۳): تصویر آسیای تائو (Tao, 2004)

هوآنگ (Huang, 2005)، هوآنگ و گرانو (Huang and Grano, 2006) و هوآنگ و همکاران (Huang et al., 2006)، خصوصیات الکتروشیمیایی و رفتار خوردگی واسطه خردایش و نیز شیمی و الکتروشیمی پالپ را در طول خردایش با اندازه گیری Eh، اکسیژن محلول، پتانسیل استراحت و پلاریزاسیون الکترودها در آسیا مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها ارتباط میان انواع آهن اکسیدی تولید شده در طول خردایش را با جریان گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی در یک سیستم تک کانی و کانه و تاثیر این عوامل را بر فلوتاسیون تعیین کردند. مطالعات آن‌ها بر روی کانی‌های بورنیت، آرسنوپیریت، پیریت و کانه NGGO<sup>1</sup> که یک کانه سرب، روی و مس است و کانی-های اصلی آن کالکوپیریت، گالن و اسفالریت هستند، متمرکز بود. البته برای بررسی برهم‌کنش گالوانیکی بین واسطه خردایش و کانی‌ها لازم است که این اثرات گالوانیکی به صورت کمی در آید. هوآنگ و همکاران، منحنی‌های پلاریزاسیون کانی‌های سولفیدی و واسطه‌های خردایش را در طول فرآیند آسیا برای مشخص نمودن رفتارهای اکسیداسیون واسطه‌ها و کانی‌ها به منظور کمی کردن بر هم‌کنش های گالوانیکی استفاده نمودند. هوآنگ و همکاران برای دستیابی به اهداف فوق از سیستم خردایش ویژه‌ی Magotteux (Greet et al., 2004) استفاده کردند. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از بررسی‌های آن‌ها عبارتند از:

- ۱) پتانسیل استراحت گلوله‌های فولادی با افزایش درصد کروم گلوله افزایش می‌یابد (شکل (۳-۸)). شکل (۳-۸) پتانسیل استراحت چهار گلوله فولادی نرم، ۱۵٪ کروم، ۲۱٪ کروم و ۳۰٪ کروم را تحت شرایط مختلف هواده‌ی به آسیا در طول خردایش کوارتز در pH=۹ نشان می‌دهد.
- ۲) درصد کروم به طور ویژه‌ای فعالیت الکتروشیمیایی و نیز نرخ خوردگی چهار واسطه خردایش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. کروم در واسطه خردایش، فعالیت الکتروشیمیایی، اکسایش آندیک و نرخ خوردگی واسطه خردایش را کاهش می‌دهد. واسطه فولادی نرم نسبت دیگر واسطه‌ها، میزان انواع آهن اکسیدی بیشتری را در تخلیه آسیا تولید می‌کند.

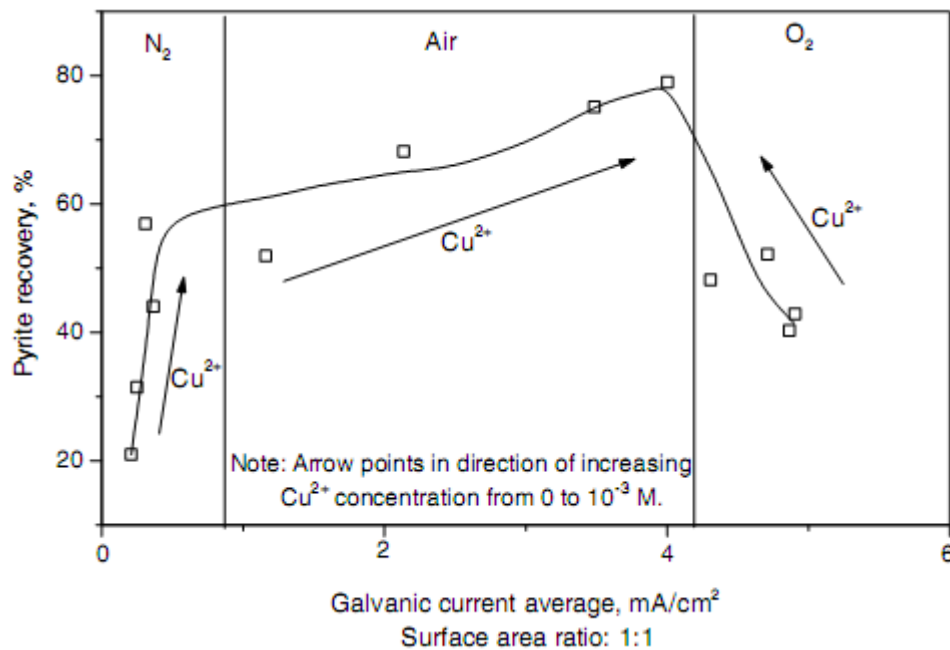
<sup>1</sup> - Newmont Golden Grove Operations



شکل (۳-۸): پتانسیل مدار باز (OCP) الکترودهای بارهای خردکننده فولاد نرم، ۱۵٪ کروم، ۲۱٪ کروم و ۳۰٪ کروم در طول خردایش کوارتز در pH=۹ (Huang, 2005)

۳) کانی‌های سولفیدی از قبیل بورنیت، آرسنوپیریت و پیریت بشدت نرخ اکسایش واسطه خردایش را افزایش می‌دهند و انواع آهن اکسیدی بیشتری را در تخلیه آسیا به ویژه هنگامی که آسیا تحت گاز اکسیژن است، تولید می‌کند که این به بر هم‌کنش گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی نسبت داده می‌شود. در طول خردایش بورنیت، آرسنوپیریت و پیریت، بر هم‌کنش گالوانیکی هر کانی با واسطه خردایش وابسته به نوع واسطه خردایش و محیط خردایش است.

۴) جریان گالوانیک یک پارامتر مهم در ارتباط با قابلیت شناوری است. جریان گالوانیک، سرعت کاهش اکسیژن، یون فریک، یون کوپریک و در اکثر موارد سرعت اکسیداسیون واسطه خردکننده را ارائه می‌دهد (شکل (۹-۳)).



شکل (۹-۳): ارتباط بین قابلیت فلوتیون پیریت و جریان گالوانیک در pH=7 (Huang, 2005)

شکل (۹-۳) نشان می‌دهد که بازیابی فلوتاسیون پیریت به صورت تابعی از جریان گالوانیک در طول خردایش است. همان‌طور که در شکل هم مشاهده می‌شود نتایج نشان می‌دهد که قابلیت شناورسازی پیریت در جریان گالوانیک پایین‌تر یا در خردایش تحت نیتروژن، بیشتر است. این رفتار به علت افزایش نرخ کاهش یون کوپریک روی پیریت است. در کل بار خردکننده فولادی نرم به طور مشخص جریان گالوانیکی بیشتری با بورنیت، پیریت و آرسنوپیریت نسبت به سه نوع بار خردکننده با آلیاژ کروم از خود نشان می‌دهد. سه نوع بار خردکننده با کروم بالا اندرکنش گالوانیکی بسیار نزدیک به هم دارند. جریان گالوانیکی با فعل و انفعالات بار خردکننده کروم کاهش می‌یابد. ضمناً قابلیت فلوتیون شونده کانی‌ها با افزایش میزان آهن قابل استخراج با EDTA کاهش می‌یابد.

۵) تاثیر چهار نوع واسطه خردایش و گازهای مختلف (نیتروژن، اکسیژن و هوا) روی فلوتاسیون کانه NGGO مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که ماکزیمم بازیابی‌ها و عیارها برای کالکوپیریت و گالن در خردایش با واسطه فولادی حاوی ۱۵ درصد کروم تحت نیتروژن‌دهی بدست می‌آید. نوع واسطه فولادی شرایط شیمی خردایش را به علت تولید انواع آهن اکسیدی تغییر می‌دهد.

۶) هوآنگ و همکاران مدل‌های تئوریک و تجربی برای ارتباط میان انواع آهن اکسیدی و جریان گالوانیک در طول فرآیند خردایش توسعه دادند که به شرح ذیل می‌باشد:

آهن قابل استخراج بوسیله EDTA در پالپ آسیا می‌تواند از اکسیداسیون واسطه خردایش و کانی سولفیدی در طول فرآیند آسیا ( $Q_{Fe-O}$ ) و یا اینکه از انواع آهن اکسیدی که بر سطح واسطه خردایش و کانی قبل از انجام آسیا ( $Q_0$ ) وجود دارد، باشد.

اکسیداسیون واسطه خردایش از برهم‌کنش‌های گالوانیکی ناشی می‌شود، زیرا می‌توان فرض کرد که گلوله‌های فولادی همواره در طول خردایش با کانی در تماس هستند. بنابراین میزان اکسیداسیون واسطه خردایش ( $Q_{Md}(t)$ ) در زمان  $t$  می‌تواند توسط جریان آندیک ( $i_{a, Md}(t)$ ) و مساحت سطح ( $A_{Md}$ ) بیان شود:

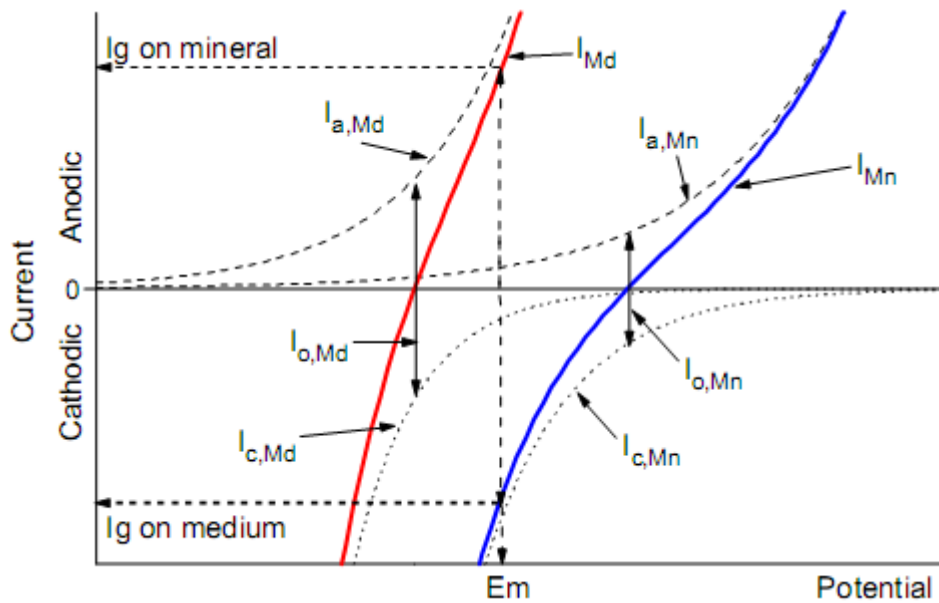
$$Q_{Md}(t) = \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t i_{a, Md}(t) dt \quad (12-3)$$

که  $n_1$  تعداد مول الکترون‌های منتقل شده به ازای یک مول اکسیداسیون آهن و  $F$  ثابت فارادی،  $96500 \text{ C/mol}$  می‌باشد.

جریان آندیک واسطه خردایش در کوپل، جریان گالوانیک ( $I_{g, Md}(t)$ ) به اضافه جریان کاتدیک ( $i_{c, Md}(t)$ ) می‌باشد که به صورت مقابل نوشته می‌شود:  $i_{a, Md}(t) = I_{g, Md}(t) + i_{c, Md}(t)$ . بنابراین این معادله را می‌توان به این صورت نوشت:

$$Q_{Md}(t) = \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t i_{g, Md}(t) dt + \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t i_{c, Md}(t) dt \quad (13-3)$$

نحوه محاسبه جریان گالوانیک در طول تماس بار خردکننده و کانی سولفیدی براساس منحنی‌های پلاریزاسیون در شکل (۱۰-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۳): طرح شماتیک محاسبه جریان گالوانیک و اکسایش واسطه خردایش و یک کانی سولفیدی در اتصال الکتروشیمیایی (Huang, 2005)

مطابق شکل (۱۰-۳) و بر اساس قانون فارادی، هیچ الکترون خالصی از واسطه خردایش و کانی سولفیدی در طول کوپل گالوانیکی واسطه و کانی وجود ندارد، یعنی:

$$i_{Md} + i_{Mn} = 0 \quad (14-3)$$

$$A_{Md} I_{Md} + A_{Mn} I_{Mn} = 0 \quad (15-3)$$

که  $i_{Md}$  و  $i_{Mn}$  به ترتیب جریان خالص بر واسطه خردایش و کانی سولفیدی می‌باشند،  $I_{Md}$  و  $I_{Mn}$  به ترتیب دانسیته جریان خالص بر واسطه خردایش و کانی سولفیدی بر حسب آمپر بر سانتی‌متر مربع است، و  $A_{Md}$  و  $A_{Mn}$  به ترتیب مساحت سطح محیط خردایش و کانی سولفیدی می‌باشند. اگر محیط خردایش از لحاظ الکتروشیمیایی فعال تر از کانی سولفیدی باشد به عنوان آند عمل کند، اندرکنش گالوانیکی ( $I_g$ ) بین آن‌ها از رابطه (۱۶-۳) محاسبه می‌شود:

$$I_g = A_{Md} I_{Md} = -A_{Mn} I_{Mn} \quad (16-3)$$

میزان اکسیداسیون ( $Q_{g,Mn}(t)$ ) کانی سولفیدی کوپل شده با واسطه خردایش در زمان  $t$  با استفاده از جریان آندیک ( $i_{a,Mn}(t)$ ) و مساحت سطح در تماس ( $A_{g,Mn}$ ) تعیین می‌شود. متعاقباً، میزان کانی

سولفیدی اکسید شده که به صورت الکتروشیمیایی با واسطه خردایش واکنش داده با معادله زیر بیان می شود:

$$Q_{g,Mn}(t) = \frac{1}{n_2 F} \int_0^t A_{g,Mn} i_{a,Mn}(t) dt \quad (17-3)$$

که  $n_2$  تعداد مول الکترون های منتقل شده به ازای هر مول اکسیداسیون کانی سولفیدی می باشد. زمانیکه ذرات سولفیدی در تماس با واسطه خردایش نیستند، میزان اکسیداسیون ( $Q_{0, Aspy}(t)$ ) در زمان  $t$ ، به دانسیته جریان تبدلی آن ( $I_{0, Mn}(t)$ ) و مساحت سطح ذرات ( $A_{0, Mn}$ ) بستگی دارد و می توان آن را به صورت زیر عنوان کرد:

$$Q_{O,Mn}(t) = \frac{1}{n_2 F} \int_0^t A_{O,Mn} I_{O,Mn}(t) dt \quad (18-3)$$

مقدار کلی گونه های آهن اکسید شده ( $Q_{Fe-O}(t)$ ) اندازه گیری شده با روش EDTA در زمان  $t$ ، مجموع میزان اکسیداسیون واسطه خردایش و کانی می باشد و بصورت زیر بیان می شود:

$$Q_{Fe-O}(t) = Q_0 + \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t I_{g,Md}(t) dt + \frac{1}{n_2 F} \int_0^t A_{O,Mn} I_{O,Mn}(t) dt + \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t i_{c,Md}(t) dt + \frac{1}{n_2 F} \int_0^t A_{g,Mn} I_{a,Mn}(t) dt \quad (19-3)$$

هنگامی که کوپل واسطه خردایش-کانی باعث ایجاد پتانسیل اضافی روی سطح می شود (پتانسیل مدار باز واسطه آسیاکنی >> پتانسیل ترکیبی ( $E_m$ ) >> پتانسیل مدار باز کانی سولفیدی)، نرخ اکسیداسیون کانی سولفیدی که به صورت گالوانیکی با واسطه خردایش واکنش می دهد و جریان کاتدیک روی واسطه خردایش بسیار کوچک بوده و می توان از دو عبارت آخر معادله (۱۹-۳) صرف نظر کرد و معادله را به صورت زیر نوشت:

$$Q_{Fe-O}(t) = Q_0 + \frac{A_{Md}}{n_1 F} \int_0^t I_{g,Md}(t) dt + \frac{1}{n_2 F} \int_0^t A_{O,Mn} I_{O,Mn}(t) dt \quad (20-3)$$

نرخ تولید متوسط آهن قابل استخراج با EDTA ( $Q_{Fe-O}$ ) در طول خردایش را می توان با جریان گالوانیکی متوسط ( $I_g A_{Md}$ ) و دانسیته جریان تبدلی متوسط کانی ( $I A_{0,Mn}$ ) بیان کرد.

$$Q_{Fe-O} = \frac{Q_O}{t_{grid}} + \frac{A_{Mn}}{n_1 F} I_g A_{Mn} + \frac{A_{O,Mn}}{n_2 F} I A_{O,Mn} \quad (21-3)$$

که  $t_{grid}$  بیانگر زمان خردایش بر حسب ثانیه می باشد.

معادله بالا نشان می دهد که مقدار آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA به صورت خطی با جریان گالوانیک تغییر می کند. معادلات تجربی بدست آمده در این ارتباط در جدول (۳-۶) نشان داده شده اند.

جدول (۳-۵): ارتباط بین انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA و جریان گالوانیک (Huang, 2005)

| ضریب همبستگی ( $R^2$ ) | معادله رگرسیون                           | pH | واسطه      | کانی ها    |
|------------------------|--|----|------------|------------|
| ۰/۹۸                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.039 + 740 \times I_g$   | ۹  | فولادی نرم | بورنیت     |
| ۰/۹۷                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.0012 + 190 \times I_g$  | ۹  | کروم بالا  | بورنیت     |
| ۰/۹۶                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.081 + 6180 \times I_g$  | ۷  | فولادی نرم | آرسنوپیریت |
| ۱/۷۲                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.0012 + 2380 \times I_g$ | ۷  | کروم بالا  | آرسنوپیریت |
| ۰/۹۷                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.27 + 1100 \times I_g$   | ۷  | فولادی نرم | پیریت      |
| ۰/۶۹                   | $Q_{Fe-O,MS} = 0.0045 + 270 \times I_g$  | ۷  | کروم بالا  | پیریت      |

پنگ و گرانو (Peng and Grano, 2010)، تخمین توزیع انواع آهن اکسیدی روی سطح کانی در طول خردایش سولفیدهای فلزی پایه را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها در مطالعات خود بر هم کنش گالوانیکی را بوسیله اندازه گیری انواع آهن اکسیدی ناشی از واسطه خردایش با استفاده از تکنیک استخراج با EDTA در سیستم تک کانی و سیستم مختلط تعیین و مشخص نمودند که میزان بر هم کنش گالوانیکی میان واسطه خردایش و کانی ها به واکنش پذیری الکتروشیمیایی کانی ها مرتبط می شود. نتایج بررسی های آن ها نشان داد که: (۱) کانی نجیب تر، بر هم کنش گالوانیکی قوی تری با واسطه خردایش و میزان انواع آهن اکسیدی بیشتری را از واسطه خردایش منجر می شود، (۲) برای هم گالن و هم کالکوپیریت ارتباط خطی بین میزان انواع آهن اکسیدی و بازیابی فلوتاسیون در سیستم تک کانی وجود دارد که این ارتباط قادر به پیش بینی انواع آهن اکسیدی روی سطح گالن و کالکوپیریت زمانی



که آن‌ها به طور جداگانه با پیریت مختلط می‌شوند، می‌باشد، و ۳) توزیع انواع آهن اکسیدی روی دو کانی در سیستم مختلط با نسبت مساحت سطح کانی تغییر می‌کند.

**بروکارد و همکاران** (Bruckard et al., 2011)، در بازبینی تاثیر محیط خردایش بر فرآیند فلوتاسیون نشان دادند که برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌های سولفیدی و واسطه خردایش فولادی میزان آهن اکسیدی را افزایش داده و غلظت اکسیژن محلول را در پالپ کاهش می‌دهد که این منجر به تشکیل هیدروکسیدهای آهن می‌گردد و این تغییرات می‌تواند روی فرآیند فلوتاسیون مس بسیار مضر باشد. ضمناً شواهد حاکی از آن است که برهم‌کنش‌های گالوانیکی بین واسطه و کانی می‌توانند پایداری کف و انتخابی بودن فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار دهند. آن‌ها بیان کردند که گلوله‌های با آلیاژ کرومی می‌توانند تاثیر بهتری بر عملیات فلوتاسیون در تعدادی از سیستم‌ها با محدود کردن تشکیلات هیدروکسید آهن در پالپ داشته باشند. علاوه بر برهم‌کنش گالوانیکی بین واسطه و کانی، برهم‌کنش گالوانیکی که بین خود کانی‌های سولفیدی اتفاق می‌افتد و به مینرالوژی کانه وابسته هست، می‌تواند بر کارایی جدایش در فلوتاسیون تاثیر بگذارد. خردایش تحت گازهای مختلف (نیتروژن، اکسیژن و هوا) با افزایش و یا با کاهش اکسیژن در پالپ آسیا می‌تواند محیط اکسایشی یا کاهش‌ی را بوجود آورد که این رفتار می‌تواند در حداقل کردن اکسایش سولفیدها، کاهش اثرات خوردگی و کم کردن تشکیلات هیدروکسیدهای آهن موثر باشد.

**میتتونن و همکاران** (Miettunen et al., 2012)، اثر شرایط خردایش کاهش‌ی را روی رفتار فلوتاسیون کانه‌های PGE دارای سولفور کم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های خردایش را با آسیای Magotteaux و با دو نوع گلوله فولادی حاوی آهن و ۳۰٪ کروم انجام دادند و برای ایجاد محیط کاهش‌ی در داخل آسیا از دی اکسید کربن، نیتروژن و اسید نیتریک استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که بیش‌ترین محیط‌های کاهش‌ی با استفاده از گاز CO<sub>2</sub> و واسطه فولادی نرم و یا با استفاده از نیتروژن با اسید نیتریک برای تنظیم pH=۶ (همان pH که برای CO<sub>2</sub> استفاده شد) بدست

می‌آید. آن‌ها نشان دادند که محیط خردایش کاهنده‌ی بالا که با دی اکسید کربن ایجاد می‌شود، فلوتاسیون کانی‌های پلاتین و پالادیم با سولفور کم را بهبود می‌دهد.

**آلدریچ** (Aldrich, 2013)، فاکتورهای موثر بر مصرف واسطه خردایش در آسیاها را مورد بازبینی قرار داده و در مطالعات خود بیان کرد که مصرف واسطه خردایش از لحاظ اقتصادی نقش بسیار مهمی را در خردایش و متعاقباً در فرآوری مواد معدنی دارد. او گزارش داد که اگرچه تاثیر تعدادی از فاکتورها روی فرسایش واسطه خردایش مورد بررسی قرار گرفت، اما تعدادی زیادی فاکتورها و اندرکنش آن‌ها و تاثیرات آن‌ها کمتر مطالعه شده است و کمی نمودن تاثیر این فاکتورهای روی فرسایش واسطه خردایش همواره با چالش‌هایی همراه بوده است. آلدریچ گزارش داد که علی‌رغم تحقیقاتی که در چند دهه اخیر روی فرسایش واسطه خردایش انجام شده است، اما هنوز مشخصه‌یابی فاکتورهای محیط خردایش بر روی فرسایش بار خردکننده مشکل بوده و مطالعات کمی در بحث تاثیر فاکتورهای محیط خردایش (همانند pH، بار آسیا، مصرف توان و ...) و اندرکنش آن‌ها انجام شده است.

### ۳-۲. جمع بندی

مرور بر تحقیقات گذشته از سال ۱۹۶۰ تاکنون نشان می‌دهد اگرچه تحقیقات بسیاری در زمینه مطالعه الکتروشیمی محیط خردایش، برهم کنش گالوانیکی بین کانی‌های سولفیدی با واسطه خردایش و فاکتورهای موثر بر میزان خوردگی بار خردکننده انجام گرفته است، اما جمع‌بندی نتایج، حاکی از عدم کار تحقیقی موثر در زمینه‌های رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش یک کانه مس سولفیدی پورفیری، تاثیر اندرکنش فاکتورهای مهم بر میزان خوردگی بار خردکننده و مدل‌سازی پارامترهای موثر بر نرخ خوردگی بار خردکننده آسیاها می‌باشد. به همین دلیل مسائل فوق مورد مطالعه قرار گرفت.

## فصل چهارم:

مواد، روش‌ها و تجهیزات

#### ۴-۱. مواد و تجهیزات

##### ۴-۱-۱. نمونه معرف و آماده‌سازی آن

نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش‌ها از نوار نقاله ۱۳ (محل بار ورودی به آسیاهای گلوله‌ای)، تهیه شدند. به منظور آماده‌سازی، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از سنگ شکن فکی آزمایشگاهی خرد شده و سپس در آزمایشگاه با آنالیز سرنندی با توجه به اهداف انجام آزمایش‌ها، به صورت محدوده‌های ابعادی مختلف از ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ میکرون تهیه شدند. پس از آن اقدام به مخلوط کردن نمونه‌ها، همگن‌سازی و تقسیم نمودن نمونه‌ها با استفاده از تقسیم‌کن ریفل گردید. این تقسیمات متوالی تا جایی که نمونه یکسان و همگن به وزن ۳۶۵ گرم بدست آید، ادامه یافت. در نهایت نمونه‌های معرف هر محدوده‌ی ابعادی به آزمایشگاه برای آنالیز شیمیایی ارسال شد که ترکیب شیمیایی نمونه معرف برای هر محدوده‌ی ابعادی در جدول (۴-۱) ارائه شده‌اند.

جدول (۴-۱): ترکیب شیمیایی نمونه کانسنگ مس سرچشمه به همراه اندازه محدوده‌های ابعادی مختلف (% وزنی)

| ترکیب شیمیایی کانه (درصد وزنی) |                  |      |       |      |      | محدوده‌ی دانه‌بندی<br>(میکرون) |
|--------------------------------|------------------|------|-------|------|------|--------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | S    | Mo    | Fe   | Cu   |                                |
| ۱۳/۱۲                          | ۵۸/۹۴            | ۲/۷۲ | ۰/۰۲۰ | ۳/۸۲ | ۰/۵۵ | -۲۰۰۰+۸۵۰                      |
| ۱۳/۳۹                          | ۵۷/۰۹            | ۳/۷۳ | ۰/۰۱۹ | ۴/۷۳ | ۰/۶۱ | -۸۵۰+۴۲۰                       |
| ۱۴/۹۰                          | ۵۶/۱۸            | ۴/۸۶ | ۰/۰۳۷ | ۵/۸۰ | ۰/۷۸ | -۴۲۰+۲۵۰                       |
| ۱۴/۳۵                          | ۵۵/۰۷            | ۳/۰۵ | ۰/۰۳۲ | ۴/۳۴ | ۰/۷۴ | -۲۰۰۰+۲۵۰                      |

##### ۴-۱-۲. مواد و ترکیب‌های شیمیایی

به منظور بررسی تاثیر کانی‌شناسی کانه بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها و نیز برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌های پیریت و کالکوپیریت با گلوله‌های فولادی، کانی‌های خالص پیریت و کالکوپیریت و دو ترکیب شیمیایی مختلف از کانه مس سرچشمه تهیه شدند. کانی‌های خالص پیریت و کالکوپیریت به ترتیب از معدن مس میدوک در شهر بابک (استان کرمان) و معدن مس قلعه زری در

جنوب بیرجند (استان خراسان جنوبی) تهیه شدند. آنالیز شیمیایی نمونه‌های کانه مس سرچشمه و کانی‌های خالص در جدول (۲-۴) آورده شده‌اند.

جدول (۲-۴) ترکیب شیمیایی کانه مس و کانی‌های خالص مورد استفاده در آزمایش‌های خردایش

| ترکیب شیمیایی کانه (درصد وزنی) |                                |                  |       |       |       |       | نوع نمونه       |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| CaO                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | S     | Mo    | Fe    | Cu    |                 |
| -                              | ۱۴/۳۵                          | ۵۵/۰۷            | ۳/۰۵  | ۰/۰۳۲ | ۴/۳۴  | ۰/۷۴  | کانه سرچشمه (A) |
| -                              | ۱۴/۴۷                          | ۵۰/۹۶            | ۲/۱۰  | ۰/۰۱۹ | ۴/۵۲  | ۰/۹۰  | کانه سرچشمه (B) |
| ۰/۲۶                           | -                              | ۴/۸۴             | ۳۱/۱۷ | ۰/۰۱۵ | ۲۹/۰۲ | ۳۱/۶۰ | کالکوپیریت خالص |
| ۰/۱۹                           | ۰/۶۴                           | ۲/۳۱             | ۴۹/۸۸ | ۰/۰۶۶ | ۴۴/۸۸ | ۰/۱۵  | پیریت خالص      |

دو نوع گلوله فولادی شامل گلوله فولادی با آلیاژ پایین<sup>۱</sup> و گلوله فولادی با کربن و کروم بالا<sup>۲</sup> به عنوان بار خردکننده (واسطه خردایش) در آزمایش‌ها استفاده شدند که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۳-۴) آورده شده‌اند. قطر گلوله‌های مورد استفاده در این تحقیق، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ اینچ بودند.

جدول (۳-۴): ترکیب شیمیایی گلوله‌های فولادی

| ترکیب شیمیایی گلوله (درصد وزنی) |       |       |       |       |       |       |       | علامت | نوع گلوله                          |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| Cu                              | Mo    | Cr    | Mn    | P     | S     | Si    | C     |       |                                    |
| ۰/۰۴۴                           | ۰/۱۷۷ | ۱۳/۲۵ | ۱     | ۰     | ۰/۰۴۹ | ۰/۶۹۸ | ۲/۲۸  | HS    | گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا |
| ۰/۰۱۲                           | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۹ | ۰/۵۸۶ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۴ | ۰/۱۷۳ | ۰/۲۴۹ | LS    | گلوله فولادی با آلیاژ پایین        |

دو نوع آب شامل آب معمولی (آب شیر) و آب یک بار تقطیر شده، برای بررسی تاثیر شیمی آب بر خوردگی گلوله‌های فولادی در طول خردایش اسفاده شد که ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول (۴-۴) آورده شده‌اند.

<sup>1</sup> - Low alloy steel ball

<sup>2</sup> - High carbon chromium steel ball

هیدروکسید سدیم برای تنظیم pH در میزان مورد نظر در طول خردایش و لیچینگ EDTA و آهک (CaO) برای تنظیم pH در طول فرآیند فلوتاسیون به کار گرفته شد.

مواد شیمیایی Z11 (سدیوم ایزوپروپیل گزنتات<sup>۱</sup>) و مرکاپتوبنزوتیازول<sup>۲</sup> به عنوان کلکتور و MIBC (متیل ایزوبوتیل کربونیل<sup>۳</sup>) و F742 (پلی پروپیلن گلیکول<sup>۴</sup>) به عنوان کف‌ساز در فرآیند فلوتاسیون استفاده شدند.

جدول (۴-۴): آنالیز شیمیایی آب‌های مورد استفاده در آزمایش‌های خردایش

| آنالیز شیمیایی (ppm) |                  |                  |                               |                  |                 | نوع آب                     |
|----------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Mg <sup>+2</sup>     | Fe <sup>+3</sup> | Fe <sup>+2</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Ca <sup>+2</sup> | Cl <sup>-</sup> |                            |
| ۳                    | ۰/۰۲             | Tr               | ۴۰                            | ۲۴/۳             | ۳۷/۸            | آب معمولی (آب شیر)         |
| ۰/۸۲                 | ۰/۰۳             | Tr               | Tr                            | ۲/۶              | Tr              | آب مقطر (یک بار تقطیر شده) |

#### ۴-۱-۳. تجهیزات

به منظور مطالعه رفتار الکتروشیمی محیط خردایش کانه مس سرچشمه و خوردگی بار خردکننده، یک سیستم خردایش ویژه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی در مجتمع مس سرچشمه طراحی و ساخته شد. این سیستم خردایش شامل یک آسیای گلوله‌ای ویژه، بخش نمونه‌گیری، تجهیزات الکتروشیمیایی که به آسیا وصل می‌شود، سیستم پمپ پالپ و سیستم تزریق گازهای مختلف (نیتروژن، هوا و اکسیژن) برای تغییر شرایط اکسایش و کاهش محیط داخل آسیا، می‌باشد.

آسیای گلوله‌ای ویژه از یک لوله استوانه‌ای ضد زنگ به قطر (بیرونی) ۲۱ و طول ۳۰ سانتی‌متر با ضخامت دیواره ۰/۷ سانتی‌متر ساخته شد که مشخصات جزئی‌تر آسیای مورد نظر در جدول (۴-۵) درج شده است.

<sup>۱</sup> - Sodium isophrophil xanthate

<sup>۲</sup> -Mercaptobenzothiazole

<sup>۳</sup> - Methyl isoboutyl carbinol

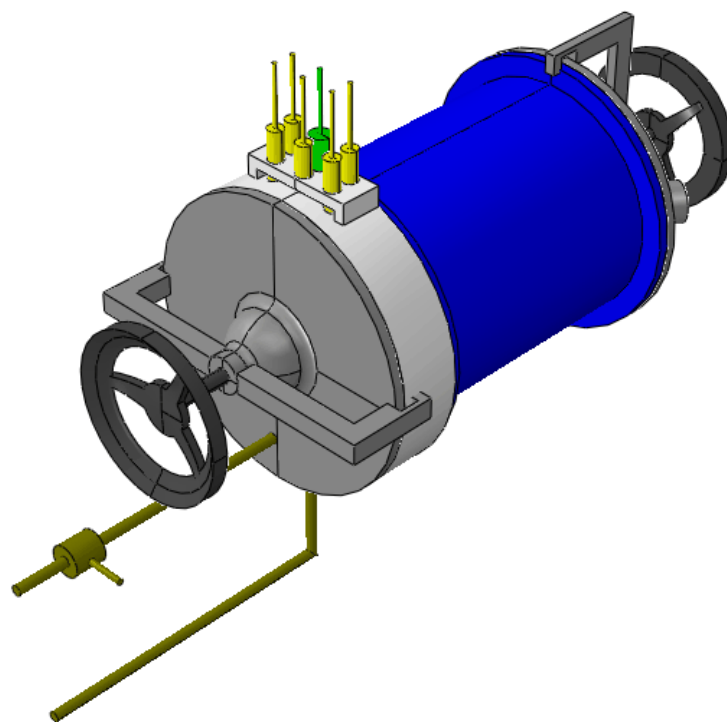
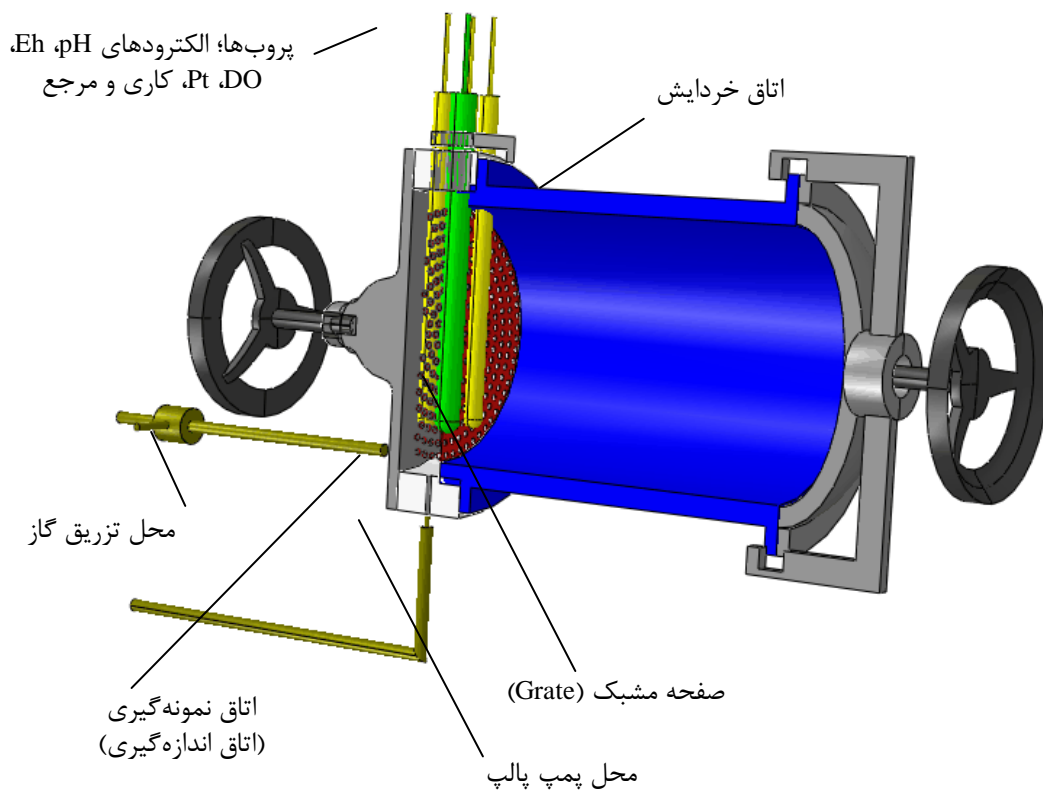
<sup>۴</sup> - Polypropylene glycol

تجهیزات الکتروشیمیایی متصل شده به آسیا شامل دستگاه پتانسیواستات/گالوانوستات با یک سیستم سه الکترودی می‌باشد، این دستگاه به یک کامپیوتر برای دریافت و مدیریت داده‌ها وصل می‌شود. بخش نمونه‌گیری که پالپ در طول خردایش از لوله استوانه‌ای خردایش برای کنترل شرایط شیمیایی وارد آن می‌شود، از یک استوانه از جنس پلکسی گلاس با قطر (بیرونی) ۲۸/۴، طول ۸، و ضخامت دیواره ۳/۶ سانتی‌متر ساخته شده است. در قسمت فوقانی بخش نمونه‌گیری ۶ محل برای قرار دادن پروب‌های اندازه‌گیری pH متر، Eh متر (پتانسیل پالپ)، DO متر (غلظت اکسیژن محلول)، الکتروود پلاتین، الکتروود مرجع کلرید نقره اشباع از ۳ مولار کلرید پتاسیم (Ag/AgCl/3M KCl) و الکتروود کاری (الکتروود کانی یا گلوله فولادی) تعبیه شده است.

طرح شماتیک آسیای گلوله‌ای ویژه و تصویر سیستم خردایش الکتروشیمیایی ساخته شده در شکل-های (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است که پالپ از بخش نمونه‌گیری به خارج آسیا پمپ شده و با گازهای مختلف (در صورت لزوم برای تغییر شرایط اکسایش و کاهش محیط داخل آسیا) مخلوط شده و پس از آن به داخل آسیا (اتاق خردایش) بر گردانده می‌شود. گازها با نرخ ۶ لیتر بر دقیقه به سیستم تزریق می‌شدند.

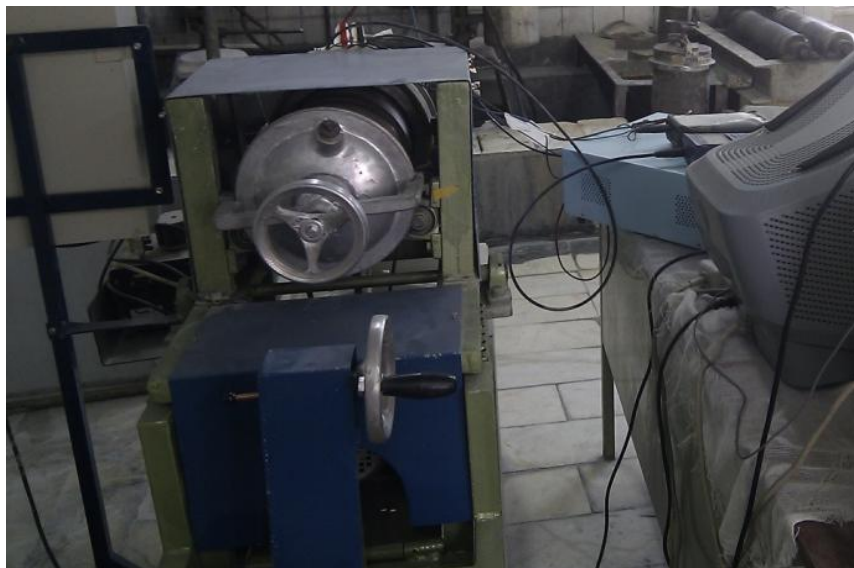
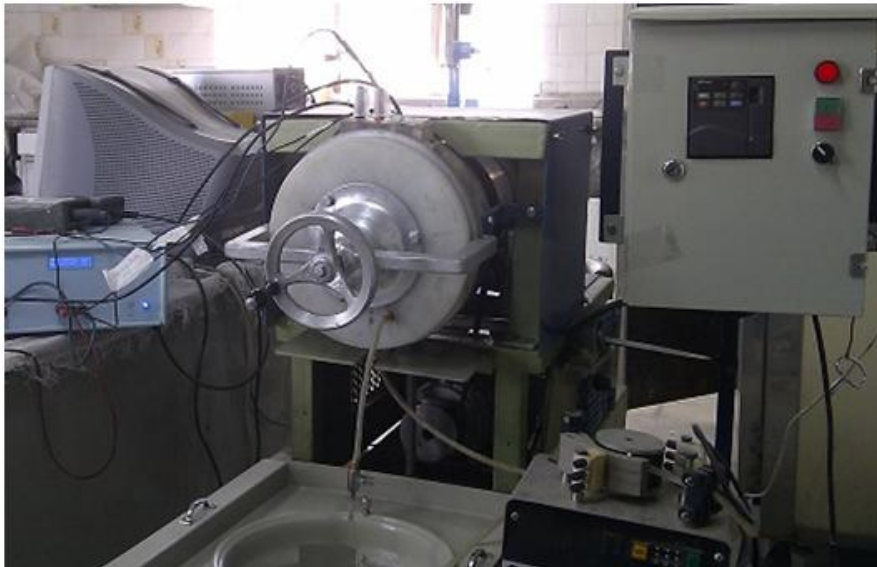
جدول (۴-۵): مشخصات سیستم خردایش الکتروشیمیایی ویژه

| اطلاعات آسیا |                        |                   |
|--------------|------------------------|-------------------|
| ۱۹۶          | قطر داخلی (میلی‌متر)   | اتاق خردایش       |
| ۲۱۰          | قطر بیرونی (میلی‌متر)  |                   |
| ۳۰۰          | طول (میلی‌متر)         |                   |
| فولاد ضد زنگ | جنس استوانه آسیا       | اتاق نمونه‌گیری   |
| ۲۱۲          | قطر داخلی (میلی‌متر)   |                   |
| ۲۸۴          | قطر بیرونی (میلی‌متر)  |                   |
| ۸۰           | طول (میلی‌متر)         |                   |
| پلکسی گلاس   | جنس استوانه نمونه‌گیری | صفحه مشبک (grate) |
| ۰/۵          | ضخامت (میلی‌متر)       |                   |



شکل (۴-۱): طرح شماتیک آسیای گلوله‌ای الکتروشیمیایی





شکل (۴-۲): تصویر سیستم خردایش الکتروشیمیایی ساخته شده (Set up) از دو نمای متفاوت

#### ۴-۲. روش تحقیق

##### ۴-۲-۱. روش ساخت الکتروده کانی و واسطه خردایش

به منظور مطالعات الکتروشیمیایی داخل آسیا، نیاز به الکترودهای کانی و بار خردکننده است که روش ساخت آنها تشریح می‌شود:

به منظور ساخت الکتروده، گلوله‌های فولادی و نمونه‌های بلوری پیریت و کالکوپیریت که از معدن مس میدوک و معدن مس قلعه زری تهیه شدند، به صورت مکعب مستطیلی با سطح  $7 \times 7$  میلی‌متر و

ارتفاع ۱۵ میلی‌متر برای قرار دادن در یک لوله تفلونی، بریده شدند. سیم مسی به وسیله چسب نقره بر هر یک از نمونه‌های کانی و گلوله‌های فولادی سوار گردید. سپس نمونه‌ها در داخل لوله تفلونی قرار گرفتند به نحوی که سطح کاری (سطح مورد استفاده) آن مشخص باشد. بخش مرکزی لوله تفلونی بوسیله دو نوع چسب غیر هادی رزین اپوکسی (Resin Epoxy) و رزین سفت‌کننده (Resin Hardener) با نسبت ۵ به ۱ پر گردید و بعد از ۲۴ ساعت که چسب سفت شد، الکتروود مورد نظر آماده استفاده گردید. سطح الکتروود ساخته شده قبل و بعد از هر آزمایش بوسیله کاغذ سمباده براق و تازه گردید. قابل ذکر است این روش کلی ساخت الکتروود کانی یا بار خردکننده است. در این تحقیق از لوله آزمایش به جای لوله تفلونی استفاده شد و در پایان ساخت الکتروود که قالب الکتروود شکل گرفت و سفت شد، لوله آزمایش شکسته شده و الکتروود آماده استفاده گردید. شکل (۳-۴) نمونه ای از الکتروود ساخته شده کانی و بار خردکننده را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): الکتروود گلوله فولادی و کالکوپیریت

#### ۲-۲-۴. خردایش

آزمایش‌های خردایش روی نمونه معرف از کانه مس یا کانی خالص تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی بوسیله آسیای گلوله‌ای الکتروشیمیایی ساخته شده، انجام شد تا ۷۰ درصد ذراتی با قطر کمتر از ۷۵

میکرون بدست آید. شرایط مختلف آزمایشگاهی تست‌های خردایش برای هر هدف مورد نظر در بخش مربوط به آن به طور کامل توضیح داده خواهد شد.

#### ۴-۲-۳. تعیین نرخ خوردگی

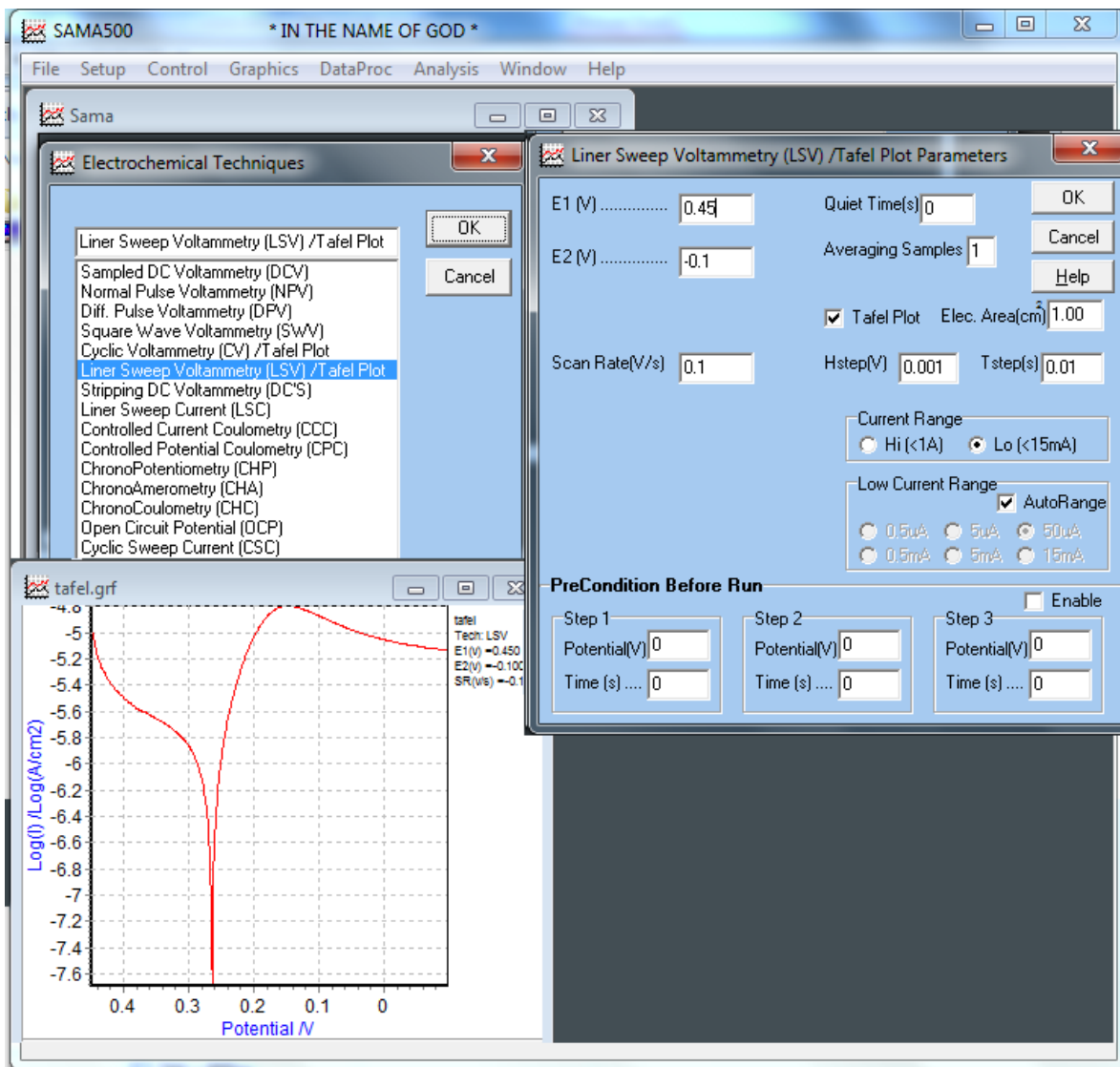
به منظور تعیین نرخ خوردگی از منحنی‌های پلاریزاسیون (نمودارهای تافل) که اصول و مبانی آن در فصل دوم به طور کامل توضیح داده شد، استفاده گردید. منحنی‌های پلاریزاسیون و داده‌های لازم بوسیله دستگاه پتانسیواستات که به یک کامپیوتر وصل می‌شد، با استفاده از نرم افزار سما ۵۰۰ (SAMA 500)<sup>۱</sup> که یک نرم‌افزار آنالیزور الکتروشیمیایی است، در اختیار ما قرار می‌گرفت. برای اندازه‌گیری نرخ خوردگی ابتدا با استفاده از روش OCP در نرم افزار SAMA 500 مقدار پتانسیل مدار باز اندازه‌گیری شد. در روش OCP نمودار پتانسیل-زمان در یک فاصله زمانی (مثلاً ۱۰ دقیقه) رسم می‌شود تا مشاهده شود که تغییرات پتانسیل به یک میزان ثابتی می‌رسد، این پتانسیل، پتانسیل مدار باز می‌باشد.

در این تحقیق پتانسیل مدار باز الکتروود گلوله فولادی در شرایط بدون هوادهی، مقدار ۳۵۰- میلی ولت بدست آمد. سپس با استفاده از تکنیک LSV و روش برون‌یابی تافل، منحنی‌ها و داده‌های پلاریزاسیون حاصل شد. در این روش دو مقدار پتانسیل اولیه و نهایی لازم است تا نمودار تافل در این محدوده رسم شود. این مقادیر پتانسیل‌های اولیه و نهایی، با کم و زیاد کردن یک میزان ثابتی به عنوان مثال با اضافه و کم کردن ۲۵۰ میلی ولت به پتانسیل استراحتی که در روش OCP بدست آمد، تعیین می‌شود، زیرا پتانسیل خوردگی در محدوده‌ی پتانسیل مدار باز رخ می‌دهد. در این تحقیق با توجه به تحقیقات گذشته و مقالات مختلف و انجام یک سری تست‌های آزمایشی، محدوده پتانسیل-های اولیه و نهایی برای بدست آوردن نمودارهای تافل و داده‌های مربوطه، با اضافه و کم کردن ۶۴۰ میلی‌ولت به پتانسیل مدار باز (۳۵۰- میلی‌ولت)، ۲۹۰+ تا ۹۹۰- میلی‌ولت یعنی  $۶۴۰ \pm ۳۵۰$  میلی-  

---

<sup>۱</sup> - این نرم افزار بوسیله مرکز تحقیقات سما در اصفهان طراحی و ساخته شده است.

ولت بدست آمد. شکل (۴-۴) طرح شماتیکی از نرم افزار SAMA 500، تکنیک‌های الکتروشیمیایی و نحوه رسم نمودار تافل را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): طرح شماتیک نرم افزار الکتروشیمیایی سما ۵۰۰ و نحوه استفاده از آن

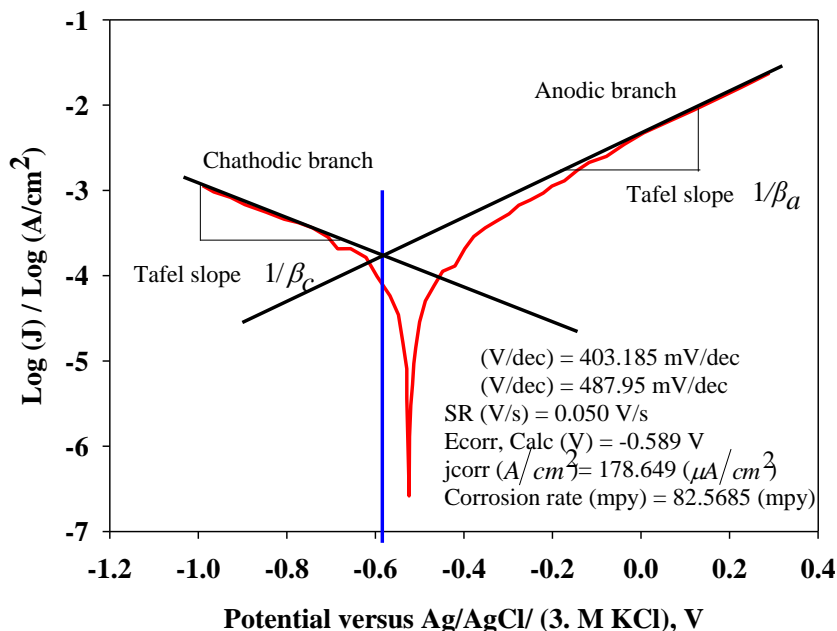
پس از رسم نمودارهای پلاریزاسیون (تافل)، با استفاده از رسم شیب خط دو منحنی آندی و کاتدی و به دست آوردن نقطه تقاطع دو شیب می‌توان مقادیر پارامترهای پتانسیواستاتیک یعنی دانسیته جریان خوردگی ( $j_{corr}$ ) و پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) را محاسبه نمود (برای مثال: شکل (۴-۵)) و در نهایت با

استفاده از فرمول زیر که بر اساس قانون فارادی است، نرخ خوردگی را اندازه‌گیری کرد (Ailor, 1971):

$$CR = \frac{0.1288 \times EW \times j_{corr}}{\rho} \quad (1-4)$$

در رابطه فوق، CR،  $j_{corr}$ ، EW و  $\rho$ ، به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خوردگی بر حسب هزارم اینچ در سال (mpy)، دانسیته جریان خوردگی بر حسب میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع ( $\mu A/cm^2$ )، وزن اکی‌والان فلز بر حسب گرم (g) (تقسیم وزن اتمی (W) بر تعداد الکترون‌های مبادله شده (n) یعنی  $W/n$ ) و دانسیته فلز بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب ( $g/cm^3$ ) هستند.

شکل (۴-۵) نحوه تعیین میزان خوردگی گلوله را از منحنی‌های پلاریزاسیون برای یکی از داده‌های آزمایشگاهی، هنگامی که کانه مس سرچشمه (کانه A) با گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $pH=10-10.5$  و درصد جامد ۳۵٪ خرد می‌شد، ارائه می‌دهد.



شکل (۴-۵): منحنی پلاریزاسیون گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $pH=10-10.5$ ، درصد جامد ۳۵٪، زمان خردایش ۱۲/۵ دقیقه، سرعت گردش آسیا ۷۵ دور بر دقیقه با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه

#### ۴-۲-۴. فلوتاسیون

به منظور انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، پالپ خروجی آسیا بعد از فرآیند خردایش به یک سلول فلوتاسیون (سلول ۱/۵ لیتری) از نوع دنور (Denver 001/001 SXED 63093) منتقل گردید. سپس درصد جامد پالپ مورد نظر در سلول فلوتاسیون در میزان ۲۸ درصد تنظیم شد و در سه مرحله مورد آماده‌سازی قرار گرفت. در مرحله اول، pH پالپ با اضافه کردن تدریجی آهک در ۱۱/۸ تنظیم شد (آهک نقش بازداشت کننده پیریت را هم دارد). پس از تنظیم pH، ۴۰ گرم بر تن کلکتور به میزان ۱۵ گرم بر تن کلکتور Z11 و ۲۵ گرم بر تن کلکتور مرکاپتوبنزوتیازول به سلول اضافه شد. سپس بعد از ۲ دقیقه از اضافه کردن کلکتورها، ۳۰ گرم بر تن کف‌ساز به میزان ۱۵ گرم بر تن کف‌ساز MIBC و ۱۵ گرم بر تن کف‌ساز F742 اضافه گردید. در نهایت بعد از گذشت ۱ دقیقه از زمان اضافه کردن کف‌سازها، شیر هوا باز شد و به مدت ۸ دقیقه در زمان‌های تجمعی ۳۰ ثانیه، ۲ دقیقه، ۴ دقیقه و ۸ دقیقه به طور سینتیکی هر ۱۰ ثانیه کف‌گیری شد. قابل ذکر است که دور فلوتاسیون ۱۴۰۰ دور بر دقیقه بود.

#### ۴-۲-۵. تکنیک استخراج با EDTA

تکنیک لیچینگ یا استخراج با EDTA (اتیلن دی آمین تترا استیک اسید<sup>۱</sup>) برای تخمین میزان انواع آهن اکسیدی تولید شده از گلوله‌های فولادی یا کانی‌ها در طول خردایش در تخلیه آسیا به کار گرفته شد. به این منظور از روش استخراج با EDTA انجام شده توسط کولینان و همکاران (Cullinan et al., 1999)، رومبول و ریچموند (Rumball and Richmond, 1996)، و گریت و اسمارت (Greet and Smart, 2002) به شرح ذیل استفاده گردید.

ابتدا دو نمونه پالپ هر کدام به حجم ۲۵ میلی‌لیتر از پالپ خروجی آسیا گرفته شد. یکی از نمونه‌ها فیلتر شده و نمونه جامد فیلتر شده به آزمایشگاه برای عیار سنجی آهن ارسال گردید. نمونه پالپ دوم

<sup>1</sup> - Ethylene diamine tetraacetic acid

وزن شده و برای تست EDTA، کنار گذاشته شد. سپس ۳ درصد وزنی محلول نمک اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (دی سدیم) یا EDTA آماده شد. یعنی ۳۰/۹۳ گرم نمک EDTA مطابق فرمول

$$0.03 = \frac{EDTA}{EDTA + water} \rightarrow EDTA = 30.93(g)$$

شده، در یک ظرف یک لیتری (بشر) به حجم رسید. ۲۵۰ میلی لیتر از محلول EDTA به حجم رسیده به همراه ۲۵ میلی لیتر نمونه پالپ وزن شده (نمونه دوم)، به داخل یک بشر آزمایشگاهی منتقل و با استفاده از یک همزن مغناطیسی هم زده شد. هنگام مخلوط کردن و همزدن محلول EDTA و نمونه پالپ آسیا مشاهده شد، pH مخلوط (محلول EDTA + نمونه پالپ) تا میزان ۴-۴/۵ کاهش یافت. به منظور استخراج آهن اکسیدی نیاز است که این میزان pH در ۷/۵ تنظیم شود. بنابراین همزمان با همزدن، هیدروکسید سدیم به طور تدریجی به محلول اضافه گردید تا pH در میزان مورد نظر تنظیم شد. زمان مورد نیاز تا تنظیم pH، حدود ۱۰ دقیقه طول کشید. بعد از تنظیم pH در ۷/۵، نمونه پالپ با محلول EDTA به مدت ۵ دقیقه دیگر بوسیله همزن مغناطیسی هم زده شد. بعد از پایان زمان ۵ دقیقه، نمونه بوسیله کاغذ فیلتر ۰/۲۲ میکرون فیلتر شد. سپس محلول فیلتر شده به آزمایشگاه جذب اتمی برای تعیین میزان آهن ارسال گردید. لذا با مشخص بودن وزن پالپ جمع آوری شده از تخلیه آسیا (۲۵ میلی لیتر) و عیار نمونه جامد آن و هم چنین با مشخص بودن میزان آهن محلول فیلتر شده نهایی (۲۵۰ میلی لیتر محلول EDTA + ۲۵ میلی لیتر نمونه پالپ آسیا)، براحتی درصد آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA با تقسیم جرم آهن در محلول بر جرم کل آهن در جامد، بدست می آید. مراحل انجام تست EDTA به طور خلاصه عبارت است از:

(۱) آماده سازی ۳ درصد وزنی محلول EDTA و تنظیم pH در ۷/۵ با هیدروکسید سدیم

(۲) قرار دادن ۲۵۰ میلی لیتر محلول EDTA در بشر و همزدن آن با همزن مغناطیسی

(۳) جمع آوری دو نمونه ۲۵ میلی لیتری از پالپ خروجی آسیا

(۴) تعیین وزن یک نمونه برای تعیین جرم پالپ و فیلتر نمونه پالپ دیگر برای تعیین عیار جامد آن

- ۵) قرار دادن پالپ در محلول EDTA و همزدن آن برای مدت ۵ دقیقه
- ۶) فیلتر نمونه پالپ و محلول EDTA با استفاده از کاغذ فیلتر ۰/۲۲ میکرون بعد از ۵ دقیقه استخراج
- ۷) عیارگیری محلول فیلتر شده با استفاده از جذب اتمی
- ۸) تعیین درصد آهن قابل استخراج بوسیله EDTA از تقسیم جرم آهن در محلول به جرم کل آهن
- در جامد



## فصل پنجم:

بررسی رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش

آسیاهای گلوله‌ای

## ۵-۱. مقدمه

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، رفتار الکتروشیمیایی مرحله آسیاکنی، اثر مهم و قابل توجهی بر فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده، خواص سطحی کانی‌ها، بازیابی فلوتاسیون و انتخاب پذیری کانی‌ها (سولفیدی) دارد. رفتار الکتروشیمیایی با پتانسیل پالپ، غلظت اکسیژن محلول، پتانسیل استراحت و برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و بار خردکننده بیان می‌شود. در این فصل به موضوعات فوق پرداخته می‌شود.

## ۵-۲. تاثیر فاکتورهای مهم خردایش بر خصوصیات الکتروشیمیایی (Eh، DO و OCP) و

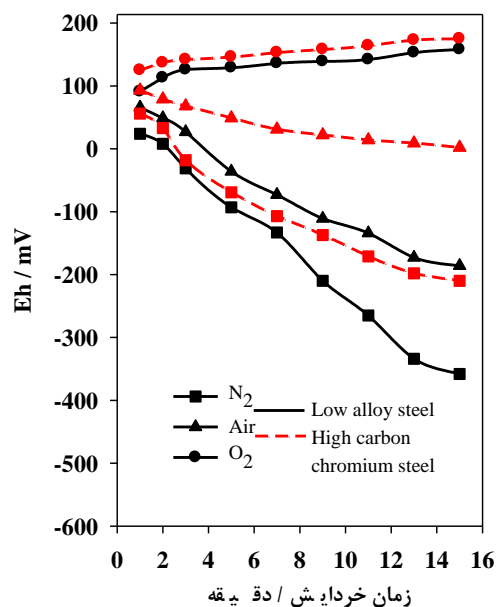
### فلوتاسیون مس

به منظور بررسی شیمی و الکتروشیمی داخل آسیاهای گلوله‌ای، تاثیر ۵ فاکتور اصلی شامل pH، درصد جامد پالپ، شیمی آب، شرایط هوادهی به آسیا و نوع گلوله فولادی روی خصوصیات الکتروشیمیایی یعنی پتانسیل پالپ (Eh)، پتانسیل مدار باز (OCP) و غلظت اکسیژن محلول پالپ (DO)، تحت شرایط مختلف آسیاکنی در خردایش کانه مس سرچشمه (کانه A) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف از سیستم خردایش الکتروشیمیایی توصیف شده در فصل چهارم استفاده گردید. نتایج در شکل‌های (۵-۱) تا (۵-۵) آورده شده‌اند.

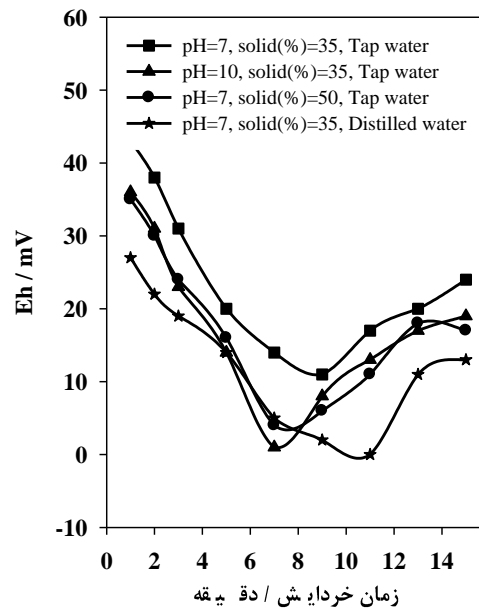
شکل (۵-۱) اثر نوع بار خرد کننده و شرایط مختلف هوادهی به سیستم خردایش را روی Eh در طول آسیاکنی، زمانی که  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و نوع آب مورد استفاده آب معمولی (شیر) بود، نشان می‌دهد. به وضوح از شکل قابل درک است که نوع گلوله‌های فولادی و شرایط هوادهی روی پتانسیل پالپ تاثیر بسزایی داشته‌اند و محیط اکسایش و کاهش را در طول آسیاکنی تغییر می‌دهند، به‌طوری‌که گلوله فولادی کربن و کروم بالا تحت اکسیژن‌دهی به محیط خردایش منجر به افزایش مقادیر Eh پالپ شده است (شکل (۵-۱)). این امر احتمالاً به دلیل غلظت بالای اکسیژن محلول پالپ در اثر اکسیژن‌دهی می‌باشد (شکل (۵-۳)).

شکل (۵-۲) تاثیر pH، درصد جامد پالپ و نوع آب را روی پتانسیل پالپ در طول خردایش کانه با گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بدون شرایط هوادهی زمانی که همه فاکتورها و شرایط ثابت بوده و فقط یک فاکتور در سطوح مختلف تغییر داده می‌شود، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش pH و درصد جامد پالپ و با تغییر نوع آب مورد استفاده در خردایش از آب معمولی (tap water) به آب مقطر (distilled water)، میزان پتانسیل پالپ کاهش می‌یابد و منجر به یک محیط کاهنده می‌شود.

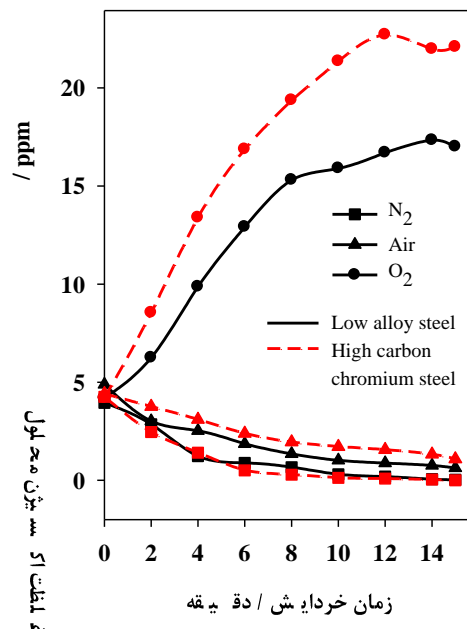
شکل (۵-۳) تاثیر نوع گلوله فولادی (واسطه خردایش) و شرایط هوادهی و شکل (۵-۴) تاثیر pH، درصد جامد پالپ و نوع آب مورد استفاده در طول خردایش را روی غلظت اکسیژن محلول (DO) نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود با تزریق اکسیژن به سیستم خردایش مقادیر DO افزایش می‌یابد، در حالی که با تزریق نیتروژن میزان اکسیژن محلول کاهش می‌یابد و حتی نزدیک به صفر می‌رسد.



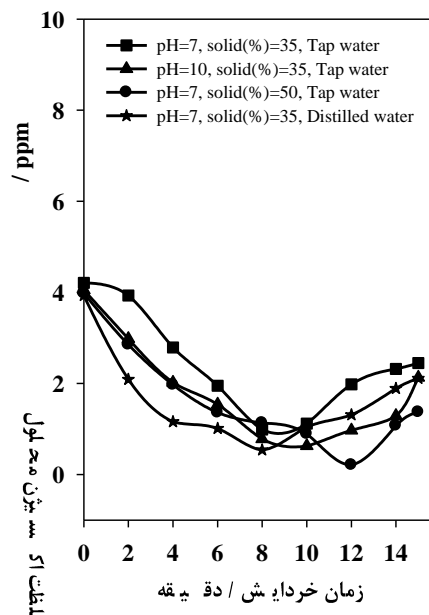
شکل (۵-۱): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (low alloy steel) و کربن-کروم بالا (High carbon chromium steel) روی پتانسیل پالپ در pH=۷-۷/۵ و درصد جامد ۳۵٪ در طول خردایش کانه A تحت شرایط مختلف هوادهی با گازهای نیتروژن، اکسیژن و هوا



شکل (۵-۲): تاثیر pH، درصد جامد و نوع آب روی پتانسیل پالپ در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی آلیاژ پایین بدون شرایط هوادهی

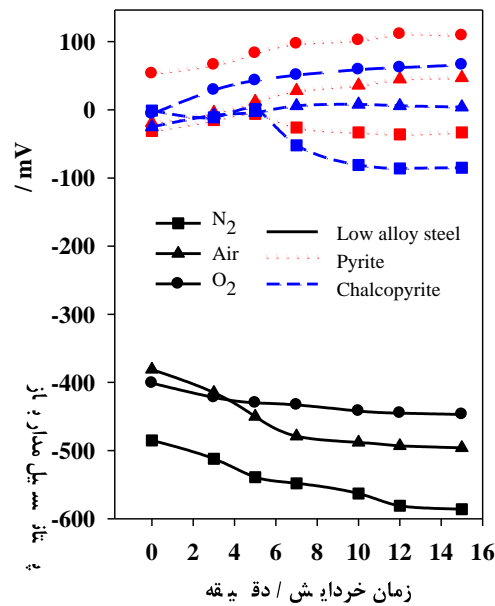


شکل (۵-۳): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا و شرایط مختلف هوادهی روی غلظت اکسیژن محلول در pH=۷-۷/۵ و درصد جامد ۳۵٪ در طول خردایش کانه A تحت شرایط مختلف هوادهی با گازهای نیتروژن، اکسیژن و هوا



شکل (۴-۵): تاثیر pH، درصد جامد و نوع آب روی غلظت اکسیژن محلول در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی آلیاژ پایین بدون شرایط هوادهی

پارامتر الکتروشیمیایی دیگر که مورد بررسی قرار گرفت، پتانسیل استراحت یا پتانسیل مدار باز بود. پتانسیل استراحت یکی از مهم‌ترین خصوصیات الکتروشیمیایی است که نه تنها نشان دهنده‌ی حساسیت یک ماده به خوردگی است بلکه تعیین کننده‌ی نقش واسطه خردایش و کانی‌ها در کوپل گالوانیکی نیز می‌باشد (Huang and Grano, 2006). پتانسیل‌های مدار باز برای پیریت، کالکوپیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین تحت شرایط مختلف هوادهی در طول خردایش کانه مس به صورت تابعی از زمان خردایش بر اساس روش OCP اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۵) تاثیر دو نوع گلوله فولادی و تزریق گازهای اکسیژن، هوا و نیتروژن به داخل آسیا را روی پتانسیل مدار باز در  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و هنگامی که آب مورد استفاده در طول خردایش آب شیر بود، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شرایط مختلف هوادهی و نوع گلوله فولادی تاثیر بسیار زیادی بر پتانسیل مدار باز هم گلوله فولادی و هم کانی‌ها دارد. ضمناً مشاهده می‌شود که پتانسیل استراحت در حضور اکسیژن با افزایش زمان خردایش، افزایش می‌یابد.



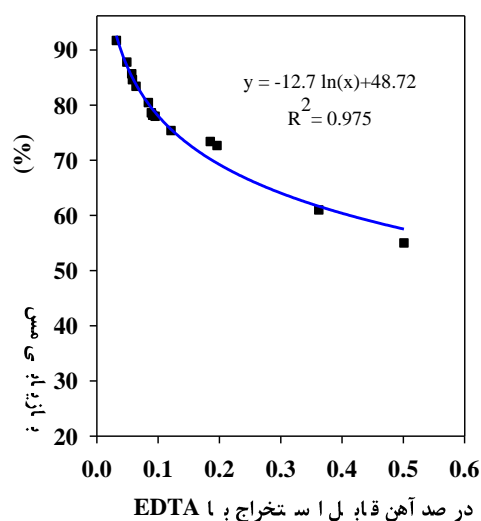
شکل (۵-۵): تاثیر گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا و شرایط مختلف هوادهی روی پتانسیل مدار باز در pH=7-7/5 و درصد جامد ۳۵ در طول خردایش کانه A

بعد از تعیین رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش کانه مس سولفیدی، آزمایش‌های EDTA و فلوتاسیون برای مطالعه نقش فاکتورهای موثر بر محیط خردایش روی خوردگی سیستم و فرآیند فلوتاسیون، انجام شد. نتایج حاصل در جدول (۵-۱) و شکل (۵-۶) ارائه شده‌اند که به شرح ذیل است. تغییر گاز از نیتروژن به هوا و به اکسیژن و تغییر نوع گلوله فولادی از گلوله حاوی کربن و کروم بالا به گلوله با آلیاژ پایین، شرایط اکسیداسیون محیط خردایش را تحت تاثیر قرار می‌دهد و منجر به میزان آهن اکسید شده‌ی بیشتری می‌شود. از طرفی دیگر میزان بیشتر انواع آهن اکسیدی، سبب اتصال گالوانیکی قوی‌تری میان گلوله‌ها و کانی‌ها در طول خردایش می‌گردد و نتیجتاً نرخ خوردگی گلوله‌ها افزایش می‌یابد. این روندها به این دلیل است که این فاکتورها، پتانسیل پالپ و غلظت اکسیژن محلول پالپ را در طول خردایش تغییر می‌دهند. روندهایی مشابهی همچنین در مقادیر پایین‌تر pH و درصد جامد، هنگامی که آب معمولی (شیر) در طول خردایش استفاده شد، مشاهده می‌شود. این رفتار ممکن است به علت تشکیل لایه مقاوم از اکسید فریک در pH و درصد جامد بالاتر باشد.

هنگامی که کانسنگ مس با گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا در حضور نیتروژن خرد می‌شود بیشترین بازیابی مس در فرآیند فلوتاسیون بدست می‌آید، درحالی که در حضور اکسیژن به علت تولید بیشتر انواع آهن اکسیدی از بار خردکننده روی سطح کانی‌های مس، بازیابی مس در فلوتاسیون کاهش می‌یابد. همان‌طور که در جدول (۵-۱) ملاحظه می‌شود گلوله فولادی با آلیاژ پایین منجر به بازیابی‌های کمتری می‌شود. این تاثیر گلوله‌های فولادی را به انواع اکسید فلزی تولید شده از بار خردکننده نسبت می‌دهند که سبب کاهش بازیابی فلوتاسیون می‌شود ( Natarajan and Iwasaki, 1988; Adam and Iwasaki, 1984; Yelloji Rao and Natarajan, 1988) یا به انواع اکسید غنی از سولفور تولید شده از کانی نسبت می‌دهند که موجب افزایش بازیابی فلوتاسیون کانی می‌شود ( Guy and Trahar, 1984).

جدول (۵-۱): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA و بازیابی مس تحت شرایط مختلف خردایش در طول خردایش کانه A

| بازیابی مس (%) | درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA | فاکتورها  |           |          |           |         |
|----------------|--|-----------|-----------|----------|-----------|---------|
|                |  | نوع گلوله | نوع آب    | نوع گاز  | درصد جامد | pH      |
| ۷۳/۴۱          | ۰/۱۸۵                                      | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۷/۹۹          | ۰/۰۹۵                                      | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۱۰-۱۰/۵ |
| ۷۸/۶۲          | ۰/۰۸۹                                      | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۵۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۸/۱۷          | ۰/۰۹۱                                      | LS        | آب مقطر   | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۵۵/۰۳          | ۰/۵۰۱                                      | LS        | آب معمولی | اکسیژن   | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۶۰/۹۹          | ۰/۳۶۲                                      | LS        | آب معمولی | هوا      | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۸۳/۴۱          | ۰/۰۶۴                                      | LS        | آب معمولی | نیتروژن  | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۸۰/۴۷          | ۰/۰۸۴                                      | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۸۴/۶۱          | ۰/۰۵۸                                      | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۱۰-۱۰/۵ |
| ۸۷/۸           | ۰/۰۴۹                                      | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۵۵        | ۷-۷/۵   |
| ۸۵/۶۹          | ۰/۰۵۷                                      | HS        | آب مقطر   | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۲/۶۹          | ۰/۱۹۶                                      | HS        | آب معمولی | اکسیژن   | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۵/۴           | ۰/۱۲۱                                      | HS        | آب معمولی | هوا      | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۹۱/۷۱          | ۰/۰۳۲                                      | HS        | آب معمولی | نیتروژن  | ۳۵        | ۷-۷/۵   |



شکل (۵-۶): همبستگی میان درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA (محصولات خوردگی گلوله) با بازیابی مس

نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش pH و درصد جامد پالپ، قابلیت شناورسازی مس افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که نوع آب در مرحله خردایش بر بازیابی مس تاثیر دارد به گونه‌ای که با تغییر نوع آب از آب معمولی (شیر) به آب یک بار تقطیر شده (آب مقطر)، بازیابی از ۷۳/۴۱ به ۷۸/۱۷ درصد در خردایش کانه با گلوله فولادی آلیاژ پایین و از ۸۰/۴۷ به ۸۵/۶۹ درصد در خردایش با گلوله فولادی کربن و کروم بالا می‌رسد.

شکل (۵-۶) ارتباط میان بازیابی مس و میزان انواع آهن اکسیدی تولید شده در تخلیه آسیا را نشان می‌دهد. بازیابی مس (y) بوسیله معادله رگرسیون لگاریتمی زیر (رابطه (۵-۱)) به درصد آهن اکسیدی تولید شده در تخلیه آسیا (x) که قابل استخراج بوسیله EDTA می‌باشد، مرتبط می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان بیشتر آهن اکسیدی تولید شده در آسیا بازیابی مس را بشدت کاهش می‌دهد.

$$y = -12.7 \ln(x) + 48.72, R^2 = 0.975 \quad (۱-۵)$$

به منظور تعیین آن که چه میزان از آهن اکسیدی تولید شده در تخلیه آسیا از گلوله‌های فولادی می‌باشد یا بعبارتی چه میزان از محصولات خوردگی از گلوله‌های فولادی است، یک سری آزمایش‌های



خردایش مشابه شرایط آزمایش‌های جدول (۵-۱) بر روی کانی خالص پیریت که مطابق آنالیز شیمیایی آن از ۹۹/۳ درصد پیریت خالص و ۰/۷ درصد دی اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) تشکیل شده بود، انجام شد. با توجه به این که اکسایش کانی پیریت مطابق واکنش‌های (۵-۲) و (۵-۳) می‌باشد (Winter and Woods, 1973; Heyes and Trahar, 1984, Wadsworth et al., 1993)، میزان اکسایش گلوله از اختلاف میزان آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA با نصف سولفور محلول (نصف سولفور محلول-میزان آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA) بدست می‌آید (Huang and Grano, 2005).



جدول (۵-۲): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA در طول خردایش کانی خالص پیریت به همراه درصد محصولات حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی

| درصد محصولات خوردگی حاصل از گلوله فولادی | اختلاف درصد آهن قابل استخراج با EDTA با نصف سولفور محلول | فاکتورها  |           |          |           |         |
|--|--|-----------|-----------|----------|-----------|---------|
|  |  | نوع گلوله | نوع آب    | نوع گاز  | درصد جامد | pH      |
| ۷۵/۱۴                                    | ۰/۱۳۹  | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۲/۶۳                                    | ۰/۰۶۹  | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۱۰-۱۰/۵ |
| ۷۴/۱۶                                    | ۰/۰۶۶  | LS        | آب معمولی | بدون گاز | ۵۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۰/۳۳                                    | ۰/۰۶۴  | LS        | آب مقطر   | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۸۳/۶۳                                    | ۰/۴۱۹  | LS        | آب معمولی | اکسیژن   | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۹/۸۳                                    | ۰/۲۸۹  | LS        | آب معمولی | هوا      | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۰/۳۱                                    | ۰/۰۴۵  | LS        | آب معمولی | نیتروژن  | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۱/۴۳                                    | ۰/۰۶   | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۴/۱۴                                    | ۰/۰۴۳  | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۳۵        | ۱۰-۱۰/۵ |
| ۷۵/۵۱                                    | ۰/۰۳۷  | HS        | آب معمولی | بدون گاز | ۵۵        | ۷-۷/۵   |
| ۶۸/۴۲                                    | ۰/۰۳۹  | HS        | آب مقطر   | بدون گاز | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۴/۴۹                                    | ۰/۱۴۶  | HS        | آب معمولی | اکسیژن   | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۷۳/۵۵                                    | ۰/۰۸۹  | HS        | آب معمولی | هوا      | ۳۵        | ۷-۷/۵   |
| ۶۵/۶۳                                    | ۰/۰۲۱  | HS        | آب معمولی | نیتروژن  | ۳۵        | ۷-۷/۵   |

جدول (۲-۵) درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA در خردایش کانی خالص پیریت و درصد محصول خوردگی حاصل از گلوله‌های فولادی را نشان می‌دهد. ستون آخر در جدول (۲-۵) از تقسیم میزان اکسایش گلوله یعنی اختلاف درصد آهن قابل استخراج با EDTA با نصف سولفور محلول در خردایش کانی خالص پیریت بر درصد آهن قابل استخراج با EDTA در جدول (۵-۱) بدست می‌آید. مطابق جدول به طور متوسط  $73/51$  درصد میزان آهن اکسیدی تولید شده در آسیا (یا همان محصولات خوردگی) از گلوله‌های فولادی می‌باشد.

### ۳-۵. برهم کنش گالوانیکی بین کالکوپیریت و پیریت با گلوله‌های فولادی در خردایش کانه مس سولفیدی

#### ۳-۵-۱. نقش نوع گلوله فولادی و شرایط هوادهی به آسیا در برهم کنش گالوانیکی پیریت و

#### کالکوپیریت با گلوله فولادی

برهم کنش‌های گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی‌های سولفیدی بویژه پیریت و کالکوپیریت یک رخداد معمول در عملیات فرآوری کانی‌ها است و به دلیل تفاوت در مقدار پتانسیل مدار باز یا میزان فعالیت الکتروشیمیایی، کانی‌های سولفیدی نیمه هادی می‌توانند به صورت همزمان با بار خردکننده (گلوله‌های فولادی) در داخل آسیا برهم کنش‌های الکتروشیمیایی داشته باشند. از طرفی دیگر به طور گسترده پذیرفته شده است که برهم کنش‌های گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی‌های سولفیدی، نه تنها خوردگی گلوله‌های فولادی را تسریع می‌کند، بلکه تاثیر منفی بر قابلیت فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مانند گالن، پیریت، پیروتیت، اسفالریت، و کالکوپیریت دارند.

توصیف برهم کنش‌های گالوانیکی در طول آسیاکنی، اساساً کیفی است، ولی جریان گالوانیک بین واسطه خردایش و کانی‌های سولفیدی با شبیه‌سازی شرایط خردایش قابل محاسبه است. بنابراین می‌توان با اندازه‌گیری جریان گالوانیکی بین کانی‌ها و بار خردکننده و همچنین با تعیین میزان گونه‌های آهن اکسید شده از بار خردکننده و کانی‌ها در پالپ آسیا بوسیله لیچینگ EDTA، برهم کنش

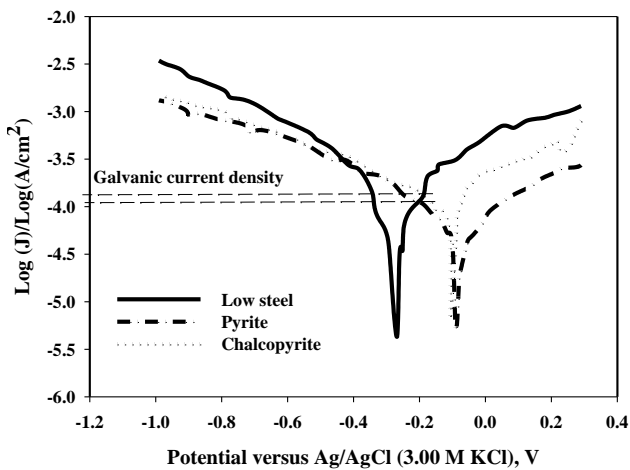
گالوانیکی را تایید و آن را به صورت کمی درآورد. هر چند این روش می‌تواند تاثیر غیر واقعی بودن مقیاس محیط آزمایشگاهی را با محیط واقعی آسیا با شرایط شبیه‌سازی شده به همراه داشته باشد. برای مطالعه برهم‌کنش گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی‌ها و کمی کردن آن از سیستم خردایش الکتروشیمیایی ویژه و از روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک استفاده شد.

پلاریزاسیون پتانسیودینامیک یک تکنیک جریان مستقیم است که اطلاعات اساسی از نرخ خوردگی، مناطق فعال، روئین و حساس به خوردگی می‌دهد و می‌تواند برای مطالعه برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و بار خردکننده بسیار مناسب باشد. منحنی‌های پلاریزاسیون گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن و کروم بالا، پیریت و کالکوپیریت با استفاده از تجهیزات الکتروشیمیایی توصیف شده بدست آمد. نتایج حاصل از مطالعات پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی برای پیریت، کالکوپیریت و گلوله فولادی با نرخ اسکن  $50 \text{ mV/sec}$  در شکل‌های (۷-۵) و (۸-۵) نشان داده شده‌اند.

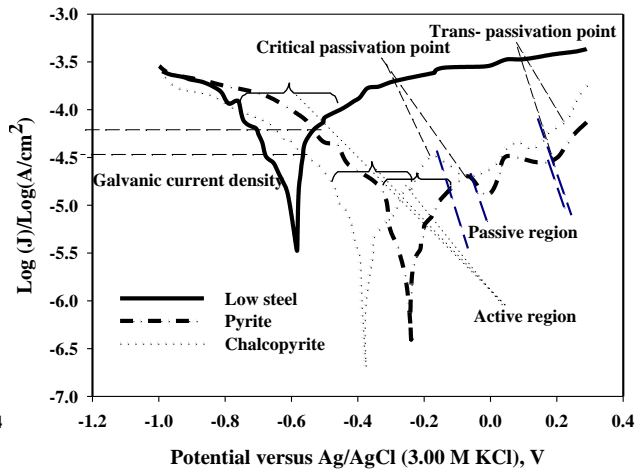
شکل (۷-۵) منحنی‌های پلاریزاسیون گلوله فولادی با آلیاژ پایین، پیریت و کالکوپیریت را تحت شرایط مختلف هوادهی به آسیای گلوله‌ای در طول خردایش کانه مس سولفیدی (کانه A) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت خردایش تحت نیتروژن، منطقه منحنی پلاریزاسیون کاتدیک از  $-990$  میلی‌ولت تا  $-585$ ،  $-377$  و  $-239$  میلی‌ولت و منطقه منحنی پلاریزاسیون آندیک از  $-585$ ،  $-377$  و  $-239$  میلی‌ولت تا  $+290$  میلی‌ولت به ترتیب برای گلوله فولادی، کالکوپیریت و پیریت است (شکل (۷-۵) الف)). در شکل (۷-۵) الف) مشاهده می‌شود که مناطق فعال، رویین و فرا رویین به راحتی می‌تواند برای پیریت و کالکوپیریت قابل تشخیص باشد. در مورد کالکوپیریت یک رفتار رویینگی حدود پتانسیل  $-175$  میلی‌ولت و یک رفتار فرارویینگی در پتانسیل حدود  $+180$  میلی‌ولت مشاهده می‌شود. این رفتار برای پیریت به ترتیب در  $-63$  و  $+199$  میلی‌ولت مشاهده می‌گردد. ضمناً، رفتار فعال-رویینگی-فرارویینگی برای گلوله فولادی با آلیاژ پایین هم مشاهده می‌شود.

در شکل (۷-۵) ب) مشاهده می‌شود که شروع مناطق رویینگی و فرا رویینگی تحت تزریق هوا به سیستم خردایش برای گلوله فولادی آلیاژ پایین به ترتیب  $49$  و  $125$  میلی‌ولت و برای کالکوپیریت،

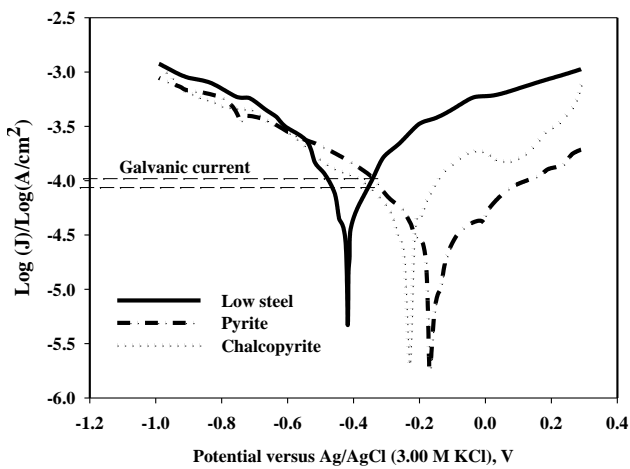
۲۱۸ و ۲۵۷ میلی‌ولت است، در حالی که برای پیریت هیچ پدیده پسیو یا رویینگی دیده نمی‌شود. در شکل (۷-۵ ج) و (۷-۵ د) همه منحنی‌ها از یک فرم عمومی از رفتار فعال، رویینگی و فرا رویینگی پیروی می‌کنند.



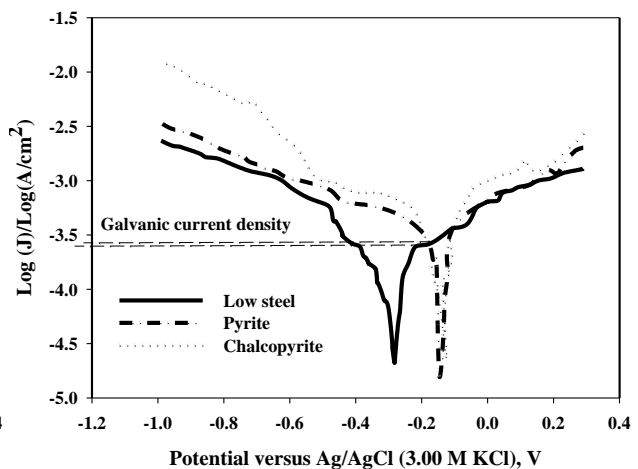
(ب)



(الف)



(د)

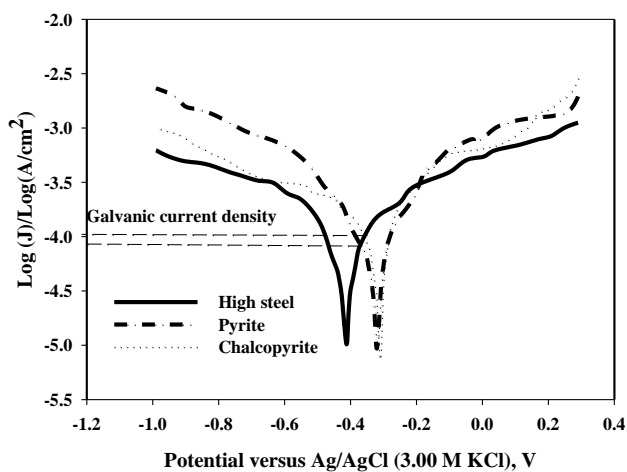


(ج)

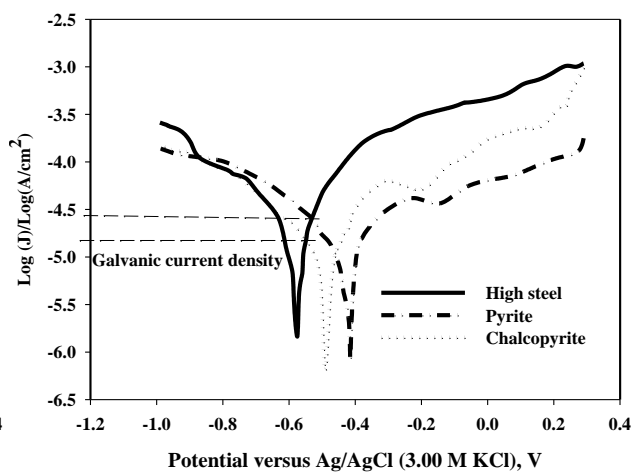
شکل (۷-۵): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت نیتروژن (الف)، هوا (ب)، اکسیژن (ج) و بدون هوادهی (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه

شکل (۸-۵) منحنی پلاریزاسیون گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا، پیریت و کالکوپیریت را تحت شرایط مختلف هوادهی در طول خردایش کانه A نشان می‌دهد. همه منحنی مربوط به پیریت و

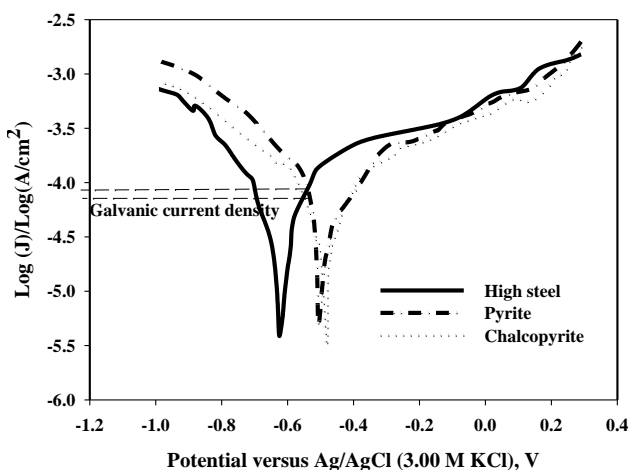
کالکوپیریت رفتار مقاوم را از خود نشان می‌دهند، هرچند حالت انتقال آن‌ها از فعال به غیرفعال فرق می‌کند. منحنی‌های پلاریزاسیون گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا یک منطقه رویینگی کوچکی را نشان می‌دهند که ممکن است به علت تشکیل انواع هیدروکسید آهن باشد که سبب غیرفعال شدن سطح گلوله شده و از اکسید شدن بیشتر گلوله جلوگیری می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه ناحیه غیرفعال هنگامی که گاز نیتروژن به سیستم خردایش تزریق می‌شود، بیشتر است.



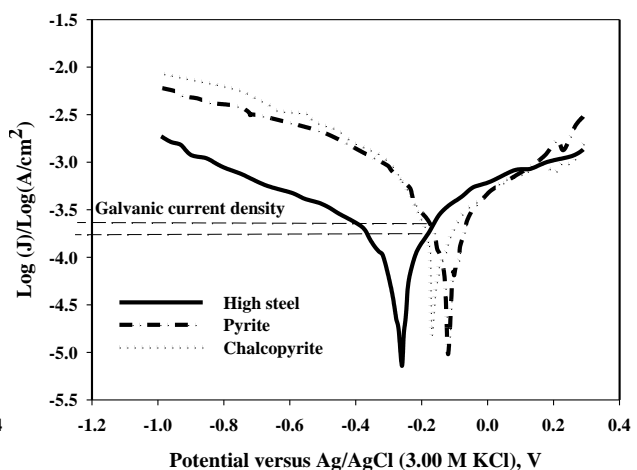
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۵-۸): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه A با گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا تحت نیتروژن (الف)، هوا (ب)، اکسیژن (ج) و بدون هوادهی (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه

در شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود که جریان در شاخه کاتدیک تحت نیتروژن‌دهی برای پیریت و کالکوپیریت در پتانسیل حدود ۹۰۰- میلی‌ولت و برای گلوله فولادی در ۹۴۰- میلی‌ولت به میزان معینی می‌رسد (شکل (۵-۸ الف)). تحت تزریق هوا به سیستم خردایش، در پتانسیل ۹۱۰- میلی‌ولت برای پیریت و کالکوپیریت و ۸۶۰- میلی‌ولت برای گلوله کربن و کروم بالا، تحت اکسیژن‌دهی در پتانسیل حدود ۷۴۵- و ۹۳۰- میلی‌ولت برای پیریت و کالکوپیریت و بدون شرایط هوادهی در پتانسیل حدود ۹۲۰- میلی‌ولت هم برای کانی‌ها و هم برای بار خردکننده، جریان در شاخه کاتدیک به میزان معینی می‌رسد (شکل (۵-۸ ب، ج و د)). در شاخه آندیک برای پیریت و کالکوپیریت هیچ جریان محدودی مشاهده نمی‌شود و برای گلوله فولادی هم در پتانسیل حدود ۱۶۰- میلی‌ولت در همه منحنی، جریان محدودی مشاهده می‌شود.

علاوه بر تفسیرهای فوق‌الذکر برای شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸)، که می‌توان از منحنی‌های پلاریزاسیون، مناطق مختلف خوردگی و ناحیه‌های روپینگی را برای خوردگی تعیین کرد، از طریق این منحنی‌ها می‌توان جریان گالوانیک بین کانی‌ها و گلوله‌ها و به عبارتی برهم‌کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و بار خردکننده را در مدت خردایش تعیین کرد. جریان در منحنی‌های پلاریزاسیون نشان‌دهنده‌ی نرخ همه الکترون‌هایی است که واکنش‌ها در سطح الکترودها مبادله می‌کنند. جدول (۵-۳) پتانسیل‌های ترکیبی حالت پایدار و دانسیته‌های جریان گالوانیک اندازه‌گیری شده بوسیله منحنی‌های پلاریزاسیون را در  $pH=7-7/5$ ، برای پیریت و کالکوپیریت تحت شرایط مختلف هوادهی در طول خردایش کانه مس نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۵-۳) ملاحظه می‌شود اکسیژن‌دهی به سیستم خردایش بالاترین جریان گالوانیک را در کوپل کانی-گلوله تولید می‌کند، در حالی که نیتروژن‌دهی منجر به کمترین جریان گالوانیک می‌شود. گلوله فولادی کربن و کروم بالا تحت نیتروژن، پایین‌ترین و گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت اکسیژن، بالاترین دانسیته جریان گالوانیک را دارند. بنابراین برهم‌کنش گالوانیکی بین گلوله‌های فولادی و کانی‌های سولفیدی بشدت تحت تاثیر نوع بار خردکننده و شرایط هوادهی (اکسیژن، هوا و نیتروژن) قرار می‌گیرد.

جدول (۳-۵): دانسیته جریان گالوانیک ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) و پتانسیل ترکیبی (mV نسبت به  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  (3.0 M KCl)) پیریت و کالکوپیریت با گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین و حاوی کربن و کروم بالا تحت شرایط مختلف هوادهی در داخل آسیا

| شرایط هوادهی | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین پیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین)         | دانسیته جریان گالوانیک بین پیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین           |
|--------------|--|--|
| بدون هوادهی  | -۳۴۵   | ۱۰۹/۶۳   |
| نیتروژن      | -۵۳۸   | ۶۳/۴۱  |
| هوا          | -۲۰۳   | ۱۱۱/۹۷   |
| اکسیژن       | -۱۷۹   | ۲۷۷/۵۰   |
| شرایط هوادهی | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین پیریت و گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا)  | دانسیته جریان گالوانیک بین پیریت و گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا    |
| بدون هوادهی  | -۵۳۱   | ۸۶/۵۳  |
| نیتروژن      | -۵۳۵   | ۲۶/۳۳  |
| هوا          | -۳۷۲   | ۸۹/۹۸  |
| اکسیژن       | -۱۷۲   | ۲۱۲/۱۸   |
| شرایط هوادهی | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین کالکوپیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین)    | دانسیته جریان گالوانیک بین کالکوپیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین      |
| بدون هوادهی  | -۳۵۲   | ۸۶/۵۴  |
| نیتروژن      | -۵۶۹   | ۳۳/۹۸  |
| هوا          | -۱۹۳   | ۱۳۹/۲۳   |
| اکسیژن       | -۱۸۹   | ۲۷۱/۲۶   |
| شرایط هوادهی | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین کالکوپیریت و گلوله فولادی با کربن کروم بالا) | دانسیته جریان گالوانیک بین کالکوپیریت و گلوله فولادی حاوی کربن کروم بالا |
| بدون هوادهی  | -۵۵۲   | ۷۱/۴۸  |
| نیتروژن      | -۵۵۶   | ۱۵/۷۳  |
| هوا          | -۳۶۲   | ۱۰۱/۲۷   |
| اکسیژن       | -۱۹۰   | ۱۷۰/۵۶   |

همچنین از نتایج شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸) و جدول (۳-۵) می‌توان بیان کرد که گلوله‌های فولادی نسبت به کانی‌های پیریت و کالکوپیریت آندیک هستند و بنابراین الکترون‌ها از گلوله‌ها به کانی‌ها جریان می‌یابد. بنابراین هنگامی که کانی و گلوله به طور الکتروشیمیایی در تماس هستند، پیریت و کالکوپیریت با پتانسیل استراحت بالاتر به عنوان کاتد و گلوله‌های فولادی به عنوان آند عمل می‌کنند. مدل برهم‌کنش گالوانیکی ارائه شده توسط آدام و همکاران (Adam et al., 1984) بین یک کانی سولفیدی و بار خردکننده (شکل (۲-۳)) و مدل برهم‌کنش گالوانیکی ارائه شده توسط پوزو و

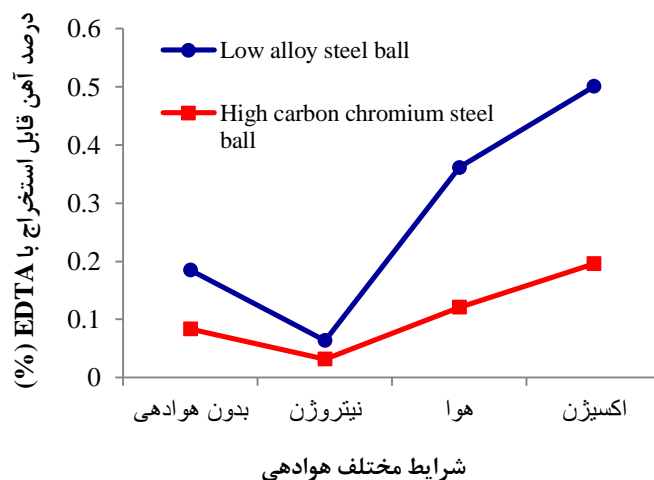
ایواساکی (Pozzo and Iwasaki, 1989) بین دو کانی سولفیدی و بار خردکننده (شکل (۲-۵)) در طول خردایش تفسیری دیگر بر نتایج فوق می‌باشند. مطابق مدل الکتروشیمیایی پوزو و ایواساکی (۱۹۸۹) در خردایش کانه مس سولفیدی (شامل پیریت و کالکوپیریت به عنوان دو کانی اصلی) با گلوله‌های فولادی، الکتروود پیریت با پتانسیل استراحت مثبت‌تر مطابق جدول (۴-۵) نوبل‌ترین الکتروود بوده و به عنوان کاتد و الکتروود گلوله‌ها همیشه به عنوان آند عمل می‌کند. کالکوپیریت با توجه به پتانسیل استراحت آن که پایین‌تر از پیریت و بالاتر از گلوله می‌باشد به عنوان آند حد واسط عمل می‌کند. تحت این شرایط واکنش‌های الکتروشیمیایی مختلفی ممکن است روی سطح کانی‌ها و گلوله‌ها رخ دهد (فصل سوم، واکنش‌های (۳-۱) تا (۳-۶)) و یون‌های فرو در نتیجه اکسایش آندیک گلوله فولادی و کاهش کاتدیک هم‌زمان اکسیژن محلول، در پالپ آزاد شوند.

جدول (۴-۵): پتانسیل استراحت کانی‌های سولفیدی و گلوله‌های فولادی در pH طبیعی (Cheng and Iwasaki, 1992; Peng et al., 2003b)

| پتانسیل استراحت نسبت به SHE (mV) |      |        | محلول                             | کانی یا بار خردکننده |
|----------------------------------|------|--------|-----------------------------------|----------------------|
| اکسیژن                           | هوا  | نیترژن |                                   |                      |
| ۲۱۸                              | ۱۷۲  | ۱۴۲    | آب مقطر                           | گالن                 |
| ۹۵                               |      | ۴۵     | ۰/۵ مول بر لیتر NaCl در pH = ۱۰/۵ |                      |
| ۴۸۵                              | ۴۴۵  | ۴۰۵    | آب مقطر                           | پیریت                |
| ۹۵                               |      | ۴۵     | ۰/۰۰۱ مول بر لیتر $Na_2SO_4$      |                      |
| ۲۹۵                              | ۲۶۲  | ۱۲۵    | آب مقطر                           | پیروتیت              |
| ۳۲۳                              | ۳۰۳  | ۲۷۷    | آب مقطر                           | آرسنوپیریت           |
| ۳۷۱                              | ۳۵۵  | ۱۹۰    | آب مقطر                           | کالکوپیریت           |
| ۲۶۵                              |      | ۱۱۵    | ۰/۰۵ مول بر لیتر $Na_2SO_4$       |                      |
| ۱۱۵                              |      | ۶۵     | ۰/۵ مول بر لیتر NaCl در pH = ۱۰/۵ |                      |
| ۶۰                               |      | ۳۰     | ۰/۵ مول بر لیتر NaCl در pH = ۱۰/۵ | اسفالریت             |
| -۱۷۵                             | -۳۳۵ | -۵۱۵   | آب مقطر                           | گلوله فولادی نرم     |
|                                  |      | -۳۹۵   | ۰/۵ مول بر لیتر NaCl              |                      |
| -۲۰۵                             |      | -۲۵۵   | ۰/۵ مول بر لیتر NaCl              | گلوله فولادی فرونیکل |



جریان الکترون‌ها از گلوله فولادی به کانی‌های سولفیدی، اکسایش گلوله‌ها را در طول خردایش افزایش می‌دهد (Natarjan et al, 1984) و منجر به تولید انواع آهن اکسیدی در پالپ داخل آسیا می‌شود. از طرفی پذیرفته شده است که برای تخمین میزان انواع آهن اکسیدی از تکنیک استخراج EDTA استفاده می‌شود. در واقع تکنیک استفاده از EDTA به عنوان یک معیار برای اندازه‌گیری خوردگی سیستم می‌باشد. هرچند یک اندازه‌گیری دقیق نیست، اما می‌تواند اطلاعات خوبی بدهد. میزان انواع آهن اکسیدی تولید شده در تخلیه آسیا از کانی‌ها و گلوله‌های فولادی، تحت شرایط مختلف هوادهی بوسیله روش استخراج با EDTA بدست آمد که در شکل (۹-۵) نشان داده شده است. شکل (۹-۵) نشان می‌دهد که گلوله فولادی با آلیاژ پایین تحت اکسیژن‌دهی بالاترین میزان آهن قابل استخراج بوسیله EDTA را در پالپ آسیا دارد در حالی که گلوله فولادی کربن و کروم بالا تحت اتمسفر نیتروژن منجر به کمترین درصد آهن قابل استخراج می‌شود. بنابراین گلوله‌های فولادی و نوع گاز تزریق شده به سیستم خردایش به شدت درصد آهن قابل استخراج بوسیله EDTA را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

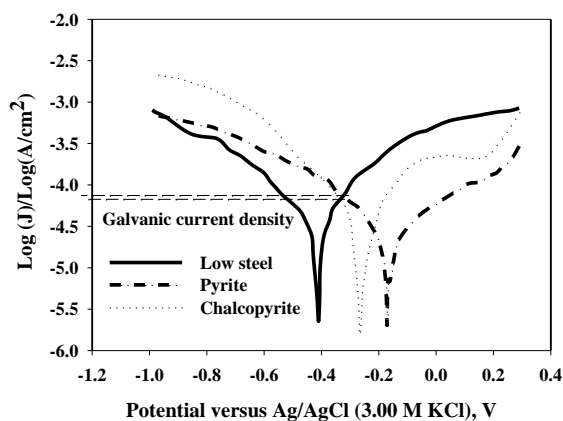


شکل (۹-۵): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA تحت شرایط مختلف هوادهی در خردایش کانه A با گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین (low alloy steel) و کربن و کروم بالا (high carbon chromium steel)

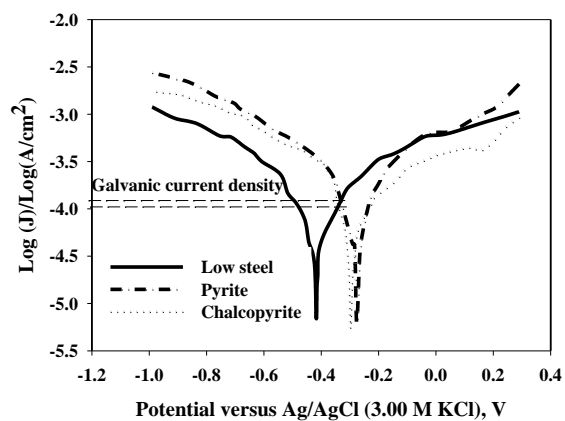
## ۵-۳-۲. نقش pH، درصد جامد، شیمی آب و مینرالوژی کانه در برهم کنش گالوانیکی بین

### کانی‌ها و بار خردکننده

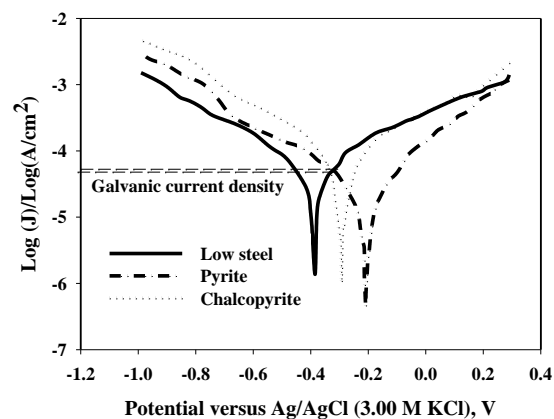
تاثیر pH، درصد جامد، شیمی آب و مینرالوژی کانه در برهم کنش گالوانیکی بین پیریت و کالکوپیریت با گلوله فولادی آلیاژ پایین با بکارگیری تکنیک پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تحت شرایط آزمایشگاهی مختلف بررسی شد، و نتایج حاصل در شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) و جداول (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶) ارائه شده‌اند.



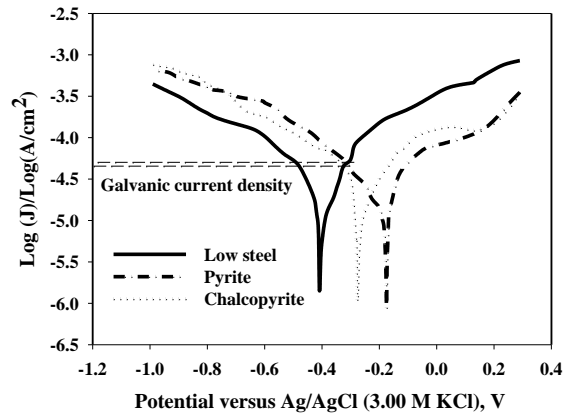
(ب)



(الف)



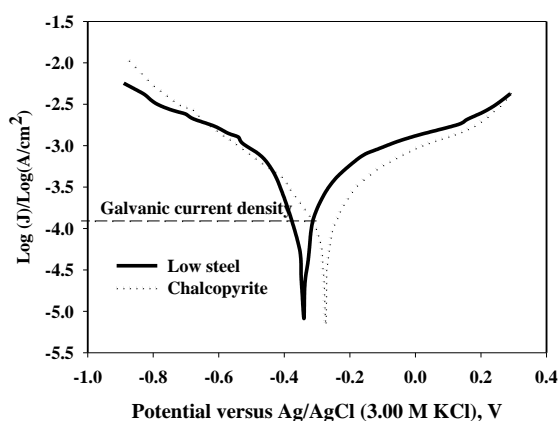
(د)



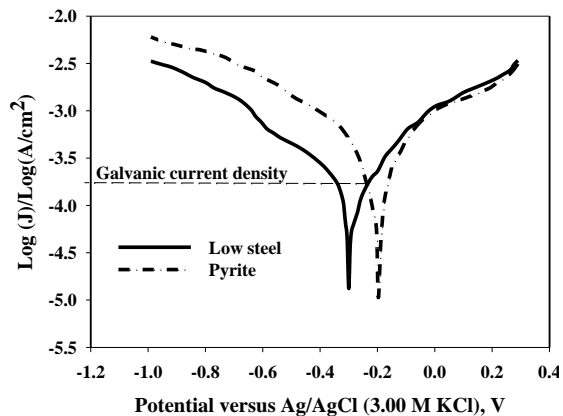
(ج)

شکل (۵-۱۰): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانه B با گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (الف)،  $10/5 - pH=10$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (ب)،  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۵۵٪ و آب مورد استفاده: آب معمولی (ج) و  $pH=7-7/5$ ، درصد جامد ۳۵٪ و آب مورد استفاده: آب مقطر (د) با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه

شکل (۵-۱۰) منحنی‌های پلاریزاسیون گلوله فولادی با آلیاژ پایین، پیریت و کالکوپیریت را تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی در خردایش کانه مس سولفیدی (کانه B) نشان می‌دهد. در این شکل همه منحنی‌های پلاریزاسیون کانی‌ها، ناحیه‌های فعال و پسیو به راحتی قابل تشخیص می‌باشد (الف، ب و ج)، اما برای حالتی که در خردایش کانه آب مقطر استفاده شد، تنها یک ناحیه غیرفعال بسیار کوچکی برای کالکوپیریت قابل شناسایی است و برای پیریت قابل تشخیص نمی‌باشد (د). منحنی پلاریزاسیون برای گلوله فولادی هم یک ناحیه رویین کوچکی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل (۵-۱۰) نشان می‌دهد که اندازه ناحیه غیرفعال در درصد جامد ۵۵٪ از همه حالت‌ها بزرگتر است.



(ب)



(الف)

شکل (۵-۱۱): منحنی‌های روبشی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک گلوله فولادی، پیریت، کالکوپیریت در طول خردایش کانی‌های خالص پیریت (الف) و کالکوپیریت (ب) با گلوله فولادی آلیاژ پایین در  $\text{pH} = 7-7/5$  و درصد جامد ۳۵٪ با نرخ اسکن ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه

شکل (۵-۱۱) منحنی‌های پلاریزاسیون پیریت، کالکوپیریت و گلوله فولادی با آلیاژ پایین را در طول خردایش کانی‌های خالص پیریت (الف) و کالکوپیریت (ب) نشان می‌دهد. جالب است که تقریباً پدیده غیرفعالی برای پیریت و کالکوپیریت در خردایش کانه خالص مشاهده نمی‌شود.

نتایج شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) یعنی جریان گالوانیک و پتانسیل ترکیبی بین کانی‌ها با گلوله فولادی در جداول (۵-۵) و (۵-۶) آورده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بزرگی اندازه گالوانیک بین کانی‌ها و گلوله را می‌توان مطابق ذیل مرتب کرد:

آزمایش شماره ۶ < آزمایش شماره ۲ < آزمایش شماره ۱ < آزمایش شماره ۳ < آزمایش شماره ۵ <  
 آزمایش شماره ۴

همچنین نتایج دلالت بر آن دارند که برهم‌کنش گالوانیکی بین گلوله‌ها و کانی‌ها (پیریت و کالکوپیریت) بشدت تحت تاثیر pH، درصد جامد، نوع آب و نوع کانه قرار می‌گیرد. از طرفی دیگر همان‌طوری‌که قبلاً ذکر شد پتانسیل پالپ و غلظت اکسیژن محلول به اندازه برهم‌کنش گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی وابسته است. بنابراین این فاکتورها با تاثیر بر اندرکنش‌های گالوانیکی و با تغییر پتانسیل پالپ و غلظت اکسیژن محلول، می‌توانند نرخ اکسایش را در طول فرآیند خردایش تغییر دهند و گونه‌های مختلف آهن اکسیدی را تولید کنند یعنی محصولات خوردگی گلوله‌ها را افزایش دهند. جدول (۵-۷) درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA و شکل (۵-۱۲) ارتباط بین جریان گالوانیک و میزان انواع آهن اکسیدی تولید شده در آسیا را نشان می‌دهند.

جدول (۵-۵): دانسیته جریان گالوانیک و پتانسیل ترکیبی پیریت با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت شرایط مختلف خردایش

| شماره آزمایش | شرایط آزمایش‌های خردایش                              | دانسیته جریان گالوانیک ( $\frac{\mu A}{cm^2}$ ) | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین گلوله و پیریت) (mV) |
|--------------|--|---|---|
| ۱            | کانه A، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪         | ۱۰۷/۱۷  | -۳۴۵  |
| ۲            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪         | ۱۲۲/۳۲  | -۳۳۱  |
| ۳            | کانه B، آب معمولی، pH=۱۰-۱۰/۵ و درصد جامد، ۳۵٪       | ۷۶/۸۱   | -۳۲۴  |
| ۴            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۵۵٪         | ۵۱/۸۹   | -۳۱۸  |
| ۵            | کانه B، آب مقطر، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪           | ۵۴/۸۵   | -۳۲۱  |
| ۶            | کانی خاص پیریت، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪ | ۱۶۶/۶۷  | -۲۳۷  |

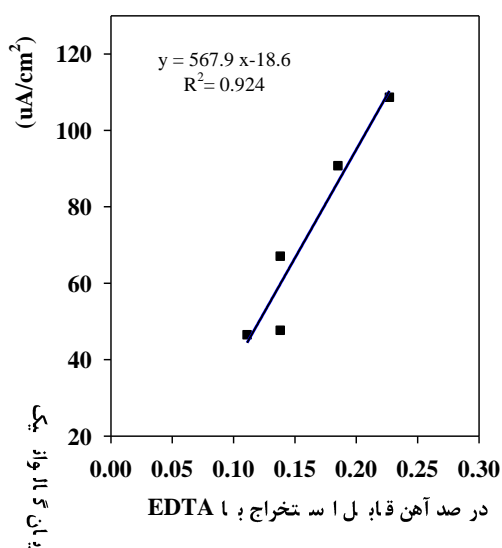
جدول (۵-۶): دانسیته جریان گالوانیک و پتانسیل ترکیبی کالکوپریت با گلوله فولادی آلیاژ پایین تحت شرایط مختلف خردایش

| شماره آزمایش | شرایط آزمایش‌های خردایش                                  | دانسیته جریان گالوانیک ( $\frac{\mu A}{cm^2}$ ) | پتانسیل ترکیبی (پتانسیل بین گلوله و کالکوپریت) (mV) |
|--------------|--|---|---|
| ۱            | کانه A، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪             | ۹۰/۷۷   | -۳۵۹  |
| ۲            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪             | ۱۰۸/۶۷  | -۳۴۲  |
| ۳            | کانه B، آب معمولی، pH=۱۰-۱۰/۵ و درصد جامد، ۳۵٪           | ۶۷/۰۹   | -۳۳۵  |
| ۴            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۵۵٪             | ۴۶/۵۲   | -۳۲۵  |
| ۵            | کانه B، آب مقطر، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪               | ۴۷/۷  | -۳۳۱  |
| ۶            | کانی خاص کالکوپریت، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪ | ۱۲۳/۵۶  | -۳۱۴  |

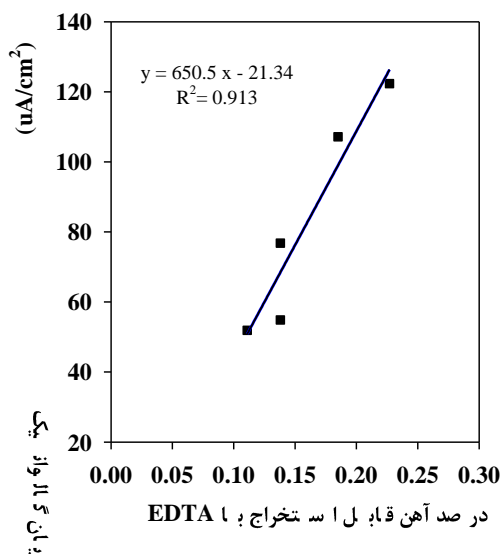
جدول (۵-۷): درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA در تخلیه آسیا تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی در طول خردایش با گلوله فولادی آلیاژ پایین

| شماره آزمایش | شرایط آزمایش‌های خردایش                        | درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج با EDTA |
|--------------|--|--|
| ۱            | کانه A، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪   | ۰/۱۸۵                                      |
| ۲            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪   | ۰/۲۲۷                                      |
| ۳            | کانه B، آب معمولی، pH=۱۰-۱۰/۵ و درصد جامد، ۳۵٪ | ۰/۱۳۸                                      |
| ۴            | کانه B، آب معمولی، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۵۵٪   | ۰/۱۱۱                                      |
| ۵            | کانه B، آب مقطر، pH=۷-۷/۵ و درصد جامد، ۳۵٪     | ۰/۱۳۸                                      |

جدول (۵-۷) نشان می‌دهد، درصد آهن اکسیدی داخل آسیا همانند جریان گالوانیک بین کانی‌ها و گلوله‌ها با افزایش pH و درصد جامد، تغییر نوع آب مورد استفاده در آسیا به آب مقطر و تغییر مینرالوژی کانه به کانه A کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل هیدروکسیدهای آهن می‌باشد که در اثر اکسایش سطح به آسانی تشکیل شده و سطح کانی‌ها و گلوله‌ها را روپین نموده و از اکسایش بیشتر آن‌ها جلوگیری می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل (۵-۱۲): همبستگی میان دانسیته جریان گالوانیک بین پیریت (الف) و کالکوپیریت (ب) با گلوله با درصد انواع آهن اکسیدی قابل استخراج بوسیله EDTA (آهن اکسیدی تولید شده در آسیا)

شکل (۵-۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش برهم کنش گالوانیکی بین کانی‌ها و گلوله‌ها، میزان درصد آهن اکسیدی تخلیه آسیا که معرف محصولات خوردگی است، افزایش می‌یابد. جریان گالوانیک بین کانی‌ها (پیریت و کالکوپیریت) و گلوله فولادی با درصد آهن اکسیدی داخل آسیا معادلات رگرسیون خطی (۴-۵) و (۵-۵) مرتبط می‌شود.

$$y = 650.5x - 21.34, R^2 = 0.913 \quad (۴-۵)$$

$$y = 567.9x - 18.6, R^2 = 0.924 \quad (۵-۵)$$

که  $x$  درصد آهن قابل استخراج بوسیله EDTA (آهن اکسیدی داخل آسیا) و  $y$  در معادله (۴-۵)، (دانسیته) جریان گالوانیک بین پیریت و گلوله و در معادله (۵-۴)، جریان گالوانیک بین کالکوپیریت و گلوله می‌باشد.

## فصل ششم:

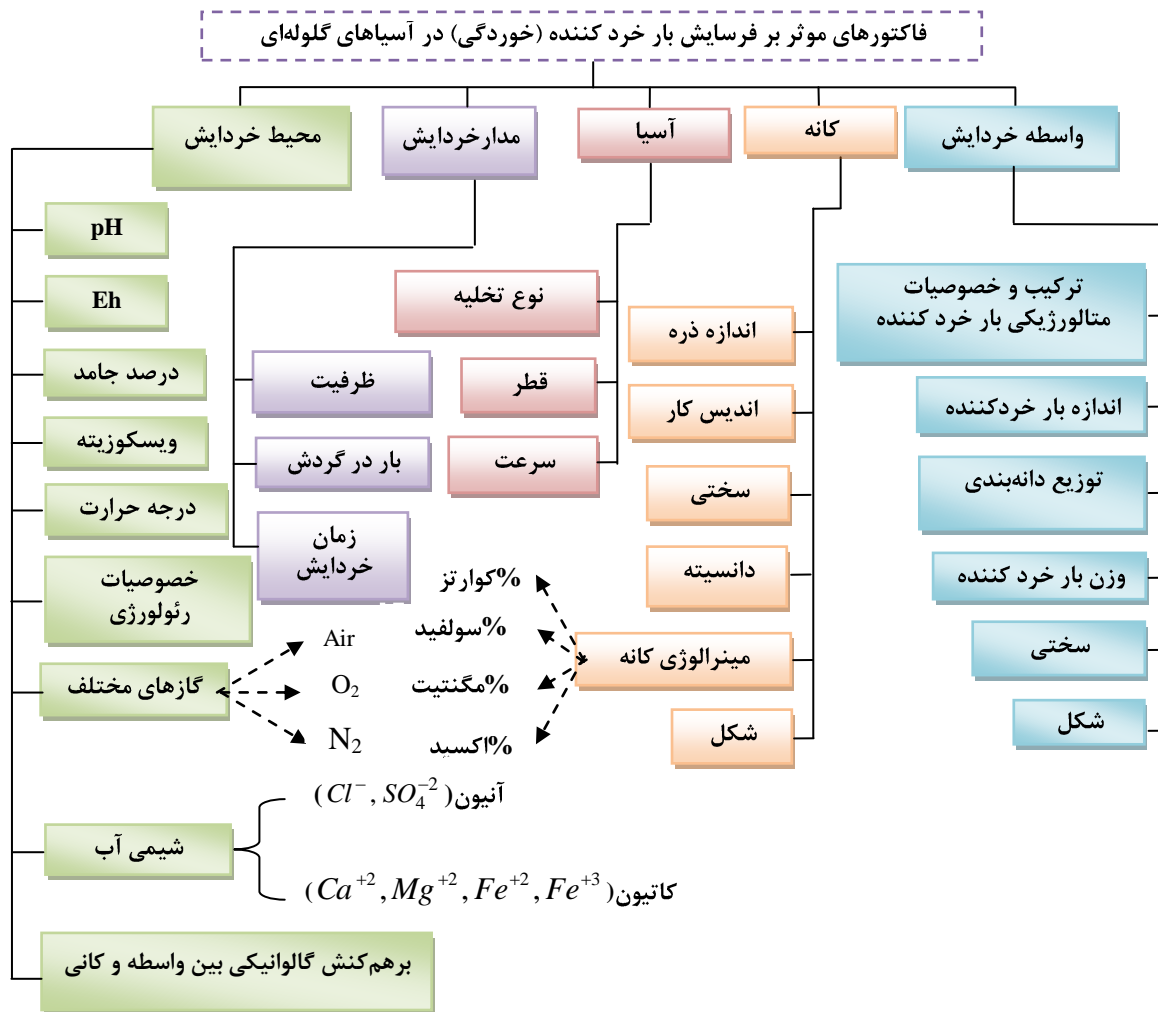
ارزیابی فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از

خوردگی گلوله‌های فولادی

خوردگی یکی از مکانیزم‌های اصلی فرسایش بار خردکننده در آسیاها می‌باشد که هزینه‌های زیادی را به واحد خردایش (آسیاکنی) تحمیل می‌کند. موضوع فرسایش حاصل از خوردگی، بویژه زمانی که خردایش یک کانه سولفیدی مطرح می‌باشد، اهمیت آن را بیشتر می‌کند. زیرا کانی‌های سولفیدی نیمه رسانا بوده و در طول خردایش، وقتی که تماس میان کانی‌ها و واسطه خردایش (گلوله‌های فولادی) رخ می‌دهد، سبب می‌شود تا گلوله‌های فولادی در محیط پالپ داخل آسیا به عنوان آند عمل کرده و الکترون‌ها از واسطه به طرف کانی‌ها جریان یابند، در نتیجه گلوله‌های فولادی با نرخ سریع‌تری زنگ زده و یا به اصطلاح خورده می‌شوند. فاکتورهای بسیار زیادی در فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی تاثیر دارند که در این ارتباط ۲۷ فاکتور مهم موثر بر خوردگی شناسایی شدند که می‌توان آن‌ها را به ۵ گروه پارامترهای مربوط به واسطه خردایش، کانه، آسیا، مدار خردایش و محیط خردایش دسته‌بندی کرد که در شکل (۶-۱) ارائه شده‌اند (Dun, 1985 Iwasaki et al., 1985, 1987, Orlich and Iwasaki, 1987; Moore et al., 1988; Meulendyke and Purdue, 1989; Yelloji, Rao and Natarajan, 1990; Natarajan, 1996; Chenje et al., 2003, 2004; Tao and Parekh, 2004; Huang, 2005; Bruckard et al., 2011). در این فصل ابتدا این فاکتورها با استفاده از نظر کارشناسان و متخصصان و با بکارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)<sup>۱</sup>، به طور کیفی مورد ارزیابی قرار گرفت و تاثیر و اهمیت نسبی این فاکتورها نسبت به هم و به طور کیفی بدست آمد. سپس از بین این فاکتورهای مهم، مهمترین فاکتورها که قابل کنترل تحت شرایط عملیاتی بودند، انتخاب شدند و به طور کمی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

<sup>۱</sup> - Fuzzy analytical hierarchy Delphi method





شکل (۶-۱): فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی بار خرد کننده (گلوله‌های فولادی) در آسیاها

## ۲-۶. ارزیابی فاکتورهای موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی با استفاده از نظر کارشناسان و

### روش دلفی فازی

#### ۲-۶-۱. روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی

در دهه ۱۹۵۰ میلادی طرحی در نیروی هوایی آمریکا به سرپرستی دالکی<sup>۱</sup> از شرکت رند<sup>۲</sup>، به منظور بررسی نظرهای خبرگان در مورد اینکه چند بمب اتمی روسیه موجب خسارت معینی در آمریکا می-شود، مشهور به پروژه دلفی<sup>۳</sup> گردید و از آنجا روشی موسوم به روش دلفی برای بررسی قضاوت

<sup>۱</sup>- Dalkey

<sup>۲</sup>- RAND

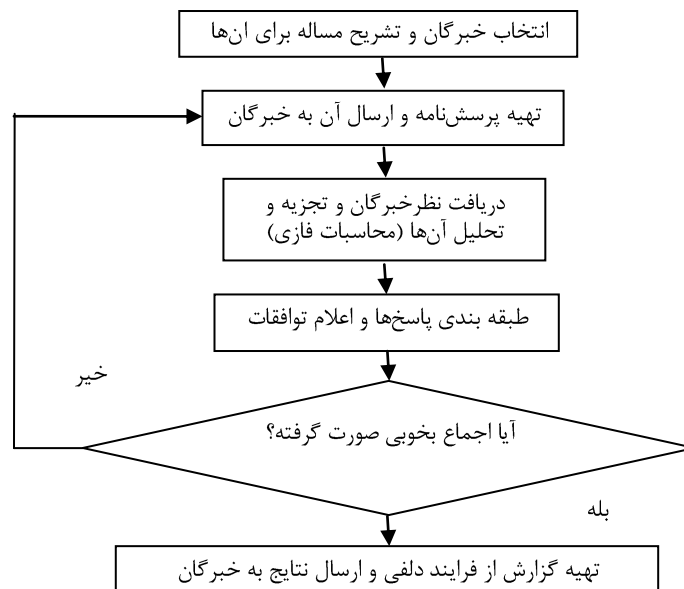
<sup>۳</sup>- Delphi

خبرگان به وجود آمد (Dalkey et al., 1963). هدف این روش، دسترسی به مطمئن‌ترین توافق گروهی خبرگان در مورد موضوعی خاص است که با استفاده از پرسش‌نامه و نظرخواهی از خبرگان، به دفعات، با توجه به بازخورد حاصل از آن‌ها صورت می‌پذیرد. در واقع این روش بررسی کاملی بر عقاید خبرگان، با سه ویژگی اصلی: پاسخ بیطرفانه به سوالات (پرسش‌نامه)، تکرار دفعات ارسال سوالات و دریافت بازخورد از آن‌ها، و تجزیه و تحلیل آماری از پاسخ به سوالات به صورت گروهی است.

در روش دلفی، داده‌های ذهنی افراد خبره با استفاده از تحلیل‌های آماری به داده‌های عینی تبدیل می‌شود. این روش منجر به اجماع در تصمیم‌گیری می‌گردد. این روش در زمینه‌های متعدد پیش‌بینی و تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است (آذر و فرجی، ۱۳۸۱). اعتبار روش دلفی نه به تعداد شرکت‌کنندگان در تحقیق که به اعتبار علمی متخصصان شرکت‌کننده در پژوهش بستگی دارد. شرکت‌کنندگان در تحقیق دلفی از ۵ تا ۲۰ نفر را شامل می‌شوند. یکی از معایب روش سنتی دلفی، همگرایی پایین نظرات متخصصان، هزینه اجرای بالا و احتمال حذف نظرات برخی از افراد بوده است. مورای و همکاران برای بهبود روش دلفی سنتی مفهوم یکپارچه‌سازی روش دلفی سنتی با تئوری فازی را در سال ۱۹۸۵ ارائه دادند (Murray, 1985). ایشیکاوا و همکاران کاربرد تئوری فازی را در روش دلفی بیشتر معرفی کردند و الگوریتم یکپارچه‌سازی فازی را برای پیش‌بینی نفوذ کامپیوترها در آینده توسعه دادند (Ishikawa et al., 1993). کاربرد این روش به منظور تصمیم‌گیری و اجماع بر مسائلی که اهداف و پارامترها به صراحت مشخص نیستند، منجر به نتایج بسیار ارزنده‌ای می‌شود. ویژگی این روش، ارائه چارچوبی انعطاف‌پذیر است که بسیاری از موانع مربوط به عدم دقت و صراحت را تحت پوشش قرار می‌دهد. بسیاری از مشکلات در تصمیم‌گیری‌ها مربوط به اطلاعات ناقص و غیردقیق است. همچنین تصمیم‌های اتخاذ شده‌ی خبرگان بر اساس صلاحیت فردی آنان بوده و به شدت ذهنی است. بنابراین بهتر است داده‌ها به جای اعداد قطعی با اعداد فازی نمایش داده شوند و از مجموعه‌های فازی برای تحلیل نظرات خبرگان استفاده گردد. مراحل اجرایی روش دلفی در واقع ترکیبی از اجرای روش دلفی و انجام تحلیل‌ها بر روی اطلاعات با استفاده از تعاریف نظریه مجموعه-

های فازی است. معمولاً خبرگان نظرات خود را در قالب حداقل مقدار، ممکن‌ترین مقدار (اعداد فازی مثلثی) ارائه می‌دهند. سپس میانگین نظر خبرگان (اعداد ارائه شده) و میزان اختلاف نظر هر فرد خبره از میانگین جمع محاسبه می‌شود، آنگاه این اطلاعات برای اخذ نظرات جدید به خبرگان ارسال می‌شود. در مرحله بعد هر فرد خبره بر اساس اطلاعات حاصل از مرحله قبل، نظر جدیدی را ارائه می‌دهد یا نظر قبلی خود را اصلاح می‌کند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که میانگین اعداد فازی به اندازه کافی با ثبات شود. الگوریتم اجرای روش دلفی فازی در شکل (۶-۲) نمایش داده شده است.

در مطالعه حاضر از روش دلفی فازی پیشنهادی ایشیکاوا و همکاران استفاده شد (Ishikawa et al., 1993).



شکل (۶-۲): مراحل اجرای روش دلفی فازی (آذر و فرجی، ۱۳۸۱)

مراحل اجرای روش دلفی فازی به شرح زیر است:

مرحله اول، نظر سنجی از متخصصان: در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای موثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظر سنجی به عمل می‌آید.

مرحله دوم، محاسبه اعداد فازی: برای محاسبه اعداد فازی  $(\tilde{\alpha}_{ij})$  نظرهای حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی را می‌توان براساس توابع عضویت

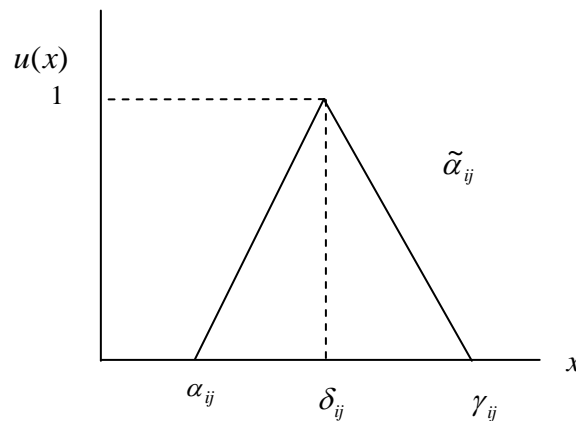
مختلف از قبیل روش مثلثی و یا حالت دوزنقه‌ای محاسبه کرد. با توجه به سهولت و کاربرد زیاد، روش مثلثی برای محاسبه اعداد فازی استفاده شد. شکل (۳-۶) تابع عضویت مثلثی در روش دلفی فازی را نشان می‌دهد. اعداد فازی روی شکل به صورت زیر تعریف می‌شوند (Chen and Liu, 2007):

$$\tilde{\alpha}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (1-6)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, 2, \dots, n \quad (2-6)$$

$$\delta_{ij} = \left( \prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3-6)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, 2, \dots, n \quad (4-6)$$



شکل (۳-۶): تابع عضویت مثلثی در روش دلفی فازی (Chen and Liu, 2007)

در روابط فوق مولفه‌های فازی به گونه‌ای تعریف شدند که  $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}, \alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in \left[ \frac{1}{9}, 1 \right] \cup [1, 9]$ . در این روابط  $\beta_{ijk}$  اهمیت نسبی پارامتر  $i$  بر پارامتر  $j$  از دیدگاه متخصص  $k$  ام،  $\alpha_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$  و  $n$  به ترتیب حد بالا و پایین نظرات متخصصان، میانگین هندسی نظرات و تعداد متخصصان می‌باشد. مرحله سوم، تشکیل ماتریس معکوس فازی: در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف به شرح رابطه زیر تشکیل می‌شود.

$$\tilde{A} = [\tilde{\alpha}_{ij}], \tilde{\alpha}_{ij} \times \tilde{\alpha}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5-6)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (\frac{1}{\gamma_{12}}, \frac{1}{\delta_{12}}, \frac{1}{\alpha_{12}}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (\frac{1}{\gamma_{13}}, \frac{1}{\delta_{13}}, \frac{1}{\alpha_{13}}) & (\frac{1}{\gamma_{23}}, \frac{1}{\delta_{23}}, \frac{1}{\alpha_{23}}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

مرحله چهارم، تعیین وزن فازی نسبی پارامترها: وزن فازی نسبی پارامترها از روابط زیر محاسبه می-شوند:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{\alpha}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{\alpha}_{in}]^{1/n} \quad (6-6)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (7-6)$$

که در آن  $\tilde{\alpha}_1 \otimes \tilde{\alpha}_1 \equiv (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$  بوده و  $\otimes$  نماد ضرب فازی و  $\oplus$  نماد جمع اعداد فازی است.  $\tilde{Z}_i$  میانگین هندسی اعداد فازی مثلثی و  $\tilde{W}_i$  یک بردار سطری است که نشان دهنده وزن فازی پارامتر  $i$  ام می باشد ( $\tilde{W}_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), i = 1, 2, \dots, n$ ).

مرحله پنجم، غیر فازی کردن وزن پارامترها: در این مرحله به منظور غیر فازی کردن وزن پارامترها، میانگین هندسی مولفه‌های عدد فازی وزن پارامترها مطابق فرمول زیر به دست می‌آید و وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند (Chen and Liu, 2007):

$$W_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_{ij})^{1/3} \quad (8-6)$$

## ۲-۲-۶. ارزیابی فاکتورهای موثر با استفاده از روش دلفی فازی

در مطالعه حاضر به منظور تعیین وزن فاکتورهای موثر، فرم‌های نظر سنجی شامل کلیه فاکتورهای موثر بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی تهیه و برای کارشناسان ارسال شد. از هر متخصص خواسته شد تا بسته به نظر شخصی خویش و میزان اهمیت هر یک از پارامترها را براساس مقیاس مقایسه زوجی Saaty (جدول ۱-۶)، اختصاص دهند. متخصصان و کارشناسان مورد استفاده در این تحقیق،

بسیار با تجربه و از صاحب نظران در این زمینه (هم از لحاظ آکادمیک و هم از نظر صنعتی) بوده‌اند. امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان در جدول (۶-۲) آورده شده است. در مرحله بعد مطابق مراحل اجرای روش فازی ابتدا براساس ارزیابی نظرات متخصصان ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها، جداگانه برای هر متخصص تشکیل و با استفاده از تابع عضویت مثلثی و اعداد فازی مثلثی مطابق روابط ریاضی (۶-۱) تا (۶-۴)، ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین پارامترها برای هر متخصص تعیین شد. سپس، عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی ( $\tilde{W}_i$ ) و وزن غیر فازی پارامترها ( $W_i$ ) به ازای پارامترهای مختلف به ترتیب با استفاده از روابط (۶-۶)، (۶-۷) و (۶-۸) محاسبه شدند. در نهایت نتایج حاصل از ارزیابی اهمیت نسبی فاکتورها بدست آمد که در شکل (۶-۴) ارائه شده است. جداول ماتریس مقایسه زوجی (به عنوان مثال برای متخصص اول)، ماتریس مقایسه فازی برای اهمیت نسبی فاکتورها (به عنوان مثال برای ۶ فاکتور)، عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی ( $\tilde{W}_i$ ) و وزن غیر فازی پارامترها ( $W_i$ ) و نحوه محاسبات در پیوست (الف) آورده شده‌اند.

جدول (۶-۱): طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (Saaty, 1980)

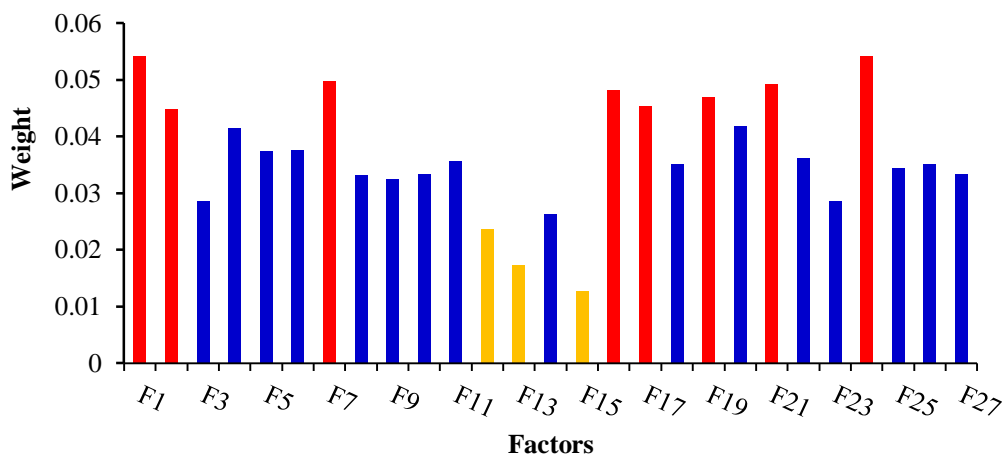
| مقایسه نسبی شاخص‌ها ( قضاوت شفاهی) | امتیاز عددی |
|------------------------------------|-------------|
| اهمیت مطلق                         | ۹           |
| اهمیت خیلی قوی                     | ۷           |
| اهمیت قوی                          | ۵           |
| اهمیت ضعیف                         | ۳           |
| اهمیت یکسان                        | ۱           |
| ترجیحات بین فواصل فوق              | ۲، ۴، ۶ و ۸ |

نتایج حاصل از وزن‌دهی متخصصین به پارامترها، نشان می‌دهد که به ترتیب ترکیب و خصوصیات متالورژیکی بار خردکننده، برهم کنش گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی، مینرالوژی کانه، شیمی آب، pH، Eh، درصد جامد، اندازه واسطه خردایش و شرایط مختلف هوادهی به آسیا بیشترین تاثیر را در فرسایش خوردگی دارند، ولی نوع تخلیه، قطر آسیا و شکل ذرات از درجه اهمیت کمتری بر

فرسایش خوردگی دارند (شکل (۴-۶)). البته قابل ذکر است که همه این فاکتورها در فرسایش حاصل از خوردگی تاثیر دارند، اما تاثیر و اهمیت برخی از پارامترها از دیگر پارامترها بیشتر است.

جدول (۲-۶): اهمیت وزن فاکتورها توسط متخصصین ( $E_i, i = 1, 2, \dots, 5$ )

| نظرات متخصصین       |                     |                     |                     |                     | علامت فاکتورها  | فاکتورها                            |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|
| متخصص اول ( $E_5$ ) | متخصص اول ( $E_4$ ) | متخصص اول ( $E_3$ ) | متخصص اول ( $E_2$ ) | متخصص اول ( $E_1$ ) |                 |                                     |
| ۹                   | ۹                   | ۹                   | ۹                   | ۹                   | F <sub>1</sub>  | ترکیبها و خصوصیات متالورژیکی گلوله  |
| ۷                   | ۷                   | ۹                   | ۷                   | ۷                   | F <sub>2</sub>  | اندازه بار گلوله فولادی             |
| ۷                   | ۳                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>3</sub>  | توزیع دانه بندی بار گلوله فولادی    |
| ۹                   | ۵                   | ۷                   | ۷                   | ۷                   | F <sub>4</sub>  | سختی گلوله فولادی                   |
| ۷                   | ۷                   | ۷                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>5</sub>  | شکل گلوله فولادی                    |
| ۷                   | ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>6</sub>  | وزن بار گلوله های فولادی            |
| ۹                   | ۹                   | ۷                   | ۷                   | ۹                   | F <sub>7</sub>  | مینرالوژی کانه                      |
| ۵                   | ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>8</sub>  | اندیس کار                           |
| ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>9</sub>  | سختی کانه                           |
| ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>10</sub> | دانسیته کانه                        |
| ۷                   | ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>11</sub> | اندازه ذرات                         |
| ۳                   | ۳                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>12</sub> | شکل ذرات                            |
| ۱                   | ۳                   | ۵                   | ۷                   | ۵                   | F <sub>13</sub> | قطر آسیا                            |
| ۷                   | ۳                   | ۳                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>14</sub> | سرعت آسیا                           |
| ۳                   | ۱                   | ۳                   | ۳                   | ۳                   | F <sub>15</sub> | نوع تخلیه آسیا                      |
| ۷                   | ۷                   | ۹                   | ۹                   | ۹                   | F <sub>16</sub> | pH پالپ                             |
| ۹                   | ۷                   | ۷                   | ۷                   | ۷                   | F <sub>17</sub> | درصد جامد پالپ                      |
| ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>18</sub> | ویسکوزیته                           |
| ۷                   | ۹                   | ۹                   | ۷                   | ۷                   | F <sub>19</sub> | Eh پالپ                             |
| ۹                   | ۷                   | ۷                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>20</sub> | گازهای خالص                         |
| ۹                   | ۷                   | ۷                   | ۹                   | ۹                   | F <sub>21</sub> | شیمی آب                             |
| ۵                   | ۷                   | ۷                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>22</sub> | درجه حرارت                          |
| ۳                   | ۵                   | ۷                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>23</sub> | خصوصیات رئولوژی پالپ                |
| ۹                   | ۹                   | ۹                   | ۹                   | ۹                   | F <sub>24</sub> | برهم کنش گالوانیکی بین گلوله و کانی |
| ۵                   | ۵                   | ۷                   | ۷                   | ۵                   | F <sub>25</sub> | ظرفیت                               |
| ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۷                   | F <sub>26</sub> | بار در گردش                         |
| ۷                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | ۵                   | F <sub>27</sub> | زمان خردایش                         |



شکل (۴-۶): دیاگرام شماتیک از ترتیب اهمیت فاکتورهای موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی در آسیاها

در بررسی نظرات از کارشناسان خواسته شد تا علاوه بر درجه اهمیت فاکتورها در خوردگی بار خردکننده از نقطه نظر تکنیکی نیز درباره تاثیر پارامترها دیدگاه‌های خود را مطرح کنند که نتایج این بررسی و همچنین مطالعات پیشین موارد ذیل را نشان می‌دهد.

(۱) ترکیب و خصوصیات متالورژیکی بار خرد کننده (انتخاب خوب مواد) و مینرالوژی کانه اثرات خوردگی را روی بار خردکننده کاهش می‌دهد.

(۲) با کنترل شیمی پالپ بعبارتی وضعیت الکتروشیمی داخل آسیا یعنی pH، Eh، شیمی آب، ویسکوزیته، برهم کنش گالوانیکی بین کانی و واسطه (بارخردکننده)، خصوصیات رئولوژی پالپ، درصد جامد و گازهای مختلف می‌توان نرخ خوردگی را کنترل کرد. شیمی پالپ داخل آسیا یک فاکتور بحرانی در فرسایش بار خرد کننده بویژه خوردگی بار خرد کننده می‌باشد.

(۳) گلوله‌هایی با چگالی بالا بهترین نتایج را در آسیاهای گلوله‌ای به همراه خواهند داشت و موادی با گرانی بالا نیازمند گلوله‌هایی با دانسیته بالاتر هستند تا از شناوری آن‌ها جلوگیری شود.

(۴) گلوله‌های سخت‌تر عملکرد بهتر و متعاقباً مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارند..

(۵) گلوله‌های آسیا که برای خرد کردن نهایی ذرات استفاده می‌شوند، اگر دارای اندازه کوچکتری باشند، در ایجاد ذرات فوق العاده ریز مورد نظر بسیار موثر هستند.



(۶) نوع تخلیه آسیا از سرریز (overflow) به شبکه‌ای (grate) فرسایش بار خرد کننده را افزایش می‌دهد.

(۷) افزایش قطر و سرعت آسیا سایش گلوله‌ها را بیشتر افزایش می‌دهد.

(۸) افزایش درجه حرارت در مرحله اول نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد، اما در درجه حرارت‌های بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش نرخ خوردگی می‌شود.

### ۳-۶. بررسی تاثیر فاکتورهای مهم قابل کنترل بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی

با توجه به انجام ارزیابی کیفی فاکتورهای موثر بر فرسایش خوردگی گلوله‌های فولادی و تعیین اهمیت نسبی پارامترها نسبت به هم، ۱۱ فاکتور مهم و موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی (pH، درصد جامد، نوع هوادهی به سیستم خردایش، نوع آب، ظرفیت، زمان خردایش، سرعت گردش آسیا، اندازه ذرات، نوع گلوله، توزیع دانه بندی گلوله و شارژ گلوله) که قابل کنترل در آزمایشگاه بودند، انتخاب و به طور کمی مورد بررسی قرار گرفتند. شرایط آزمایش‌های خردایش برای بررسی تاثیر فاکتورهای مهم بر روی میزان خوردگی گلوله‌های فولادی به گونه‌ای بود که یک فاکتور در چند سطح یا مقدار تغییر داده می‌شد، در حالی که بقیه‌ی فاکتورها ثابت بودند. جدول (۳-۶) شرایط مختلف آزمایش‌های خردایش و مقادیر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (LS) و کربن و کروم بالا (HS) را که از روش بیان شده در فصل ۴ (منحنی‌های پلاریزاسیون و معادله (۴-۱)) بدست آمدند، نشان می‌دهد.

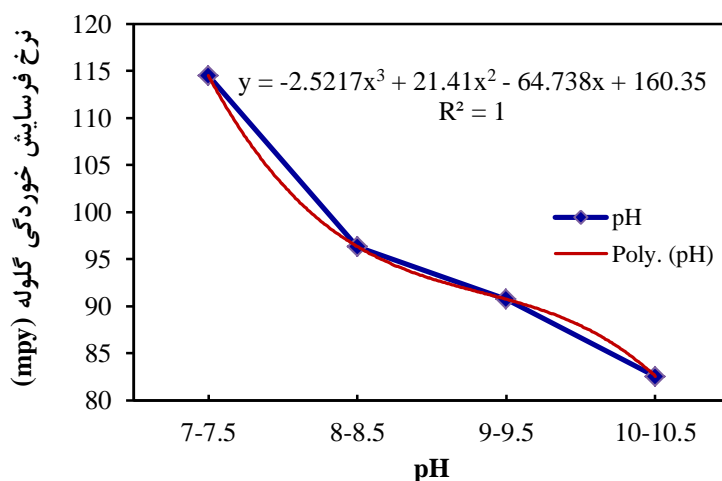
جدول (۳-۶): شرایط مختلف آزمایش‌های خریدایش به همراه مقادیر نرخ خوردگی محاسبه شده

| فاکتورها         |                 |                              |           |                                  |                 |                 |           |        |          |               |         |
|------------------|-----------------|------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|--------|----------|---------------|---------|
| نرخ خوردگی (mpy) | شارژ گلوله (kg) | توزیع دانه‌بندی گلوله (اینچ) | نوع گلوله | محدوده‌ی دانه‌بندی ذرات (میکرون) | سرعت آسیا (rpm) | زمان آسیا (min) | ظرفیت (g) | نوع آب | نوع گاز  | درصد جامد (%) | pH      |
| ۱۱۴/۵            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   |           | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۶/۳۴            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۸-۸/۵   |
| ۹۰/۷۴            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۹-۹/۵   |
| ۸۲/۵۷            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۱۰-۱۰/۵ |
| ۱۳۰/۲۶           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۰            | ۷-۷/۵   |
| ۹۷/۴۳            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۴۰            | ۷-۷/۵   |
| ۸۹/۲۹            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۴۵            | ۷-۷/۵   |
| ۸۲/۷۶            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۵۰            | ۷-۷/۵   |
| ۷۳/۳۷            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۵۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۹۱/۷۸           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | اکسیژن   | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۵۲/۳۴           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | هوا      | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۵۷/۵۲            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | نیتروژن  | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۶۷/۷۹            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | مقطر     | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۰۸/۱            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۷۳۰       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۶/۱۲            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۱۴۶۰      | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۳/۹۱            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۷/۵             | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۰۰/۰۹           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۰              | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۱۸/۸            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۵              | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۲۶/۴۱           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۷/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۱/۵۸            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۶۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۸/۵۶            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۰              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۱۹/۱۳           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۸۰              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۲۹/۹۳           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۸۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۸/۲۹            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۰۷/۸۵           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۸۵۰+۴۲۰                         | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۱۱/۶۴           | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۴۲۰+۲۵۰                         | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۶۸/۳۷            | ۸               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | HS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۳۰/۸۶           | ۸               | ۱،۰/۵                        | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۹۶/۱۲            | ۸               | ۱،۰/۷۵                       | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۰۳/۲۱           | ۶               | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۲۸/۱۸           | ۱۰              | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۳۳/۶            | ۱۲              | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۳۵/۱۱           | ۱۴              | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۲۷/۵۶           | ۱۶              | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |
| ۱۱۵/۴۸           | ۱۸              | ۱،۰/۷۵،۰/۵                   | LS        | -۲۰۰۰+۲۵۰                        | ۷۵              | ۱۲/۵            | ۳۶۵       | معمولی | بدون گاز | ۳۵            | ۷-۷/۵   |

### ۶-۳-۱. تاثیر pH پالپ

تاثیر pH پالپ بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نرخ خوردگی بشدت تحت تاثیر pH پالپ داخل آسیا قرار می‌گیرد و pH های بالاتر منجر به نرخ خوردگی کمتر می‌شوند. این امر ممکن است بدان علت باشد که در مقادیر بالای pH، نمک آهن ترسیب شده و یک لایه پسیو از آهن تشکیل می‌گردد که از خوردگی بیشتر جلوگیری می‌کند. ضمناً شکل (۵-۶) نشان می‌دهد که نرخ خوردگی گلوله‌ها (Y) را می‌توان به صورت تابعی از pH پالپ (x) مطابق معادله رگرسیون زیر نشان داد:

$$Y = -2.521x^3 + 21.41x^2 - 64.73x + 160.3 \leftrightarrow R^2 = 1 \quad (۹-۶)$$



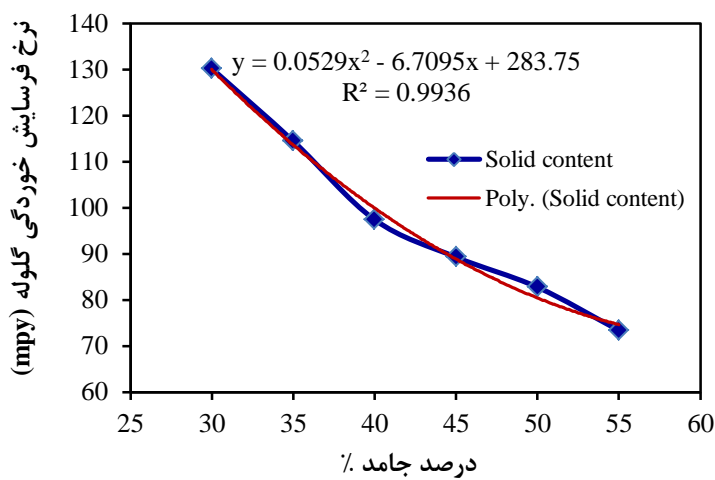
شکل (۵-۶): تاثیر pH پالپ داخل آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

### ۶-۳-۲. تاثیر درصد جامد پالپ

تاثیر درصد جامد پالپ داخل آسیا بر نرخ فرسایش خوردگی گلوله‌ها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت جامد گلاب داخل آسیا، نرخ خوردگی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل (۶-۶)). به عنوان مثال، نرخ خوردگی در درصد جامد ۳۰٪، (mpy) ۱۳۰/۲۶ بود که حدود دو برابر نرخ خوردگی (mpy) ۷۳/۳۷ در درصد جامد ۵۵٪ می‌باشد. این امر به علت اکسیژن پالپ داخل آسیا می‌باشد،

چراکه اکسیژن به آسانی در درصد جامدهای پایین در پالپ حل شده و موجب خوردگی بیشتر گلوله-ها می‌گردد. نرخ خوردگی گلوله‌ها (Y) مطابق معادله رگرسیون زیر به صورت تابعی از درصد جامد پالپ (x) آسیا اندازه گیری شد:

$$Y = 0.052x^2 - 6.709x + 283.7 \leftrightarrow R^2 = 0.993 \quad (10-6)$$

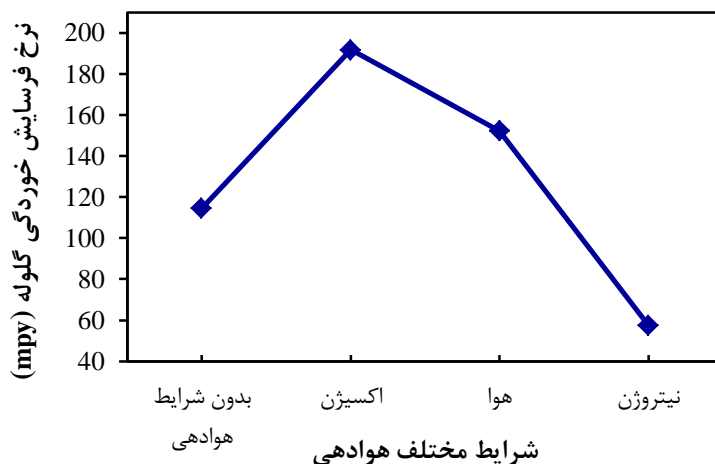


شکل (۶-۶): تاثیر درصد جامد داخل آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

### ۳-۳-۶. تاثیر شرایط مختلف هوادهی به محیط خردایش توسط گازهای مختلف اکسیژن،

#### هوا و نیتروژن

تزریق گازهای اکسیژن، هوا و نیتروژن به آسیا، محیط اکسایش و کاهش را با حذف یا تولید اکسیژن از آسیا، تغییر می‌دهد (Huang, 2005 and Peng, 2002). با تزریق این گازها به سیستم خردایش مشاهده شد که نرخ خوردگی با تغییر گاز از اکسیژن به هوا و به نیتروژن کاهش یافته است که امری طبیعی است. ضمناً مشاهده شد که نرخ خوردگی به هنگام اکسیژن‌دهی اختلاف بسیار زیادی با نیتروژن‌دهی دارد. این پدیده به این علت می‌باشد که اکسیژن‌دهی پتانسیل پالپ و محتوای اکسیژن محلول در پالپ را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش اتلاف بار خردکننده می‌گردد.

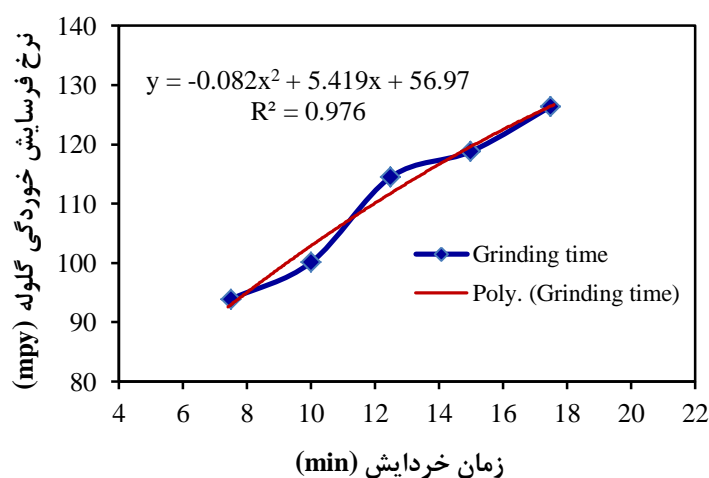


شکل (۶-۷): تاثیر شرایط مختلف هوادهی (اکسیژن، نیتروژن و هوا) به محیط خردایش، بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

### ۶-۳-۴. تاثیر زمان خردایش

به منظور بررسی تاثیر زمان خردایش بر خوردگی بار خردکننده، خردایش کانه در زمان‌های ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ دقیقه انجام شد. شکل (۶-۸) تاثیر زمان خردایش کانه را بر میزان فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی نشان می‌دهد. نرخ خوردگی (Y) مطابق معادله رگرسیون (۶-۱۱) به زمان خردایش (x) وابسته است و با طولانی‌تر شدن زمان خردایش، افزایش می‌یابد.

$$Y = -0.082x^2 + 5.419x + 56.97 \leftrightarrow R^2 = 0.976 \quad (۶-۱۱)$$



شکل (۶-۸): تاثیر زمان خردایش بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

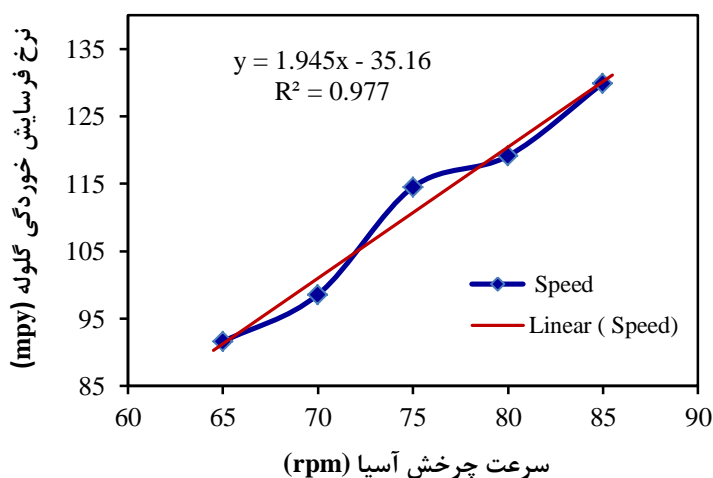
### ۵-۳-۶. تاثیر ظرفیت (دبی بار ورودی)

نرخ خوردگی گلوله فولادی با آلیاژ پایین در طول خردایش برای ظرفیت‌های ۳۶۵، ۷۳۰ و ۱۴۶۵ گرم، ۱۱۴/۵، ۱۰۸/۱ و ۹۶/۱۲ هزارم اینچ در سال (mpy) بدست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ظرفیت بار ورودی تاثیر ملایم‌تری بر نرخ خوردگی بار خردکننده دارد به طوری که ظرفیت ۲ یا ۳ برابر می‌شود، میزان خوردگی به آرامی کاهش می‌یابد. کاهش میزان خوردگی گلوله‌ها در ظرفیت‌های بالا، احتمالاً به دلیل فضای حرکت گلوله‌ها می‌باشد که در ظرفیت‌های بالا کاهش می‌یابد، بنابراین احتمال تماس بین گلوله‌ها و ذرات کمتر شده و سبب کاهش نرخ خوردگی گلوله‌ها می‌شود.

### ۶-۳-۶. تاثیر سرعت گردش آسیا

تاثیر سرعت چرخش آسیا بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها با تغییر سرعت در محدوده ۶۵ تا ۸۵ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً یک ارتباط خطی بین نرخ خوردگی گلوله‌ها و سرعت آسیا وجود دارد (معادله (۶-۱۲)). از شکل (۶-۹) کاملاً مشخص است که سرعت گردش آسیا، نرخ خوردگی بار خردکننده را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

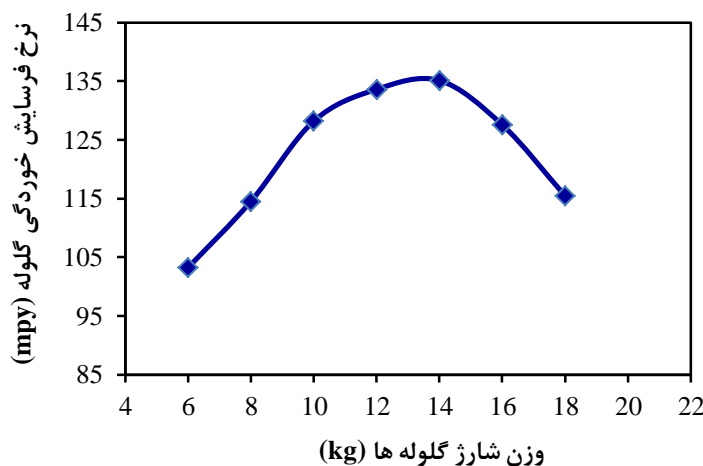
$$Y = 1.945x - 35.16 \leftrightarrow R^2 = 0.977 \quad (۶-۱۲)$$



شکل (۶-۹): تاثیر سرعت گردش آسیا بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

### ۶-۳-۷. تاثیر وزن شارژ بار خردکننده

تاثیر وزن شارژ گلوله‌ها بر خوردگی بار خردکننده در محدوده ۶ تا ۱۸ کیلوگرم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ خوردگی با افزایش وزن شارژ گلوله‌ها افزایش می‌یابد تا به پیکی در وزن ۱۴ کیلوگرم می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر گلوله‌ها، میزان خوردگی کاهش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که با شارژ مناسب گلوله می‌توان خوردگی گلوله‌ها را کاهش داد. کاهش نرخ خوردگی با افزایش گلوله از میزان معینی ممکن است به علت کاهش فضای حرکت گلوله‌ها و در نتیجه کاهش سطح جدید برای تماس میان گلوله و ذرات کانه باشد.



شکل (۶-۱۰): تاثیر وزن شارژ گلوله‌ها بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

### ۶-۳-۸. تاثیر نوع بار خردکننده و نوع آب مورد استفاده در آسیا

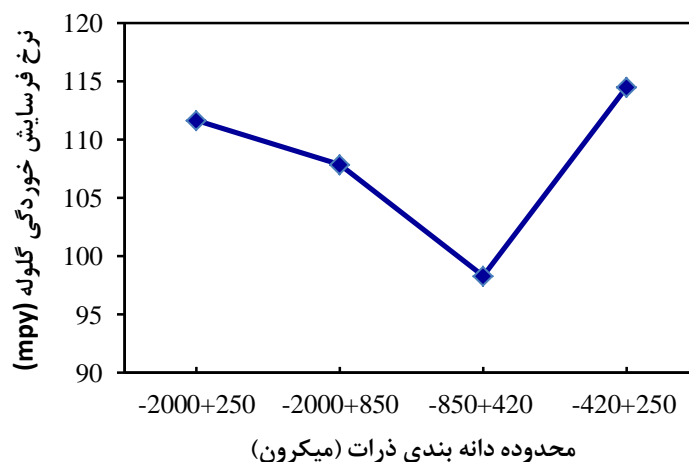
آب یک عنصر ضروری در سلول‌های خوردگی است. شیمی آب تاثیر بسیار زیادی در اتلاف فلز دارد. به منظور نمایش اهمیت شیمی آب روی خوردگی بار خردکننده از دو نوع آب شامل آب معمولی (شیر) و آب مقطر در آزمایش‌های خردایش استفاده شد. نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین برای آب معمولی (شیر) و آب مقطر ۱۱۴/۵ و ۶۷/۷۹ هزارم اینچ در سال در مدت زمان ۱۲/۵ دقیقه

خردایش،  $pH=7-7/5$  و درصد جامد  $35\%$  بدست آمد. این اختلاف زیاد در نرخ خوردگی، احتمالاً به دلیل کلرید و سولفات بالا در آب معمولی (شیر) است.

دو نوع گلوله فولادی شامل گلوله فولادی با آلیاژ پایین و گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا برای بررسی تاثیر ترکیب و خصوصیات متالورژیکی بار خردکننده در فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده استفاده شد. نرخ خوردگی محاسبه شده برای گلوله فولادی آلیاژ پایین ( $114/5$  mpy) و گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا ( $68/37$  mpy)، نشان می‌دهد که واسطه فولادی آلیاژ پایین، خیلی سریع‌تر از واسطه کربن و کروم بالا، اکسید می‌شود.

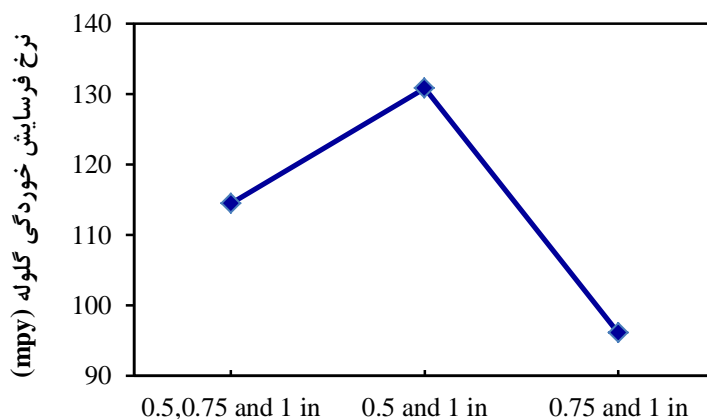
### ۹-۳-۶. تاثیر توزیع ابعادی ذرات و توزیع ابعادی بار خردکننده

تاثیر توزیع ابعادی ذرات بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله فولادی با آلیاژ پایین نشان می‌دهد که حضور ذرات ریز در داخل آسیا، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد (شکل (۶-۱۱)). ضمناً تاثیر توزیع ابعادی گلوله‌های فولادی در آسیا هم نشان می‌دهد که استفاده از گلوله‌های کوچکتر، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد (شکل (۶-۱۲)). زیرا با کاهش اندازه ذرات و ابعاد گلوله، سطح موثر تماس گلوله با ذرات افزایش یافته، در نتیجه گلوله سریع‌تر اکسید می‌شود و نرخ خوردگی افزایش می‌یابد.



شکل (۶-۱۱): تاثیر توزیع ابعادی ذرات بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین





توزیع اندازه بار خردکننده (اینچ)

شکل (۶-۱۲): تاثیر توزیع ابعادی گلوله‌های فولادی بر نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

نتایج نشان می‌دهد که این فاکتورها تاثیر کمتری بر نرخ خوردگی گلوله نسبت به دیگر فاکتورهای مورد بررسی دارند.

#### ۶-۴. سهم مکانیزم خوردگی در فرسایش گلوله‌های فولادی

به منظور بدست آوردن درصد فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی در خردایش کانه مس سولفیدی (کانه سرچشمه) نسبت به فرسایش کل بار خردکننده، ۱۰ آزمایش خردایش (۸ آزمایش با گلوله فولادی آلیاژ پایین و ۲ آزمایش با گلوله فولادی کربن و کروم بالا) بوسیله‌ی آسیای گلوله‌ای الکتروشیمیایی توصیف شده انجام شد و درصد مکانیزم خوردگی از تقسیم اتلاف جرم حاصل از خوردگی گلوله به اتلاف جرم حاصل از فرسایش کل بدست آمد.

در آزمایش‌ها برای تعیین اتلاف جرم حاصل از فرسایش کل گلوله ( $m_{wear}$ )، ابتدا ۱۵ عدد گلوله فولادی علامت گذاری شده و وزن گردید و آزمایش‌های خردایش بر روی آن‌ها انجام شد. سپس بعد از هر آزمایش خردایش، گلوله‌ها شستشو، خشک و وزن شدند. در نهایت اتلاف جرم فرسایش کل گلوله از اختلاف جرم دو حالت محاسبه شد.

اتلاف جرم حاصل از خوردگی گلوله ( $m_{corr}$ ) بعد از تعیین نرخ حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون و رابطه فارادی (۴-۱)، از فرمول ذیل محاسبه شد.

$$CR = \frac{534 \times W}{\rho \times A \times t} \quad (-6)$$

که CR نرخ خوردگی بر حسب هزارم اینچ در سال (mpy)، W اتلاف وزن بر حسب میلی‌گرم،  $\rho$  دانسیته بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، A مساحت سطح گلوله بر حسب اینچ مربع و t زمان بر حسب ساعت می‌باشد (Jones, 1996).

جدول (۴-۶): درصد اتلاف جرم گلوله در فرسایش حاصل از خوردگی و فرسایش کل تحت شرایط مختلف خردایش

| شماره آزمایش | شرایط آزمایش خردایش  | $m_{wear}$ (g) | $m_{corr}$ (g) | $\frac{m_{corr}}{m_{wear}}$ (%) |
|--------------|--|----------------|----------------|---------------------------------|
| ۱            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)      | ۰/۰۰۴۵         | ۰/۰۰۱۳۷        | ۳۰/۲۲                           |
| ۲            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۵۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)      | ۰/۰۰۲۹         | ۰/۰۰۰۶۸        | ۲۳/۴۵                           |
| ۳            | آب معمولی، pH: ۱۰، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)     | ۰/۰۰۳۱         | ۰/۰۰۰۸۵        | ۲۷/۴۲                           |
| ۴            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه B و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)      | ۰/۰۰۴۹         | ۰/۰۰۱۴۶        | ۲۹/۷۹                           |
| ۵            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۹۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)      | ۰/۰۰۶۴         | ۰/۰۰۲۱۶        | ۳۳/۷۵                           |
| ۶            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۸۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)      | ۰/۰۰۵۲         | ۰/۰۰۱۶۴        | ۳۱/۵۴                           |
| ۷            | آب مقطر، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۰kg)        | ۰/۰۰۲۷         | ۰/۰۰۰۷۴        | ۲۷/۴۱                           |
| ۸            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی آلیاژ پایین (۱۵kg)      | ۰/۰۰۴۷         | ۰/۰۰۱۳۲        | ۲۸/۰۸                           |
| ۹            | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه A و گلوله: فولادی کربن و کروم بالا (۱۰kg) | ۰/۰۰۲۴         | ۰/۰۰۰۴۵        | ۱۸/۷۵                           |
| ۱۰           | آب معمولی، pH: ۷، درصد جامد: ۳۵، زمان خردایش: ۶۰ دقیقه، سرعت آسیا: ۷۵ دور بر دقیقه، کانه B و گلوله: فولادی کربن و کروم بالا (۱۰kg) | ۰/۰۰۳۳         | ۰/۰۰۰۸۷        | ۲۶/۳۶                           |

جدول (۴-۶) اتلاف جرم گلوله را در اثر فرسایش حاصل از خوردگی و فرسایش کل تحت شرایط مختلف خردایش نشان می‌دهد. در جدول (۴-۶)، ۸ آزمایش اول خردایش با گلوله فولادی آلیاژ پایین و آزمایش‌های ۹ و ۱۰ با استفاده از گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا انجام شد. قابل ذکر است که آزمایش‌های ۱، ۲ و ۹ هر کدام ۳ بار و بقیه آزمایش‌ها ۲ بار تکرار شده‌اند و اتلاف جرم متوسط آن‌ها در جدول ذکر گردید. همچنین گلوله‌های فولادی علامت‌گذاری شده گلوله‌هایی با قطر ۱ اینچی بودند.

بر اساس محاسبات انجام شده، درصد فرسایش خوردگی به فرسایش کل بعبارتی سهم مکانیزم خوردگی در فرسایش گلوله‌های فولادی برای کانه مس سولفیدی در مقیاس آزمایشگاهی به طور متوسط ۲۷/۶۸ درصد بدست آمد که بیانگر سهم بالای مکانیزم خوردگی در فرسایش بار خردکننده در آسیاها است.

## فصل هفتم:

مدل سازی و بهینه سازی فرسایش حاصل از

خوردگی گلوله های فولادی

## ۷-۱. مقدمه

بررسی پدیده خوردگی چندان ساده نیست و با همه تحقیقات انجام شده، هنوز عوامل آن به درستی شناخته نشده است. از طرفی تعداد عوامل شناخته شده و بعضاً ناشناخته موثر بر پدیده خوردگی بسیار زیاد بوده و شناخت، تعیین و میزان تاثیر آنها هزینه‌های زیادی را در مرحله آزمایشگاهی و نیمه صنعتی در بر می‌گیرد. بنابراین به روش‌هایی نیاز خواهد بود که بتواند با صرف هزینه اندک اطلاعات زیادی درباره سیستم مورد مطالعه بدهد. مدل‌سازی خوردگی می‌تواند در شناخت بیشتر و پیش‌بینی مسائل برآمده از آن موثر باشد.

در واقع هدف از فرآیند مدل‌سازی، انتخاب مدل‌های مناسب قابل کاربرد در حیطه کاری مورد نظر و برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌ها می‌باشد تا بتوان از بین این مدل‌ها، بهترین مدلی که بر داده‌های آزمایشگاهی برازش می‌شود، بدست آورد.

با توجه به عوامل متعدد موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی در آسیاها، هدف این فصل مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند برای کنترل و دستیابی به کمترین میزان خوردگی است. دستیابی به این هدف نیازمند انجام آزمایش‌های دقیق و تحلیل صحیح نتایج می‌باشد. به این منظور از روش طراحی آماری آزمایش‌ها استفاده گردید. طراحی آماری ابزاری کارآمد در طرح آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج آنها برای دستیابی به مدل ریاضی حاکم بر فرآیند با لحاظ کردن عوامل مستقل و همچنین اندرکنش‌های احتمالی موثر بر آن می‌باشد.

## ۷-۲. طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها مدتی است که در تحقیقات مهندسی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر در عملیات معدنی و از جمله فرآوری مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا بر اساس تعداد عوامل متغیر و تعداد سطوح این عوامل، ماتریس انجام آزمایش‌ها طرح شده و پس از انجام آزمایش‌ها، داده‌های آزمایش‌ها تحلیل و بهترین حالت در مورد فرآیند مورد نظر انتخاب می‌شود. مزیت این روش

کاهش تعداد آزمایش‌ها برای رسیدن به درصد اطمینان بالا و نیز در نظر گرفتن اثر متقابل پارامترها بر یکدیگر می‌باشد (شفائی، ۱۳۸۳).

معمول‌ترین روش‌های طراحی آزمایش‌ها، شامل روش‌های فاکتوریل کامل، جزئی، روش تاگوچی و روش سطح پاسخ می‌باشد. بعد از انجام آزمایش‌ها و محاسبه پاسخ سیستم، با استفاده از تحلیل‌های آماری مانند رگرسیون ساده، رگرسیون چند متغیره و رگرسیون گام به گام و همچنین آنالیز واریانس-ها، محاسبه آماره‌های مختلف مانند  $t$  و  $F$ ، میزان احتمال  $P$  و همچنین مدل ریاضی حاکم بر فرآیند، فاکتورهای موثر و میزان تاثیر آن‌ها به همراه اندرکنش‌های موثر بدست می‌آیند. جزئیات روش طراحی آزمایش‌ها در پیوست (ب) آورده شده است.

روش سطح-پاسخ (RSM)<sup>۱</sup> مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه روش پاسخ-پاسخ شده است. در کاربرد این روش، توسعه یک مدل تخمینی برای سطح-پاسخ ضروری است. مدل براساس داده‌های مشاهده شده از فرآیند یا سیستم بوده و یک مدل تجربی است (Montgomery, 2001; Myers and Montgomery, 2002). روشی که در تجزیه و تحلیل سطح-پاسخ به کار می‌رود شامل سه مرحله است (Montgomery, 2001): (۱) انجام چندین آزمایش که داده‌های قابل اطمینانی فراهم می‌سازند، (۲) برازش یک مدل ریاضی که رابطه بین متغیرهای ورودی و پاسخ را توصیف می‌کند، و (۳) استفاده از مدل ریاضی جهت تعیین سطوح بهینه متغیرهای فرآیند و یا عبارتی متغیرهای ورودی (فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی) در چه سطوحی باید بکار برده شوند تا حداکثر و یا حداقل مقدار برای پاسخ یا خروجی فرآیند (حداقل مقدار در مورد خوردگی) حاصل گردد.

دو مدل بسیار مهم که عموماً در مدل‌سازی به کمک روش سطح-پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

---

<sup>1</sup> - Response Surface Method

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad \text{مدل درجه اول} \quad (1-7)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 < i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad \text{مدل درجه دوم} \quad (2-7)$$

در معادلات فوق،  $Y$ ،  $k$ ،  $\beta_0$ ،  $\beta_i$ ،  $x_i$ ،  $\beta_{ii}$ ،  $\beta_{ij}$  و  $\varepsilon$  به ترتیب پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل، تعداد متغیرها (فاکتورها)، ضریب ثابت، ضریب پارامترهای خطی، متغیرهای مستقل، ضریب پارامترهای درجه دوم، ضریب اندرکنش پارامترها و میزان باقیمانده (اختلاف میزان پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) هستند (Bezera, 2008).

با کمک روش آماری سطح پاسخ، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه ضرائب مدل رگرسیون‌ها و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند. مجموعه‌ای از روش‌های آماری مفید برای ساخت انواع مدل‌های تجربی مورد نیاز در روش سطح پاسخ به کار رفته است که مرسوم و پرکاربردترین آن‌ها طرح مرکب مرکزی (CCD)<sup>1</sup> است (Montgomery, 2001; Myers and Montgomery, 2002). این طرح شامل سه بخش است: (۱) طرح فاکتوریل کامل یا جزئی، (۲) یک طرح محوری، و (۳) نقاط مرکزی.

### ۷-۳. روش و طرح انجام آزمایش‌های خردایش

به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده، پس از شناسایی فاکتورهای موثر و دامنه تغییرات فاکتورها، ۶ فاکتور موثر و مهم (pH، درصد جامد، ظرفیت، وزن شارژ گلوله، سرعت گردش آسیا و زمان خردایش) که قابل کنترل و به طور کمی قابل تغییر بودند، انتخاب شدند. سپس طرح‌ریزی انجام آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح-پاسخ (طرح مرکب مرکزی) انجام گرفت و تست‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های معرف (کانسنگ مس سرچشمه) تحت شرایط مختلف خردایش با استفاده از آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی ویژه، انجام شد که عوامل موثر به همراه مقادیر آزمایشی آن‌ها در جدول (۱-۷) آورده شده‌اند.

<sup>1</sup> - Central Composite Design

جدول (۷-۱): سطوح انتخاب شده فاکتورها بر حسب مقادیر واقعی و کد براساس طرح مرکب مرکزی

| فاکتورها            | علامت | سطح پایین<br>محوری (-۲) | سطح پایین<br>فاکتوریل (-۱) | سطح<br>مرکزی (۰) | سطح بالای<br>فاکتوریل (+۱) | سطح بالای<br>محوری (+۲) |
|---------------------|-------|-------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|-------------------------|
| pH                  | A     | ۷                       | ۸                          | ۹                | ۱۰                         | ۱۱                      |
| درصد جامد (%)       | B     | ۲۵                      | ۳۰                         | ۳۵               | ۴۰                         | ۴۵                      |
| ظرفیت (g)           | C     | ۱۸۰                     | ۳۶۰                        | ۵۴۰              | ۷۲۰                        | ۹۰۰                     |
| وزن شارژ گلوله (kg) | D     | ۶                       | ۸                          | ۱۰               | ۱۲                         | ۱۴                      |
| سرعت آسیا (rpm)     | E     | ۶۵                      | ۷۰                         | ۷۵               | ۸۰                         | ۸۵                      |
| زمان خردایش (دقیقه) | F     | ۷/۵                     | ۱۰                         | ۱۲/۵             | ۱۵                         | ۱۷/۵                    |

طرح انجام آزمایش‌ها با روش سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی شامل ۳۲ آزمایش به صورت فاکتوریل جزئی ( $2^{6-1}$ )، ۱۲ آزمایش محوری و ۶ آزمایش در نقطه مرکزی بود. ماتریس طرح آزمایش‌های انجام شده از ترکیب سطوح مختلف پارامترهای مورد نظر (۵۰ آزمایش) و مقادیر محاسبه شده متغیر پاسخ هر آزمایش (نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی) در جدول (۷-۲) آورده شده است. ترتیب انجام این آزمایش‌ها به صورت تصادفی بوده است.

جدول (۷-۲): ماتریس طرح مرکب مرکزی انجام آزمایش‌ها و مقادیر پاسخ (نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (LS) و کربن-کروم بالا (HS))

| استاندارد | شماره<br>آزمایش | A  | B  | C  | D  | E  | F  | نرخ خوردگی<br>(mpy) (LS) | نرخ خوردگی<br>(mpy) (HS) |
|-----------|-----------------|----|----|----|----|----|----|--------------------------|--------------------------|
| ۱۳        | ۱               | -۱ | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | ۱۲۳/۲۳                   | ۷۶/۲۴                    |
| ۲۸        | ۲               | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | ۹۳/۷۲                    | ۵۶/۹۴                    |
| ۱۰        | ۳               | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۱۱۳/۴۳                   | ۶۷/۰۲                    |
| ۱۲        | ۴               | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | ۹۶/۹۴                    | ۵۸/۱۳                    |
| ۳۶        | ۵               | ۰  | ۲  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۸۴/۷۱                    | ۴۸/۹۳                    |
| ۳۹        | ۶               | ۰  | ۰  | ۰  | -۲ | ۰  | ۰  | ۹۹/۶۸                    | ۵۵/۳۱                    |
| ۵۰        | ۷               | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۱۰۶/۸۴                   | ۶۳/۱۸                    |
| ۴         | ۸               | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | ۷۸/۱۱                    | ۴۳/۱۴                    |
| ۳۵        | ۹               | ۰  | -۲ | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۱۳۱/۱۳                   | ۹۶/۰۷                    |
| ۴۷        | ۱۰              | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۱۰۲/۲۴                   | ۶۱/۵۴                    |
| ۶         | ۱۱              | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۱۰۰/۸۸                   | ۵۹/۷۷                    |
| ۲۷        | ۱۲              | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | ۱۳۷/۴۷                   | ۹۰/۰۲                    |
| ۱۱        | ۱۳              | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۱۰۰/۴۲                   | ۶۵/۵۲                    |



ادامه جدول (۷-۲)

| نرخ خوردگی<br>(mpy) (HS) | نرخ خوردگی<br>(mpy) (LS) | F  | E  | D  | C  | B  | A  | شماره<br>آزمایش | استاندارد |
|--------------------------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|-----------------|-----------|
| ۵۴/۲۲                    | ۹۰/۱۲                    | ۰  | -۲ | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۱۴              | ۴۱        |
| ۷۰/۹۶                    | ۱۱۹/۳۸                   | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | ۱۵              | ۱۴        |
| ۶۱/۷۹                    | ۱۱۱/۴۱                   | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۱۶              | ۴۶        |
| ۸۴/۴۳                    | ۱۲۷/۵۹                   | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | ۱  | ۱۷              | ۲         |
| ۷۹/۸۳                    | ۱۲۸/۱۲                   | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۱۸              | ۲۱        |
| ۴۸/۵۷                    | ۸۹/۳۸                    | -۱ | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | ۱۹              | ۱۶        |
| ۷۷/۰۹                    | ۱۲۵/۳۲                   | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | ۲۰              | ۲۳        |
| ۷۱/۵۵                    | ۱۲۰/۴۸                   | ۰  | ۲  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۲۱              | ۴۲        |
| ۶۹/۶۶                    | ۱۰۷/۰۸                   | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | -۱ | ۲۲              | ۱۹        |
| ۶۸/۵۲                    | ۱۰۳/۲۱                   | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۲۳              | ۴۵        |
| ۵۳/۰۱                    | ۹۱/۳۳                    | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | ۲۴              | ۸         |
| ۶۲/۶۹                    | ۱۰۴/۴۲                   | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۲۵              | ۴۸        |
| ۶۲/۰۳                    | ۱۰۵/۰۵                   | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | ۱  | ۲۶              | ۲۰        |
| ۷۳/۳۳                    | ۱۳۰/۲۳                   | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | ۲۷              | ۲۵        |
| ۶۴/۲۲                    | ۱۰۷/۵۸                   | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | -۱ | ۲۸              | ۳۱        |
| ۶۸/۲۹                    | ۱۰۸/۱۲                   | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۲۹              | ۴۹        |
| ۵۶/۰۴                    | ۹۶/۴۸                    | ۰  | ۰  | ۰  | ۲  | ۰  | ۰  | ۳۰              | ۳۸        |
| ۷۴/۸۸                    | ۱۲۲/۹۵                   | ۲  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۳۱              | ۴۴        |
| ۹۷/۳۸                    | ۱۴۱/۸۱                   | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | ۳۲              | ۹         |
| ۵۲/۱۸                    | ۹۲/۶۴                    | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | ۳۳              | ۲۴        |
| ۶۹/۴۷                    | ۱۲۲/۲۱                   | ۱  | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | -۱ | ۳۴              | ۱۵        |
| ۱۰۳/۴                    | ۱۴۸/۱۴                   | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | ۳۵              | ۱۷        |
| ۶۸/۶۴                    | ۱۱۸/۰۶                   | -۱ | ۱  | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | ۳۶              | ۳۰        |
| ۵۰/۵۱                    | ۹۰/۷۹                    | -۲ | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۳۷              | ۴۳        |
| ۶۰/۱۸                    | ۹۷/۶۸                    | -۱ | -۱ | -۱ | ۱  | ۱  | -۱ | ۳۸              | ۷         |
| ۸۱/۶۷                    | ۱۲۶/۷۴                   | ۱  | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | ۳۹              | ۲۶        |
| ۹۵/۳۲                    | ۱۳۹/۱۲                   | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | -۱ | -۱ | ۴۰              | ۲۹        |
| ۷۸/۲۵                    | ۱۲۳/۵۴                   | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | ۴۱              | ۱         |
| ۷۰/۵۵                    | ۱۲۰/۴۵                   | ۰  | ۰  | ۲  | ۰  | ۰  | ۰  | ۴۲              | ۴۰        |
| ۶۳/۷۲                    | ۱۱۶/۳۹                   | ۰  | ۰  | ۰  | -۲ | ۰  | ۰  | ۴۳              | ۳۷        |
| ۸۱/۴۵                    | ۱۲۹/۳۳                   | ۱  | -۱ | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | ۴۴              | ۵         |
| ۶۴/۱۸                    | ۱۰۲/۷۶                   | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | ۱  | ۴۵              | ۳۲        |
| ۶۶/۸۹                    | ۱۱۶/۲۶                   | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | ۱  | -۱ | ۴۶              | ۳         |
| ۶۱/۲۸                    | ۱۱۵/۵۹                   | -۱ | ۱  | -۱ | -۱ | -۱ | ۱  | ۴۷              | ۱۸        |
| ۵۰/۰۴                    | ۸۸/۸۶                    | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۲  | ۴۸              | ۳۴        |
| ۹۴/۰۱                    | ۱۳۳/۳                    | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | ۰  | -۲ | ۴۹              | ۳۳        |
| ۶۹/۱۸                    | ۱۰۸/۸۷                   | ۱  | ۱  | -۱ | ۱  | -۱ | ۱  | ۵۰              | ۲۲        |

## ۴-۷. تجزیه و تحلیل نتایج

### ۴-۷-۱. مدل سازی

به منظور مدل سازی و حداقل کردن نرخ خوردگی گلوله‌ها، از اصول بیان شده در زمینه طراحی آزمایش‌ها و از بسته نرم افزاری (Design Expert (DX7)، نسخه ۷، که جزء قویترین نرم افزارهای آماری در زمینه طراحی آماری آزمایش‌ها می‌باشد، برای آنالیز گرافیکی و رگرسیونی داده‌های بدست آمده در طول آزمایش‌های خریداریش، استفاده شد.

نتایج آنالیز آماری انجام شده بوسیله نرم‌افزار برای انتخاب مدل در سطح اعتماد ۹۵٪ (احتمال  $p$  کمتر از ۰/۰۵) در جدول (۳-۷) آورده شده است.

در جدول (۳-۷) مقادیر احتمال کوچک ( $p$  کمتر از ۰/۰۵) اعتبار مدل را نشان می‌دهد. عدم برازش مدل<sup>۱</sup> معیاری است برای اینکه چگونه مدل مناسبی بر روی داده‌ها برازش شود. عدم برازش کمتر از ۰/۰۵ شاخص نامطلوبی است و نشان می‌دهد که مدل خوب بر داده‌ها برازش نشده است. عدم برازش بیشتر از ۰/۱ بسیار مناسب می‌باشد. علاوه بر این، حداقل میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده برآورد شده (PRESS<sup>۲</sup>) معیاری دیگری برای برازش مدل می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۳-۷) ملاحظه می‌شود عدم برازش داده‌ها و خلاصه تجزیه تحلیل آماری برای مدل سازی فرسایش خوردگی گلوله‌ها نشان می‌دهد که یک مدل درجه دوم<sup>۳</sup>، بهترین مدل برای مدل سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها با میزان احتمال  $P$ ، ۰/۱۲۳۱ و ۰/۰۹۲۱، حداقل میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده برآورد شده (PRESS)، ۳۶۲۳/۴۴ و ۳۹۵۲/۴۹، مقادیر ضریب تعیین<sup>۴</sup>، ۰/۹۵۲ و ۰/۹۳۲۷ و ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۵</sup>، ۰/۹۸۳۲ و ۰/۸۵۰۱، به ترتیب برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا می‌باشد.

<sup>1</sup> - Lack of fit

<sup>2</sup> - Predicted residual sum of square

<sup>3</sup> - Quadratic

<sup>4</sup> - R-square

<sup>5</sup> - Adjusted R-square

جدول (۷-۳): آنالیز آماری مدل‌ها

| عدم برازش آزمایش‌ها برای نرخ خوردگی گلوله فولادی با آلیاژ پایین        |         |            |                         |                |                  | منبع تغییرات        |
|--|---------|------------|-------------------------|----------------|------------------|---------------------|
|  | میزان P | میزان F    | میانگین مربعات          | درجه آزادی     | مجموع مربعات     |                     |
|  | ۰/۰۷۴۸  | ۳/۶۷       | ۴۳/۱۶                   | ۳۸             | ۱۶۴۰/۰۹          | خطی (Linear)        |
|  | ۰/۰۶۳۴  | ۴/۰۳       | ۴۷/۵۱                   | ۲۳             | ۱۰۹۲/۶۵          | 2FI                 |
| Suggested  | ۰/۱۲۳۱  | ۲/۸۸       | ۳۳/۹۰                   | ۱۷             | ۵۷۶/۳۰           | درجه دو (Quadratic) |
| Aliased  | ۰/۰۲۷۱  | ۹/۵۶       | ۱۱۲/۶۱                  | ۱              | ۱۱۲/۶۱           | درجه سه (Cubic)     |
|  |         |            | ۱۱/۷۸                   | ۵              | ۵۸/۸۸            | خطای خالص           |
| خلاصه تجزیه تحلیل آماری مدل‌ها برای گلوله فولادی با آلیاژ پایین        |         |            |                         |                |                  | منبع                |
|  |         | PRESS      | Adjusted R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | انحراف استاندارد |                     |
|  |         | ۲۲۹۰/۹۶    | ۰/۸۵۳۸                  | ۰/۸۷۱۷         | ۶/۲۹             | خطی (Linear)        |
|  |         | ۴۳۵۱/۵۷    | ۰/۸۴۷۸                  | ۰/۹۱۳۱         | ۶/۴۱             | 2FI                 |
| Suggested  |         | ۳۶۲۳/۴۴    | ۰/۸۹۳۲                  | ۰/۹۵۲۰         | ۵/۳۷             | درجه دو (Quadratic) |
| Aliased  |         | ۹/۸۳۶E+۰۰۵ | ۰/۸۹۴۳                  | ۰/۹۸۷۱         | ۵/۳۵             | درجه سه (Cubic)     |
| عدم برازش آزمایش‌ها برای نرخ خوردگی گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا |         |            |                         |                |                  | منبع تغییرات        |
|  | میزان P | میزان F    | میانگین مربعات          | درجه آزادی     | مجموع مربعات     |                     |
|  | ۰/۰۶۸۰  | ۳/۵۸       | ۳۹/۶۰                   | ۳۸             | ۱۵۰۴/۶۶          | خطی (Linear)        |
|  | ۰/۰۴۵۴  | ۴/۷۵       | ۴۸/۹۲                   | ۲۳             | ۱۱۲۵/۲۶          | 2FI                 |
| Suggested  | ۰/۰۹۲۱  | ۳/۳۷       | ۳۴/۶۷                   | ۱۷             | ۵۸۹/۳۹           | درجه دو (Quadratic) |
| Aliased  | ۰/۰۴۹۲  | ۶/۶۸       | ۶۸/۷۷                   | ۱              | ۶۸/۷۷            | درجه سه (Cubic)     |
|  |         |            | ۱۰/۳۰                   | ۵              | ۵۱/۴۹            | خطای خالص           |
| خلاصه تجزیه تحلیل آماری مدل‌ها برای گلوله فولادی حاوی کربن و کروم بالا |         |            |                         |                |                  | منبع                |
|  |         | PRESS      | Adjusted R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | انحراف استاندارد |                     |
|  |         | ۲۱۰۴/۶۰    | ۰/۸۱۳۷                  | ۰/۸۳۶۵         | ۶/۰۲             | خطی (Linear)        |
|  |         | ۴۳۵۵/۰۱    | ۰/۷۸۳۷                  | ۰/۸۷۶۴         | ۶/۴۸             | 2FI                 |
| Suggested  |         | ۳۹۵۲/۴۹    | ۰/۸۵۰۱                  | ۰/۹۳۲۷         | ۵/۴۰             | درجه دو (Quadratic) |
| Aliased  |         | ۶/۰۰۷E+۰۰۵ | ۰/۸۹۶۸                  | ۰/۹۸۷۴         | ۴/۴۸             | درجه سه (Cubic)     |

آنالیز واریانس مدل تعیین شده برای تخمین پارامترهای آماری بوسیله نرم‌افزار انجام گرفت. در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آن‌ها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایش‌ها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای انتخاب مدل باید بگونه‌ای باشد

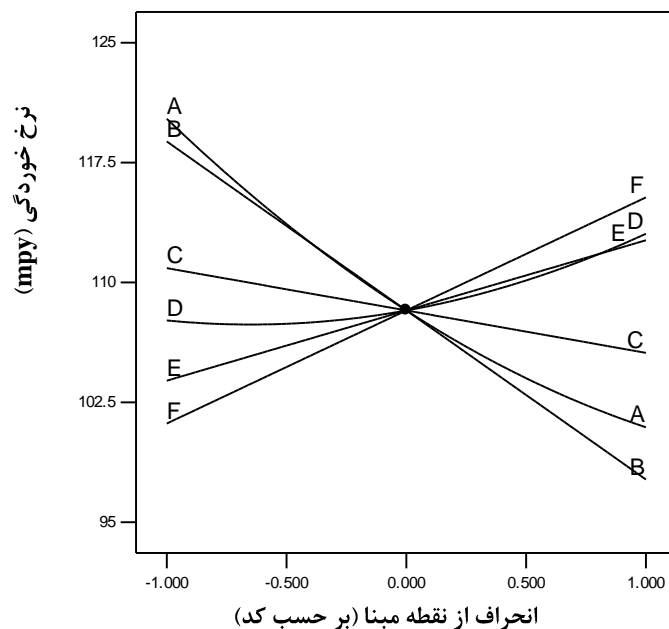
که مدل انتخابی معنی‌دار (میزان احتمال P کمتر از ۰/۰۵) باشد و همچنین Lack of fit که برای بررسی میزان برازش مدل بکار می‌رود، نباید معنی‌دار تلقی گردد. ضمناً برای آن که یک مدل توانایی خوبی برای برازش اطلاعات داشته باشد لازم است که  $R^2$  بالای ۰/۸ باشد. نتایج آنالیز واریانس بوسیله مدل سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی با استفاده از مدل درجه دوم بعد از حذف متغیرهای غیر مهم در جداول (۴-۷) و (۵-۷) آورده شده‌اند. نتایج آنالیز واریانس کلی بدون حذف متغیرها در جداول (۱) و (۲)، پیوست (ج) لیست شده‌اند.

جدول (۴-۷): آنالیز واریانس مدل Quadratic با حذف پارامترهای بی اهمیت در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

|         |                    | میزان P                  | میزان F                 | میانگین<br>مربعات | درجه<br>آزادی        | مجموع<br>مربعات | منبع تغییرات       |
|---------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
|         | significant        | < ۰/۰۰۰۱                 | ۴۲/۵۷۴۳۶                | ۱۳۳۲/۴۲۵          | ۹                    | ۱۱۹۹۱/۸۲        | مدل                |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۱۱۸/۹۸۹۲                | ۳۷۲۳/۹۳۵          | ۱                    | ۳۷۲۳/۹۳۵        | pH (A)             |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۱۴۲/۸۹۷۱                | ۴۴۷۲/۱۶۸          | ۱                    | ۴۴۷۲/۱۶۸        | درصد جامد (B)      |
|         |                    | ۰/۰۰۴۷                   | ۸/۹۸۳۹۳۸                | ۲۸۱/۱۶۵۱          | ۱                    | ۲۸۱/۱۶۵۱        | ظرفیت (C)          |
|         |                    | ۰/۰۰۳۹                   | ۹/۴۰۲۰۹۹                | ۲۹۴/۲۵۲           | ۱                    | ۲۹۴/۲۵۲         | وزن شارژ گلوله (D) |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۲۴/۶۵۶۹۶                | ۷۷۱/۶۷۴۴          | ۱                    | ۷۷۱/۶۷۴۴        | سرعت آسیا (E)      |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۶۳/۹۵۳۵۷                | ۲۰۰/۱۵۱۸          | ۱                    | ۲۰۰/۱۵۱۸        | زمان خردایش (F)    |
|         |                    | ۰/۰۴۶۸                   | ۴/۲۰۹۶۵۲                | ۱۳۱/۷۴۷           | ۱                    | ۱۳۱/۷۴۷         | زمان خردایش × pH   |
|         |                    | ۰/۰۲۲۷                   | ۵/۶۱۳۳۶۳                | ۱۷۵/۶۷۸۱          | ۱                    | ۱۷۵/۶۷۸۱        | pH <sup>2</sup>    |
|         |                    | ۰/۰۴۰۹                   | ۴/۴۶۳۳۶۳                | ۱۳۹/۶۸۷۳          | ۱                    | ۱۳۹/۶۸۷۳        | ² (وزن شارژ گلوله) |
|         |                    |                          |                         | ۳۱/۲۹۶۴۲          | ۴۰                   | ۱۲۵۱/۸۵۷        | باقیمانده          |
|         | Not significant    | ۰/۱۱۸۳                   | ۲/۸۹۴۶۲۶                | ۳۴/۰۸۵۱۴          | ۳۵                   | ۱۱۹۲/۹۸         | عدم برازش          |
|         |                    |                          |                         | ۱۱/۷۷۵۳۲          | ۵                    | ۵۸/۸۷۶۶         | خطای خالص          |
|         |                    |                          |                         |                   | ۴۹                   | ۱۳۲۴۳/۶۸        | Cor Total          |
| PRESS   | Adequate Precision | Predicted R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup>    | C.V <sup>1</sup> (%) | میانگین         | انحراف استاندارد   |
| ۲۳۴۷/۶۹ | ۲۵/۳۸۱             | ۰/۸۲۲۷                   | ۰/۸۸۴۲                  | ۰/۹۰۵۵            | ۵                    | ۱۱۱/۷۹          | ۵/۵۹               |

<sup>۱</sup> C.V، ضریب تغییر پذیری است که از تقسیم انحراف استاندارد بر میانگین بدست می‌آید.

نتایج برگرفته از جدول (۴-۷) نشان می‌دهد که به ترتیب اثرات خطی درصد جامد (B)، pH (A)، زمان خردایش (F)، سرعت گردش آسیا (E)، شارژ گلوله‌ها (D) و ظرفیت (C)، اثرات quadratic (درجه دومی) pH ( $A^2$ ) و وزن شارژ گلوله‌ها ( $D^2$ ) و تاثیر متقابل یا هم زمان pH و زمان خردایش ( $A \times F$ ) به طور آماری مهم‌ترین پارامترها در سطح اعتماد ۹۵٪ می‌باشند. شکل (۱-۷) که نمودار حساسیت بر فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین را نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده از جدول (۴-۷) را تایید می‌کند.



شکل (۱-۷): نمودار حساسیت فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

بنابراین با توجه به شناسایی پارامترهای مهم و موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی

با آلیاژ پایین، مدل ریاضی پیشنهادی شامل این پارامترهای مهم بر اساس مقادیر کد عبارت است از:

$$CR = +108.25 - 9.65 \times A - 10.57 \times B - 2.65 \times C + 2.71 \times D + 4.39 \times E + 7.07 \times F - 2.03 \times A \times F + 2.34 \times A^2 + 2.09 \times D^2 \quad (۳-۷)$$

در معادله (۳-۷)، CR، نرخ فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها بر حسب هزارم اینچ در سال است.

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی می‌توان از نتایج جدول (۴-۷) استفاده نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدم برازش مدل پیشنهادی (معادله (۳-۷)) بی اهمیت است و مدل می‌تواند برای تغییر پذیری داده‌ها مناسب باشد. علاوه بر این ضرائب تعیین  $R^2$ ،  $R^2$  Adjusted به ترتیب ۰/۹۰۵۵ و ۰/۸۸۴۲ برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بدست آمد. این امر نشان می‌دهد که مدل می‌تواند ۹۰/۵۵٪ تغییرپذیری در پاسخ (نرخ خوردگی) را بیان کند. معیار دیگر برای ارزیابی مدل، دقت کافی<sup>۱</sup> است که معیار نسبت سیگنال به نویز می‌باشد و میزان مطلوب آن باید بزرگتر از ۴ باشد. در این مورد میزان دقت کافی، ۲۵/۳۸۱ بدست آمد که نشان دهنده سیگنال کافی و در نتیجه مناسب بودن مدل برای هدایت فضای طرح می‌باشد.

جدول (۵-۷) نتایج آنالیز واریانس را برای مدل‌سازی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا ارائه می‌دهد. نتایج جدول (۵-۷) نشان می‌دهد که اثرات خطی همه فاکتورهای مورد بررسی، اثر متقابل بین درصد جامد و سرعت چرخش آسیا (B×E)، اثر متقابل بین ظرفیت بار ورودی و زمان خردایش (C×F) و تاثیر درجه دومی pH (A<sup>2</sup>) و درصد جامد (B<sup>2</sup>) همه بطور آماری معنی دار و مهم با خطای کمتر از ۰/۰۵ تلقی می‌شوند. شکل (۲-۷) می‌تواند تاییدی بر این نتایج باشد. شکل (۲-۷) نمودار حساسیت بر فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا را نشان می‌دهد. در نهایت مدل ریاضی پیشنهادی شامل این پارامترها که نشان دهنده‌ی ارتباط بین نرخ خوردگی گلوله‌های حاوی کربن و کروم بالا و پارامترهای مهم می‌باشد، عبارت است از:

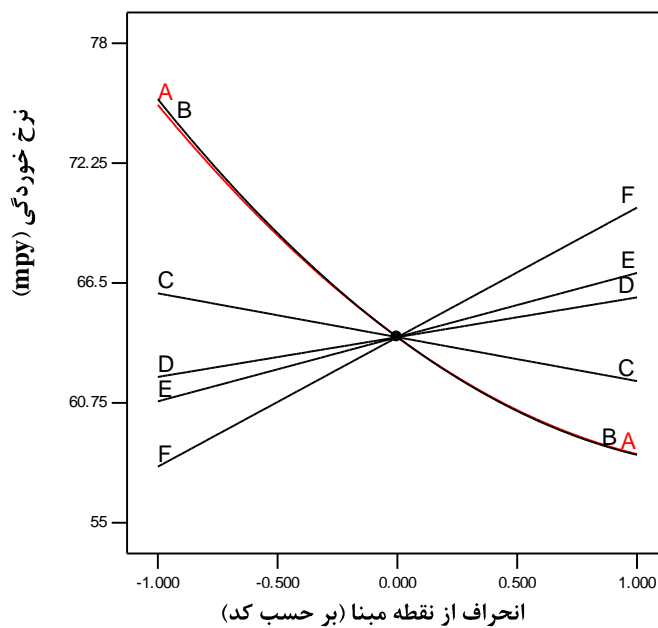
$$CR = +63.90 - 8.38 \times A - 8.53 \times B - 2.1 \times C + 1.91 \times D + 3.08 \times E + 6.21 \times F + 1.70 \times B \times E - 1.81 \times C \times F + 2.77 \times A^2 + 2.89 \times B^2 \quad (4-7)$$

نتایج اعتبار سنجی مدل نشان می‌دهد که عدم برازش مدل، ضریب تعیین، ضریب تعیین تعدیلی و دقت کافی به ترتیب، ۰/۱۸۲۴، ۰/۹۱۱۰، ۰/۸۸۸۱، و ۲۶/۰۹۴ می‌باشند. این امر دلالت بر آن دارد که مدل خوبی بر داده‌ها مورد برازش قرار گرفته است.

<sup>1</sup> - Adequate Precision

جدول (۷-۵): آنالیز واریانس مدل Quadratic با حذف پارامترهای بی اهمیت در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی کربن-کروم بالا

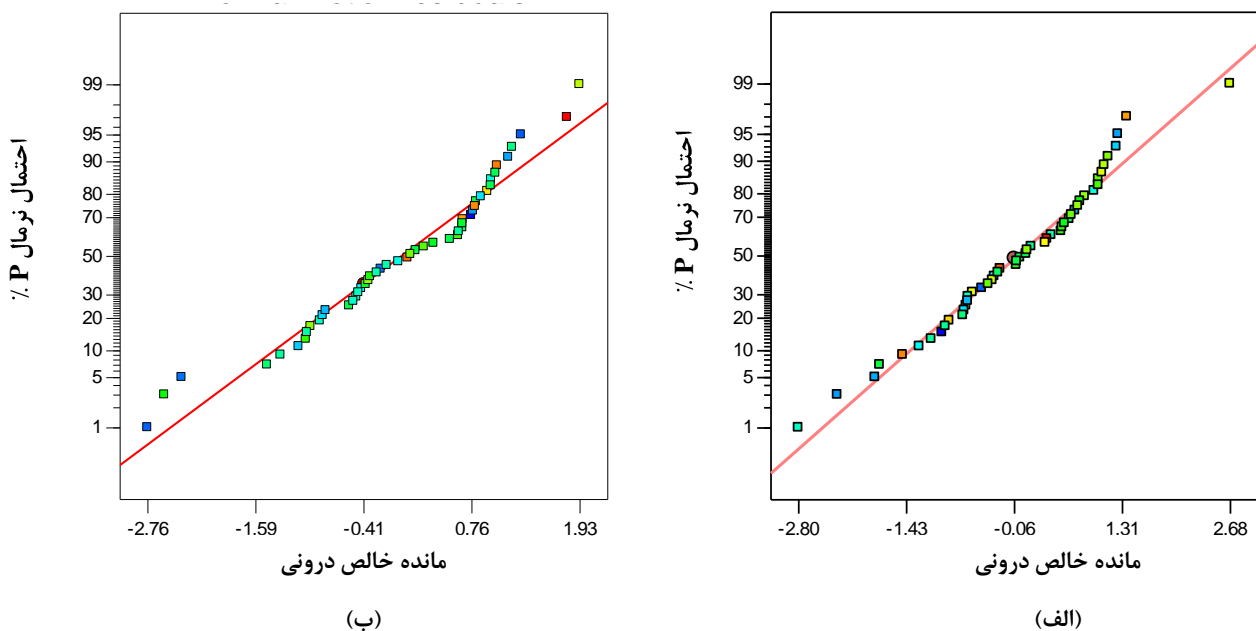
|         |                    | میزان P                  | میزان F                 | میانگین<br>مربعات | درجه<br>آزادی | مجموع<br>مربعات | منبع تغییرات             |
|---------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|---------------|-----------------|--------------------------|
|         | significant        | < ۰/۰۰۰۱                 | ۳۹/۹                    | ۸۶۷/۲۶            | ۱۰            | ۸۶۷۲/۶۳         | مدل                      |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۱۲۹/۱۳                  | ۲۸۰۶/۶۳           | ۱             | ۲۸۰۶/۶۳         | (A) pH                   |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۱۳۳/۹۱                  | ۲۹۱۰/۴۴           | ۱             | ۲۹۱۰/۴۴         | (B) درصد جامد            |
|         |                    | ۰/۰۰۶۹                   | ۸/۱۵                    | ۱۷۷/۰۷            | ۱             | ۱۷۷/۰۷          | (C) ظرفیت                |
|         |                    | ۰/۰۱۳۵                   | ۶/۷                     | ۱۴۵/۶۲            | ۱             | ۱۴۵/۶۲          | (D) وزن شارژ گلوله       |
|         |                    | ۰/۰۰۰۲                   | ۱۷/۴۶                   | ۳۷۹/۵۸            | ۱             | ۳۷۹/۵۸          | (E) سرعت آسیا            |
|         |                    | < ۰/۰۰۰۱                 | ۷۱/۰۸                   | ۱۵۴۴/۸            | ۱             | ۱۵۴۴/۸          | (F) زمان خردایش          |
|         |                    | ۰/۰۴۶۴                   | ۴/۲۳                    | ۹۲                | ۱             | ۹۲              | درصد جامد × سرعت آسیا    |
|         |                    | ۰/۰۳۴۵                   | ۴/۸                     | ۱۰۴/۳۳            | ۱             | ۱۰۴/۳۳          | ظرفیت × زمان خردایش      |
|         |                    | ۰/۰۰۱۸                   | ۱۱/۲۹                   | ۲۴۵/۳۳            | ۱             | ۲۴۵/۳۳          | pH <sup>2</sup>          |
|         |                    | ۰/۰۰۱۲                   | ۱۲/۲۸                   | ۲۶۶/۸۳            | ۱             | ۲۶۶/۸۳          | (درصد جامد) <sup>۲</sup> |
|         |                    |                          |                         | ۲۱/۷۳             | ۳۹            | ۸۴۷/۶۵          | باقیمانده                |
|         | Not significant    | ۰/۱۸۲۴                   | ۲/۲۷                    | ۲۳/۴۲             | ۳۴            | ۷۹۶/۱۷          | عدم برازش                |
|         |                    |                          |                         | ۱۰/۳              | ۵             | ۵۱/۴۹           | خطای خالص                |
|         |                    |                          |                         |                   | ۴۹            | ۹۵۲۰/۲۸         | Cor Total                |
| PRESS   | Adequate Precision | Predicted R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup>    | C.V (%)       | میانگین         | انحراف استاندارد         |
| ۱۶۹۴/۳۶ | ۲۶/۰۹۴             | ۰/۸۲۲۰                   | ۰/۸۸۸۱                  | ۰/۹۱۱۰            | ۶/۸۱          | ۶۸/۴۲           | ۴/۶۶                     |



شکل (۷-۲): نمودار حساسیت فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن-کروم بالا

## ۲-۴-۷. آنالیز خطاهای حاصل از مدل سازی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی

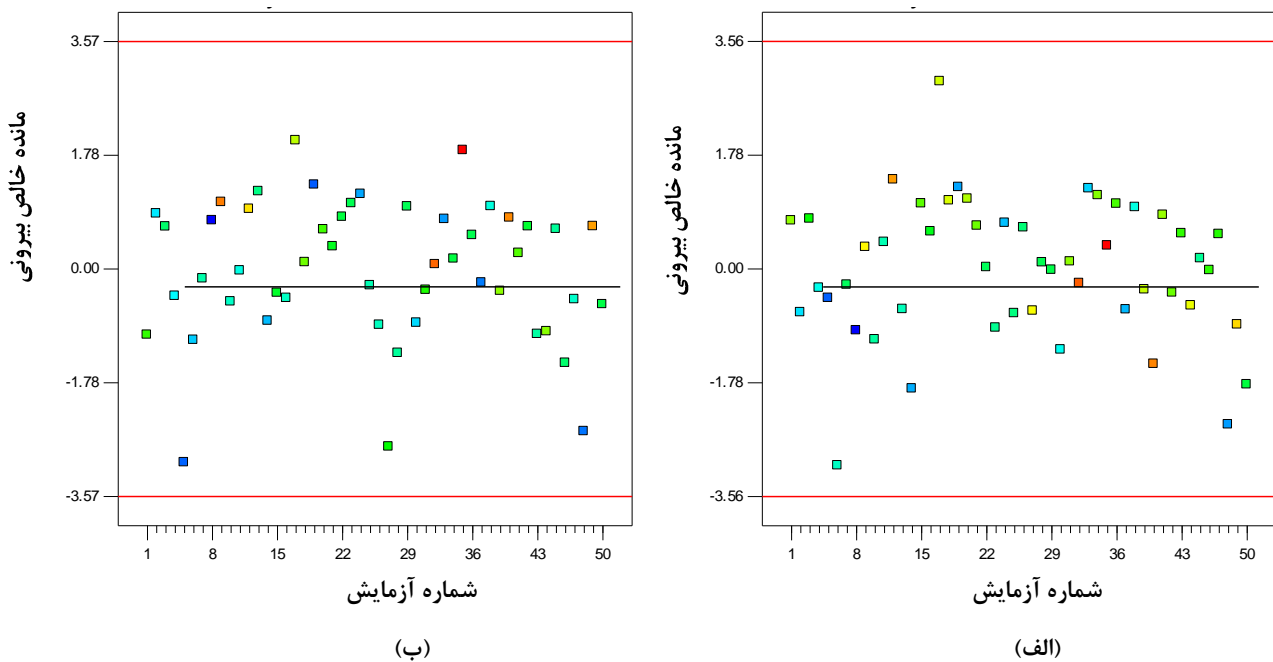
به منظور بررسی صحت معادله رگرسیون برازش شده، در پیش بینی مقادیر متغیر پاسخ به ازای سطوح مختلف فاکتورها، لازم است که باقیمانده‌ها (تفاوت مقادیر بدست آمده به وسیله مدل و مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش‌ها) بررسی شوند. معیار بسیار مهم برای دستیابی به این هدف، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها است. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها باید در امتداد یک خط راست و حول مقدار صفر متمرکز باشند. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و کربن-کروم بالا، در شکل (۳-۷) آورده شده و ملاحظه می‌شود که در امتداد یک خط راست واقع شده‌اند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مدل رگرسیون پیشنهادی، متغیر پاسخ (نرخ‌های خوردگی) را در محدوده پارامترهای مورد بررسی به خوبی پیش‌بینی می‌کند. بنابراین با استفاده از این مدل تاثیر هر یک از پارامترها (همان‌طور که در بخش پیشین تعیین شد) و مقادیر بهینه پاسخ قابل محاسبه است.



شکل (۳-۷): نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای مدل نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (الف) و کربن-کروم بالا (ب)



آنالیز مهم دیگری که در بررسی مدل و داده‌ها بکار می‌رود، بررسی مقادیر خارج از رده یعنی استفاده از نمودار Externally Studentized Residuals است (شکل (۴-۷)). انجام محاسبات مربوط به این نمودار به این صورت می‌باشد که ابتدا، داده‌های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می‌دارند و سپس بوسیله داده‌های دیگر، پاسخ را توسط مدل محاسبه می‌کنند. به این ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه‌گیری شده که بیرون از محاسبات نگه داشته شده بودند، با یکدیگر مقایسه شده و باقیمانده محاسبه می‌شود. حال اگر باقیمانده محاسبه شده مربوط به این آزمایش‌ها از خطوط حدی مشخص شده در بالا و پایین که توسط آزمون  $t$  محاسبه می‌شود تجاوز کند پاسخ اندازه‌گیری شده از لحاظ آماری به عنوان خارج از رده شناخته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ یک از داده‌ها خارج از رده نیستند.

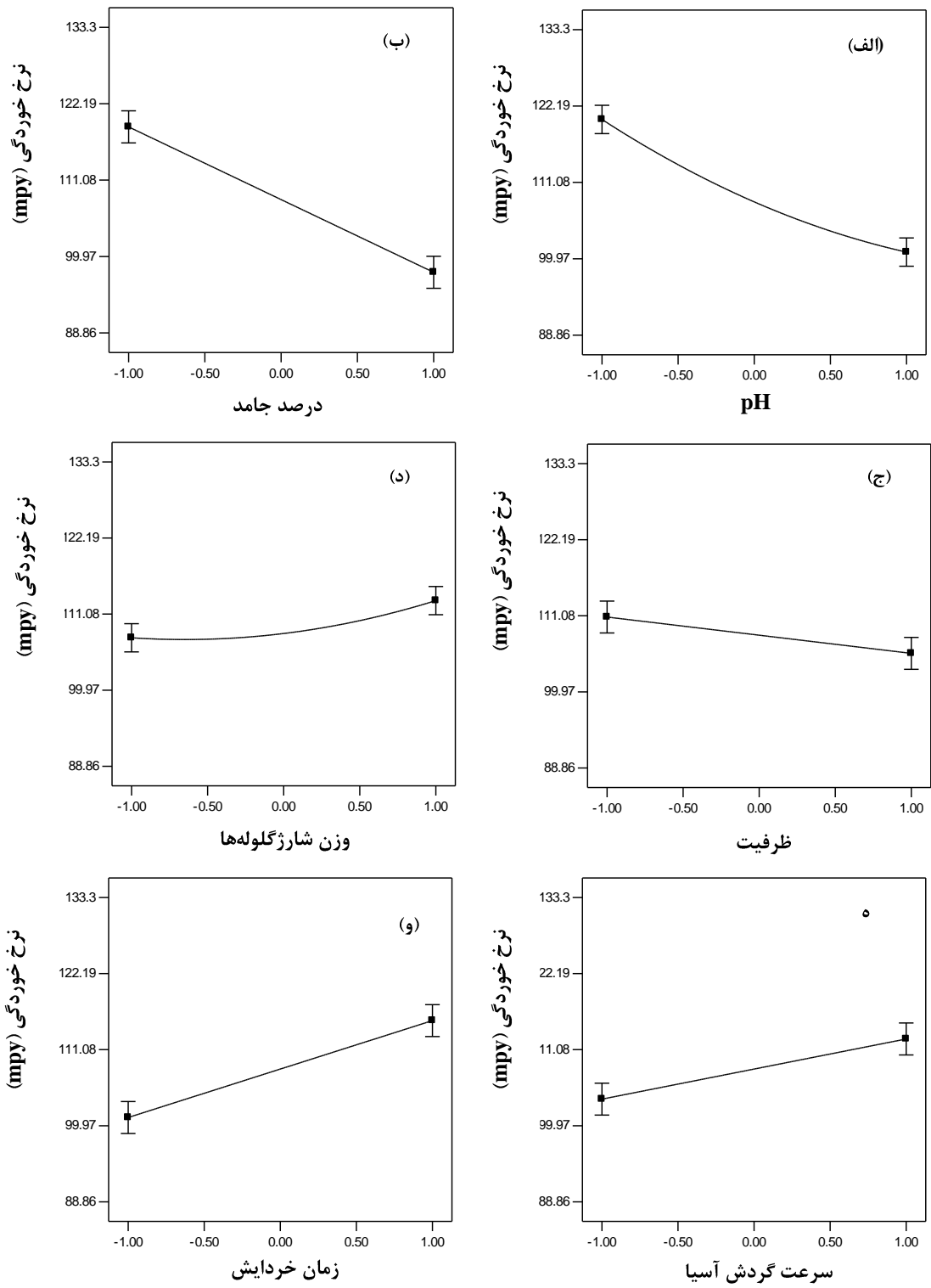


شکل (۴-۷): نمودار Externally Studentized Residuals (مانده استیودنتیده بیرونی) برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین (الف) و کربن-کروم بالا (ب)

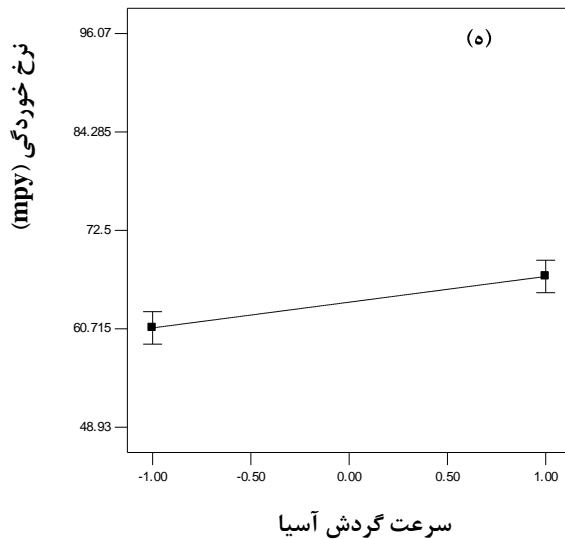
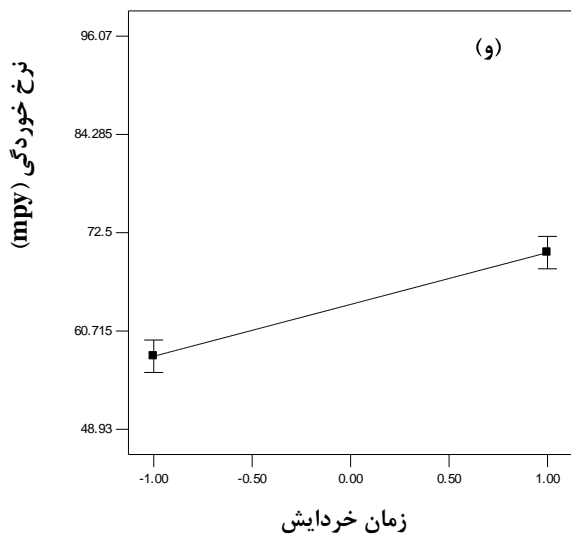
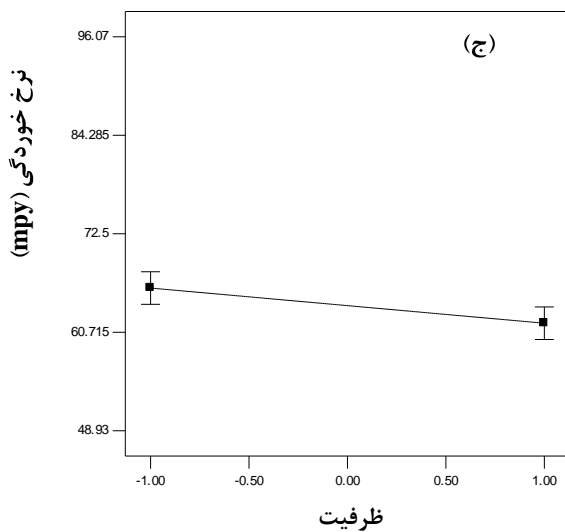
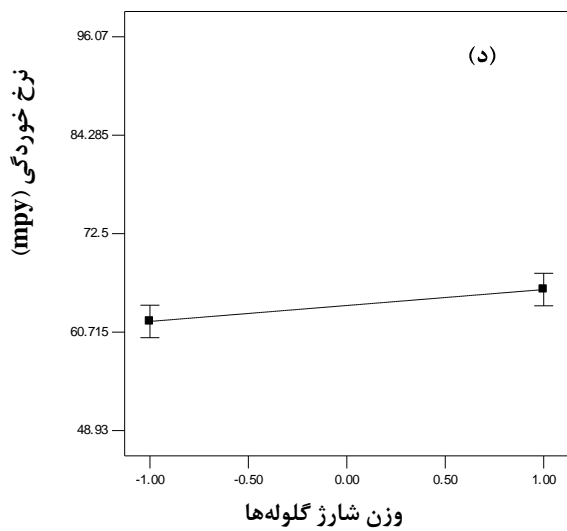
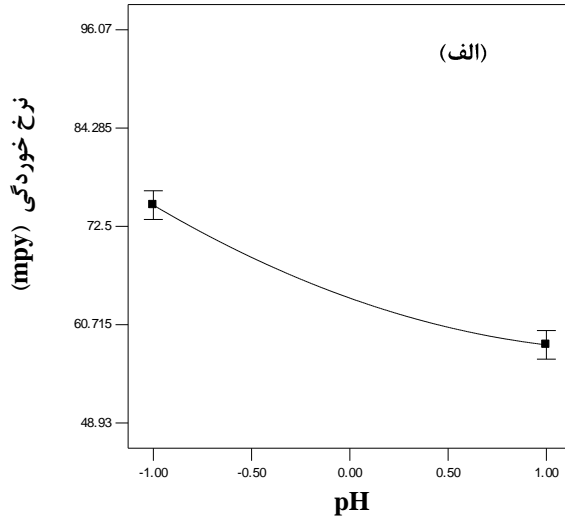
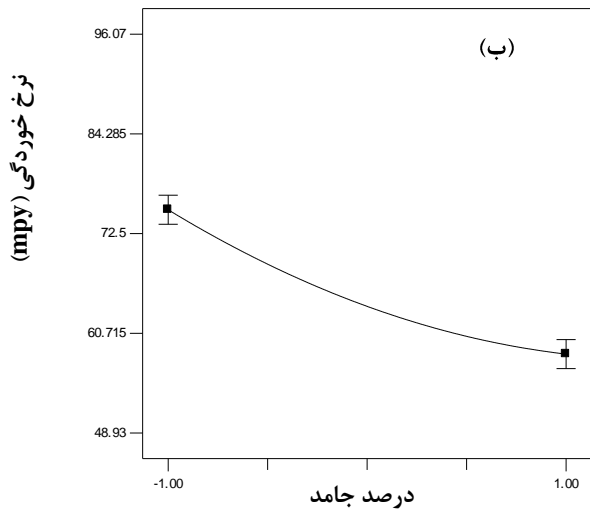
### ۳-۴-۷. بررسی تاثیر فاکتورها بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی

با توجه به انتخاب مدل رگرسیون مناسب برای ارتباط متغیر پاسخ (نرخ خوردگی گلوله‌ها) با پارامترهای مهم، اطمینان از برازش مناسب مدل، شناسایی پارامترهای مهم از طریق آنالیز واریانس و توزیع مناسب باقیمانده‌ها، باید به بررسی چگونگی تاثیر این پارامترها پرداخت.

نمودار تاثیرهای اصلی بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پائین و کربن-کروم بالا به ترتیب در شکل‌های (۵-۷) و (۶-۷) نشان داده‌اند. در شکل‌ها، خطوط عمودی که در ابتدای و انتهای نمودارها به شکل بازه نشان داده شده‌اند کم‌ترین فاصله معنی‌دار بودن را در سطح اعتماد ۹۵٪ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۵-۷) ملاحظه می‌شود فاکتورهای درصد جامد، pH، زمان خردایش و سرعت گردش آسیا به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پائین دارند، در حالی که ظرفیت و وزن شارژ گلوله‌ها تاثیر کمتری دارند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نمودار حاصل از فاکتور pH و وزن شارژ گلوله‌ها به صورت سهمی‌وار می‌باشد که این دلالت بر تاثیر توان دوم این پارامترها می‌باشد. ضمناً نمودار تاثیرهای اصلی در شکل (۵-۷) نشان می‌دهد که با افزایش pH و درصد جامد در محدوده مورد بررسی نرخ خوردگی بشدت کاهش می‌یابد. این امر احتمالاً بدان علت است که در مقادیر پائین درصد جامد و pH، میزان بیشتری اکسیژن در پالپ حل می‌شود و در نتیجه نرخ خوردگی گلوله‌ها افزایش می‌یابد، در حالی که در مقادیر بالا به علت تشکیل لایه غیر فعال از اکسید آهن فریک نرخ خوردگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این نمودار تاثیرهای اصلی نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت میزان خوردگی را کاهش می‌دهد، درحال که افزایش دیگر فاکتورهای مورد بررسی (زمان خردایش، وزن شارژ گلوله‌ها و سرعت گردش آسیا)، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهند. قابل ذکر است که نتایج مشابهی برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با کربن و کروم بالا نیز بدست آمد، با این تفاوت که نمودار درصد جامد و pH به صورت سهمی‌وار بوده و به صورت توان دوم بر نرخ خوردگی تاثیر دارد (شکل (۶-۷)).

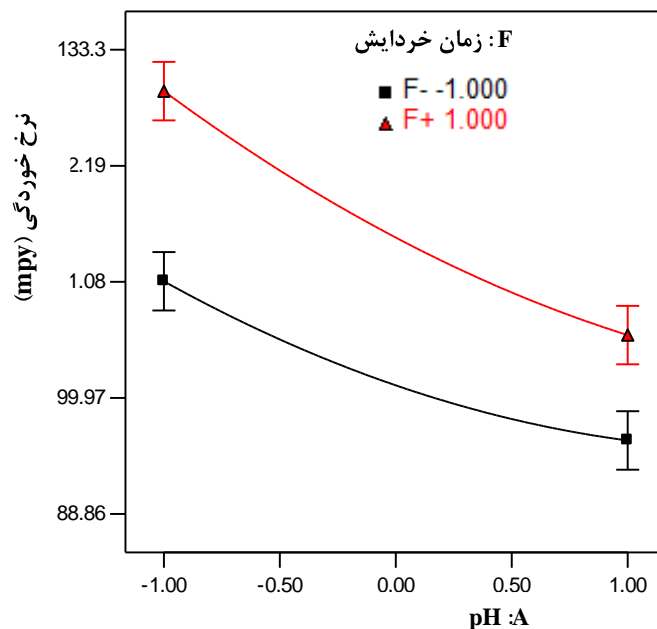


شکل (۷-۵): نمودار تاثیرهای اصلی بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

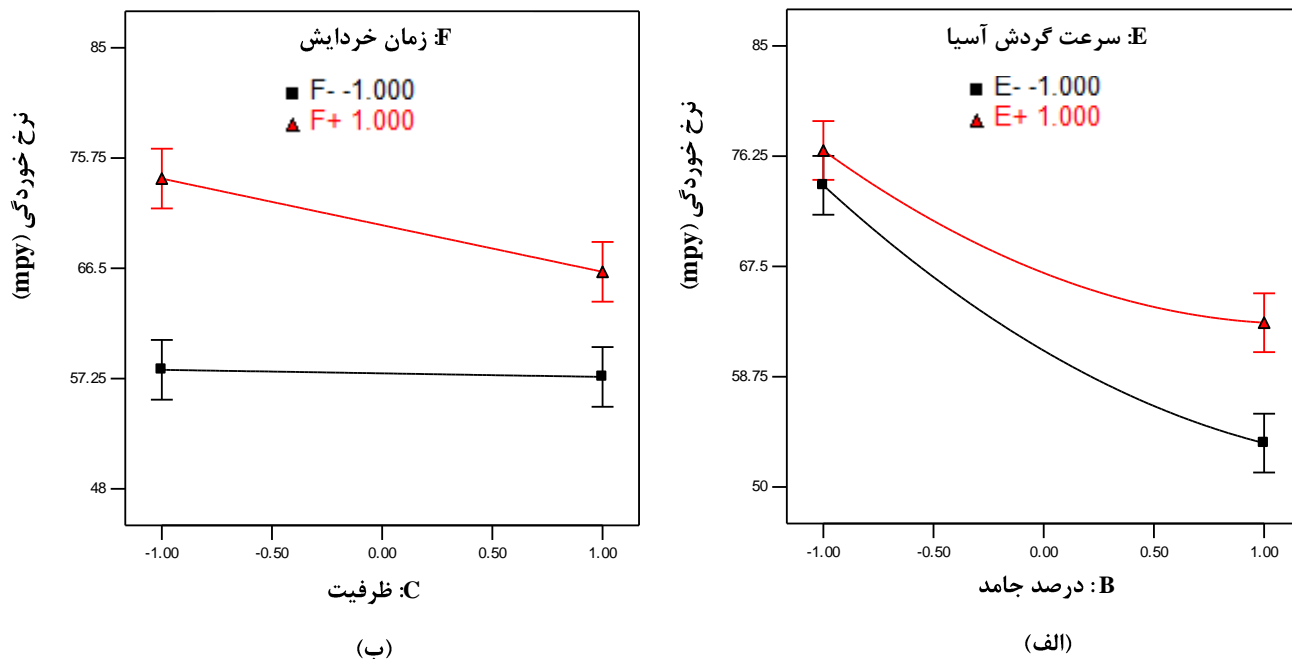


شکل (۶-۷): نمودار تاثیرهای اصلی بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با کربن و کروم بالا

علاوه بر تاثیرات اصلی پارامترها، اندرکنش فاکتورها نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل‌های (۷-۷) و (۸-۷) آورده شده‌اند. نتایج حاصل بیانگر آن است که اندرکنش pH و زمان خردایش تاثیر بسزایی بر خوردگی گلوله‌های آلیاژ پایین دارد. افزایش pH در سطوح بالا و پایین زمان خردایش (زمان‌های خردایش ۱۰ و ۱۵ دقیقه)، منجر به کاهش میزان خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین می‌شود (شکل (۷-۷)). اندرکنش درصد جامد و سرعت چرخش آسیا بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا نشان می‌دهد که افزایش درصد جامد در سطوح بالا و پایین سرعت-های گردش آسیا (سرعت‌های ۷۰ و ۸۰ دور بر دقیقه) سبب کاهش زیاد میزان خوردگی می‌شود (شکل (۸-۷ الف)). علاوه بر این اندرکنش ظرفیت و زمان خردایش روی نرخ خوردگی این گلوله‌ها نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت در سطح بالای زمان خردایش، نرخ خوردگی کاهش می‌یابد در حالی که در سطح پایین زمان خردایش، تاثیر کمی بر نرخ خوردگی دارد (شکل (۸-۷ ب)).



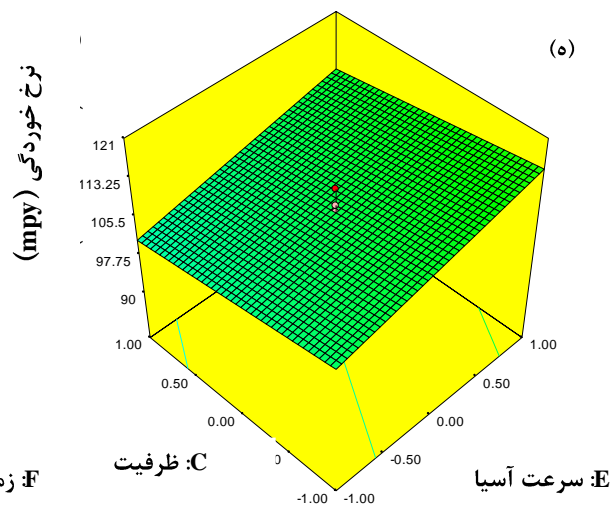
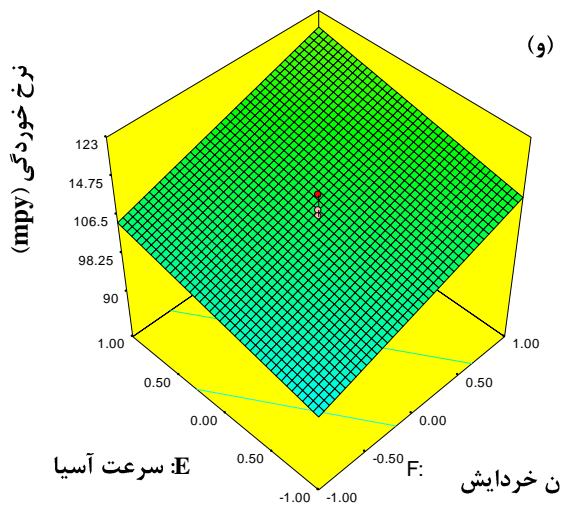
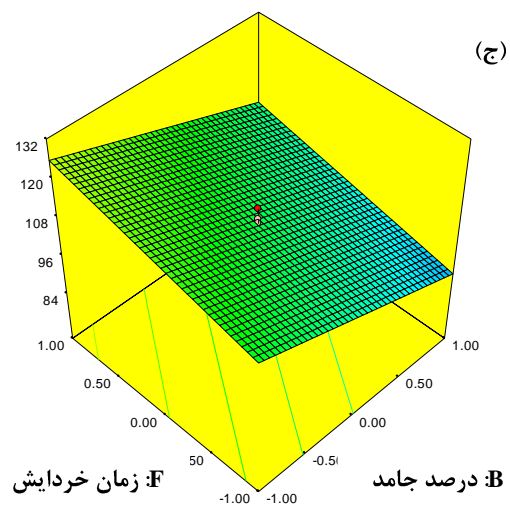
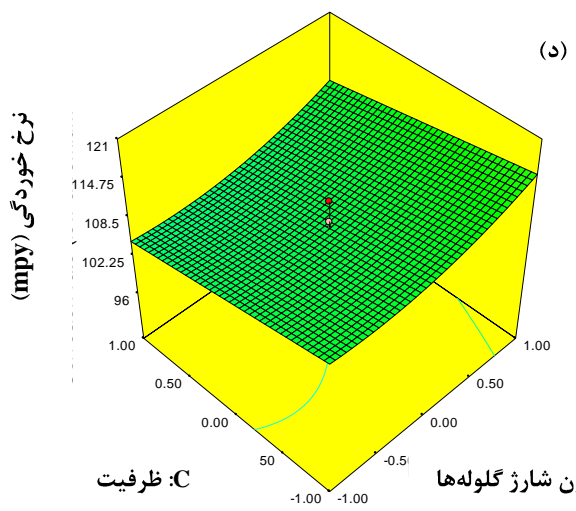
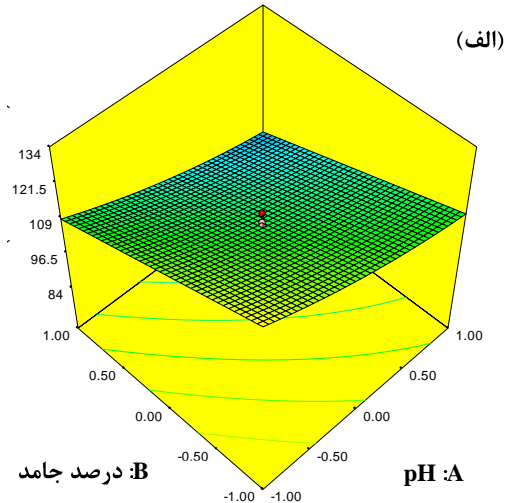
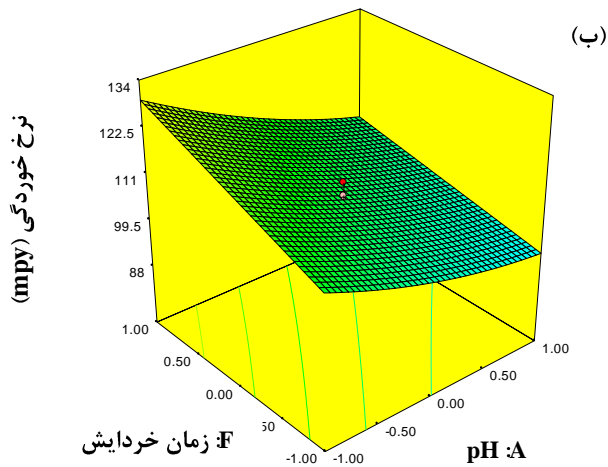
شکل (۷-۷): نمودار اثر متقابل pH-درصد جامد بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین



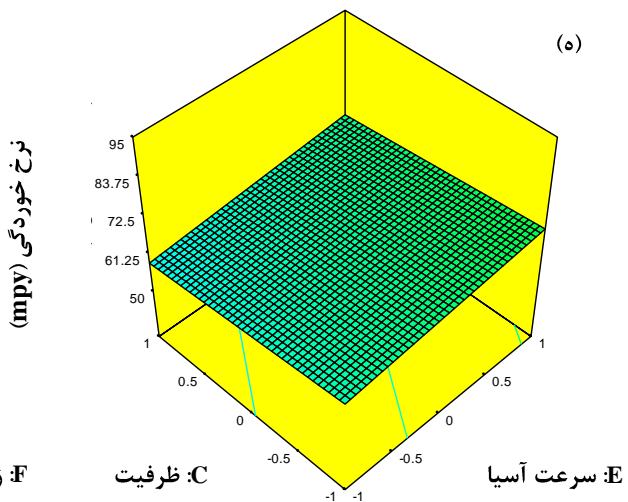
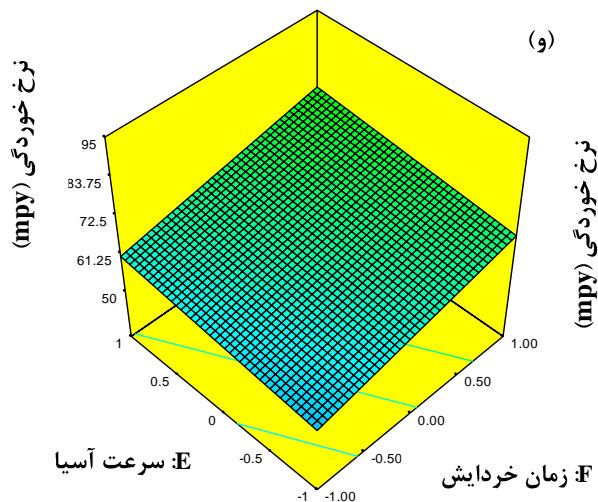
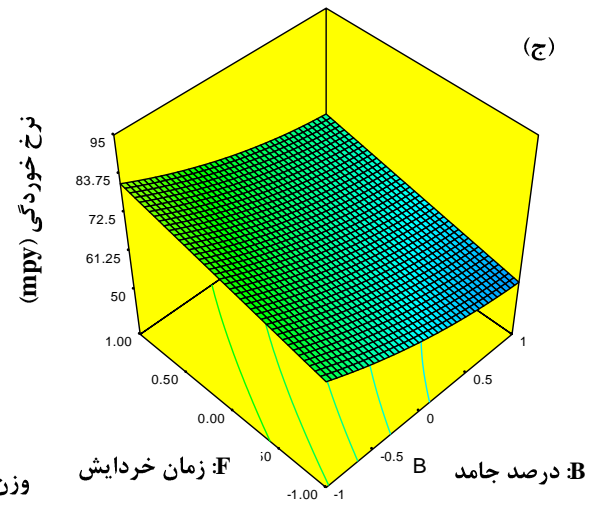
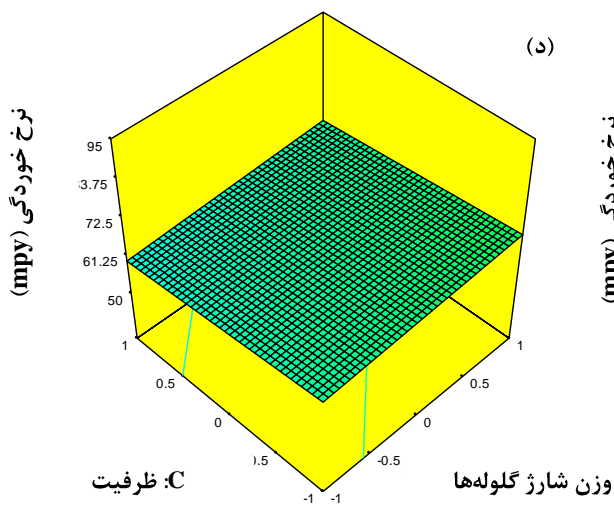
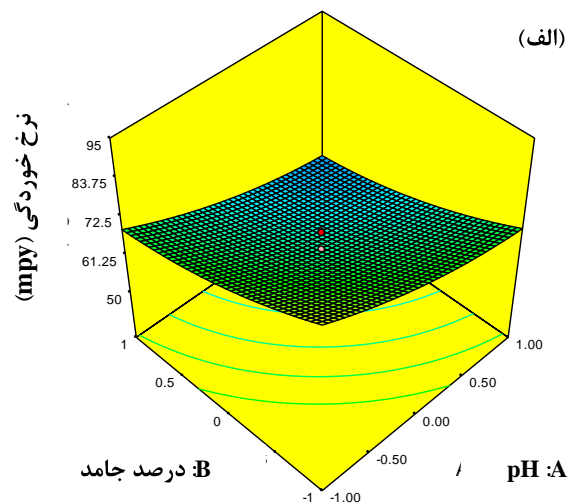
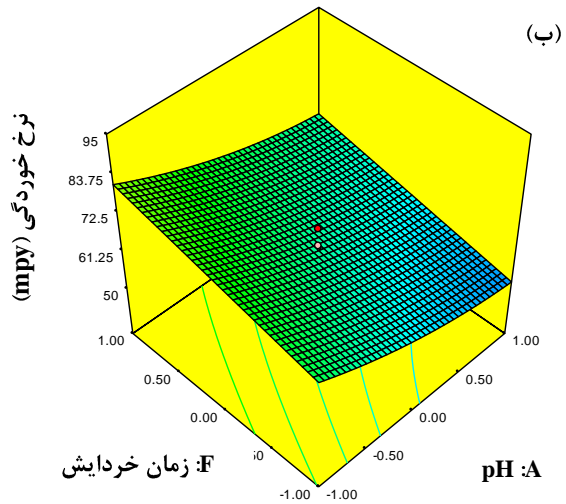
شکل (۷-۸): نمودار اثر متقابل درصد جامد-سرعت گردش آسیا (الف) و ظرفیت-زمان خردایش (ب) بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن-کروم بالا

تفسیرهای انجام شده و نتایج بدست آمده از جداول (۷-۴) و (۷-۵) و شکل‌های (۷-۵) تا (۷-۸) از طریق نمودار سطوح هم تراز که در آن دو فاکتور دو به دو در مقابل پاسخ خروجی (نرخ خوردگی) رسم می‌شوند، بیشتر می‌تواند قابل درک باشد. نمودارهای سطوح تراز فاکتورها در برخی از حالت‌ها برای نرخ خوردگی هم گلوله‌های با آلیاژ پایین و هم کربن و کروم بالا در شکل‌های (۷-۹) و (۷-۱۰) و حالت‌های دیگر در شکل‌های (۱) و (۲) در پیوست (ب) آورده شده‌اند. این شکل‌ها حالتی از شبیه-سازی معادلات (۷-۳) و (۷-۴) می‌باشند که تاثیر فاکتورهای فرآیند را روی نرخ خوردگی گلوله‌ها توصیف می‌کنند.

شکل (۷-۹) نشان می‌دهد که: (۱) در مقادیر پایین pH و درصد جامد، شاهد بالاترین نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین هستیم، (الف)، (۲) در سطح بالا و پایین زمان خردایش، میزان خوردگی به صورت سهمی وار با افزایش pH و به صورت خطی با افزایش درصد جامد و کاهش سرعت چرخش آسیا، کاهش می‌یابد (ب و ج)، و (۳) در سطح بالا و پایین وزن شارژ گلوله‌ها و سرعت گردش آسیا، با کاهش ظرفیت نرخ خوردگی به ترتیب به صورت سهمی و خطی کاهش می‌یابد (د و ه).



شکل (۷-۹): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بر اساس فاکتورهای pH-درصد جامد (الف)، pH-زمان خردایش (ب)، درصد جامد-زمان خردایش (ج)، وزن شارژ گلوله‌ها-ظرفیت (د)، سرعت آسیا-ظرفیت (ه) و زمان خردایش-سرعت آسیا (و)



شکل (۷-۱۰): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا بر اساس فاکتورهای pH- درصد جامد (الف)، pH-زمان خردایش (ب)، درصد جامد-زمان خردایش (ج)، وزن شارژ گلوله‌ها-ظرفیت (د)، سرعت آسیا-ظرفیت (ه) و زمان خردایش-سرعت آسیا (و)



شکل (۷-۱۰) سطوح تراز نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا را ارائه می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای رسیدن به شرایط مطلوب (حداقل نرخ خوردگی)، نتایجی مشابه آنچه که برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین مشاهده شد، بدست می‌آید، با این تفاوت که در سطح بالا و پایین وزن شارژ گلوله‌ها، کاهش ظرفیت به صورت خطی می‌باشد و در سطح بالا و پایین زمان خردایش، نرخ خوردگی به صورت سهمی‌وار با افزایش درصد جامد، کاهش می‌یابد.

## ۷-۵. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند

مهم‌ترین هدف، بعد از مدل‌سازی و تعیین ارتباط بین پارامترها با نرخ فرسایش حاصل از خوردگی بار خردکننده (گلوله‌های فولادی)، بهینه‌سازی عددی شرایط عملیاتی (حداقل کردن نرخ خوردگی گلوله‌ها) است. بدین معنی که بازه سطوح پارامترهای در نظر گرفته شده در چه مقداری تنظیم شود تا پاسخ آزمایش‌ها مطلوب‌تر گردد که دستیابی به این هدف با بکارگیری از اصول طراحی آزمایش‌ها و استفاده از نرم افزار Design Expert امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین برای رسیدن به این شرایط مطلوب و مینیمم نرخ خوردگی گلوله‌ها، آنالیز داده‌ها با استفاده از این نرم افزار انجام شد. نرم‌افزار به تحلیل نتایج مطابق با آزمایش‌ها پرداخته و در پایان ۵ راه حل پیشنهادی با استفاده از این نرم‌افزار ارائه گردید (جدول (۷-۶) و (۷-۷)).

جدول (۷-۶): آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه توسط نرم افزار بر اساس مقادیر کد برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین

| شماره آزمایش | pH   | درصد جامد (%) | ظرفیت (g) | وزن شارژ گلوله‌ها (kg) | سرعت آسیا (rpm) | زمان خردایش (min) | نرخ خوردگی (mpy) | مطلوبیت (%) |
|--------------|------|---------------|-----------|------------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------|
| ۱            | ۰/۷۸ | ۱             | ۱         | -۰/۳۸                  | -۰/۹۹           | -۱                | ۷۸/۳۸            | ۰/۹۹۶       |
| ۲            | ۱    | ۰/۹۸          | ۰/۶۱      | -/۵۱                   | -۱              | -۰/۹۷             | ۷۸/۸۶            | ۰/۹۸۹       |
| ۳            | ۱    | ۱             | -۰/۳۲     | -۰/۴۴                  | -۱              | -۰/۸۱             | ۸۱/۹۲۵           | ۰/۹۴۶       |
| ۴            | ۱    | ۰/۸۹          | ۱         | ۰/۸۳                   | -۰/۹۶           | -۱                | ۸۳/۲۸۱           | ۰/۹۲۶       |
| ۵            | ۰/۱۲ | ۱             | ۱         | ۰/۶۵                   | -۰/۷۷           | -۱                | ۸۶/۳۴۴           | ۰/۸۸۲       |

جدول (۷-۷): آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه توسط نرم افزار بر اساس مقادیر کد برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا

| شماره آزمایش | pH | درصد جامد (%) | ظرفیت (g) | وزن شارژ گلوله‌ها (kg) | سرعت آسیا (rpm) | زمان خردایش (min) | نرخ خوردگی (mpy) | مطلوبیت |
|--------------|----|---------------|-----------|------------------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|
| ۱            | ۱  | ۰/۹۷          | ۰/۸۸      | -۱                     | -۱              | -۰/۷۵             | ۴۰/۷۶            | ۰/۹۹    |
| ۲            | ۱  | ۱             | -۰/۰۱     | -۰/۱۴                  | -۱              | -۱                | ۴۱/۳۹۵           | ۰/۹۸۲   |
| ۳            | ۱  | ۱             | -۰/۸۸     | -۰/۸۹                  | -۰/۸۲           | -۱                | ۴۱/۰۹۸           | ۰/۹۶۲   |
| ۴            | ۱  | ۱             | ۱         | ۰/۴                    | -۰/۷۵           | ۰/۱۴              | ۴۸/۳۴۱           | ۰/۸۹۶   |
| ۵            | ۱  | ۰/۹۹          | -۱        | ۰/۷۴                   | -۰/۹۹           | -۰/۳۶             | ۴۸/۵۸۱           | ۰/۸۶۸   |

جداول (۷-۶) و (۷-۷) به ترتیب آزمایش‌های شرایط بهینه پیشنهادی توسط نرم افزار را برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پائین و کربن و کروم بالا را ارائه می‌دهند. در این جداول، شرایط آزمایش اول به عنوان شرایط اپتیمم (بهینه) انتخابی بر اساس آزمایش‌های تعیین شده توسط نرم‌افزار است که اگر شرایط در این مقادیر تنظیم شود، حداقل نرخ خوردگی پیش‌بینی می‌شود. به منظور اعتبار سنجی مدل، آزمایش شرایط نقطه اپتیمم انتخابی با تغییر بسیار کمی با ۳ بار تکرار انجام گرفت که نتیجه حاصل از تخمین و تصدیق مدل در جدول (۷-۸)، هم برای مدل حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پائین و هم برای گلوله‌های حاوی کربن و کروم بالا آورده شده است.

جدول (۷-۸): سطح اپتیمم پیشنهادی برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پائین (LS) و گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا (HS) بوسیله مدل به همراه آزمایش‌های اعتبار سنجی مدل بر اساس مقادیر کد و واقعی

| نرخ خوردگی (mpy) | زمان خردایش (min) | سرعت آسیا (rpm) | وزن شارژ گلوله‌ها (kg) | ظرفیت (g) | درصد جامد (%) | pH   | فاکتورها              |
|------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-----------|---------------|------|-----------------------|
|                  |                   |                 |                        |           |               |      | پیش‌بینی و اعتبار مدل |
| ۷۸/۳۸            | -۱                | -۰/۹۹           | -۰/۳۸                  | ۱         | ۱             | ۰/۷۸ | پیش‌بینی مدل (LS)     |
|                  | ۱۰                | ۷۰/۰۵           | ۹/۲۵                   | ۷۲۰       | ۴۰            | ۹/۸  |                       |
| ۷۷/۰۷            | ۱۰                | ۷۰              | ۹                      | ۷۲۰       | ۴۰            | ۹/۵  | اعتبارسنجی مدل (LS)   |
| ۴۰/۷۶            | -۰/۷۵             | -۱              | -۱                     | ۰/۸۸      | ۰/۹۷          | ۱    | پیش‌بینی مدل (HS)     |
|                  | ۱۰/۶۳             | ۷۰              | ۸                      | ۶۹۸/۴     | ۳۹/۸۵         | ۱۰   |                       |
| ۴۱/۴۴            | ۱۰/۵              | ۷۰              | ۸                      | ۷۰۰       | ۴۰            | ۱۰   | اعتبارسنجی مدل (HS)   |

## فصل هشتم:

جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها

چنانچه تشریح گردید خوردگی یکی از مکانیزم‌های عمده فرسایش بار خردکننده در آسیاکنی به روش تر بویژه در آسیاهای گلوله‌ای می‌باشد که این موضوع در خردایش کانه‌های سولفیدی حادث است. با توجه اهمیت موضوع، این تحقیق به مطالعه خوردگی گلوله‌های فولادی، فاکتورهای موثر بر آن، مدل‌سازی خوردگی گلوله‌ها برای کمینه کردن میزان خوردگی و مطالعه اندرکنش‌های الکتروشیمیایی بین کانی‌ها و گلوله‌های فولادی در خردایش کانسنگ مس سرچشمه به عنوان مطالعه موردی پرداخته شد. از طرفی چون رفتار الکتروشیمیایی مرحله آسیاکنی، اثر مهم و قابل توجهی بر بازیابی فلوتاسیون و انتخاب‌پذیری کانی‌های سولفیدی دارد و خواص سطحی کانی‌های سولفیدی را می‌توان بوسیله تغییر در وضعیت‌های الکتروشیمیایی مرحله آسیا کنترل کرد، لذا در این رساله رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش کانی‌های سولفیدی که ارتباط تنگاتنگی با پدیده خوردگی گلوله‌ها در آسیاها دارد، مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف فوق‌الذکر سیستم خردایش الکتروشیمیایی ویژه‌ای در مجتمع مس سرچشمه طراحی و ساخته شد. در ادامه به جمع‌بندی نتایج این بررسی‌ها که در فصل‌های ۵، ۶ و ۷ به طور کامل تجزیه و تحلیل شدند، اشاره می‌گردد و در انتها نوآوری‌های حاصل از این تحقیق به همراه پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه می‌شود.

## ۸-۲. جمع‌بندی نتایج حاصل از مطالعه رفتار الکتروشیمیایی محیط خردایش کانه مس

### سولفیدی

مطالعه رفتار الکتروشیمیایی محیط آسیای کانه مس سولفیدی سرچشمه از سه دیدگاه: (۱) تعیین خصوصیات الکتروشیمیایی محیط خردایش یعنی اندازه‌گیری پتانسیل پالپ (Eh)، پتانسیل مدار باز (OCP) و غلظت اکسیژن محلول پالپ (DO) تحت شرایط مختلف فرآیند آسیا و تاثیر شیمی خردایش (pH پالپ، درصد جامد، شیمی آب مورد استفاده در آسیا و نوع هوادهی به سیستم خردایش) و نوع گلوله فولادی بر خصوصیات الکتروشیمیایی، (۲) بررسی رفتار اکسیداسیون گلوله‌های

فولادی و کانی‌های پیریت و کالکوپیریت و همچنین برهم‌کنش‌های گالوانیکی بین گلوله‌ها و کانی‌ها در خردایش کانه مس با استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون و تخمین میزان انواع آهن اکسیدی داخل آسیا بوسیله استخراج کننده EDTA، و ۳) تاثیر محیط خردایش کانه بر فرآیند فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که:

✓ نوع گلوله فولادی و شرایط هوادهی (اکسیژن، هوا و نیتروژن) به شدت پتانسیل پالپ، پتانسیل استراحت و غلظت اکسیژن محلول پالپ را تحت تاثیر قرار می‌دهد و با تغییر این پارامترها یک محیط اکسایشی-کاهشی را در طول خردایش ایجاد می‌کند.

✓ تغییر نوع آب از آب معمولی (شیر) به آب یک بار تقطیر شده و افزایش pH و درصد جامد پالپ آسیا یک محیط کاهنده را در داخل آسیا با کاهش پتانسیل پالپ و اکسیژن محلول بوجود آورد.

✓ برهم‌کنش‌های گالوانیکی بین گلوله‌های فولادی و کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت با تعیین جریان گالوانیک بوسیله تکنیک پلاریزاسیون پتانسیودینامیک به صورت کمی در آمد.

✓ تغییر شرایط هوادهی از اکسیژن به هوا و به نیتروژن، تغییر نوع گلوله فولادی از گلوله آلیاژ پایین به کربن و کروم بالا، تغییر نوع آب به آب مقطر (آب یک بار تقطیر شده) و افزایش pH و درصد جامد پالپ، جریان گالوانیک بین کانی و گلوله‌ها را کاهش داد که این امر به دلیل لایه غیرفعالی از اکسید فریک می‌باشد که بر روی سطح کانی‌ها و گلوله‌ها تشکیل شده و از اکسایش بیشتر آن جلوگیری می‌کند. علاوه بر این‌ها تغییر مینرالوژی کانه به شدت اندازه گالوانیک بین کانی‌ها و گلوله‌ها را تحت تاثیر قرار داد.

✓ انواع آهن اکسیدی تولید شده از کانی‌ها و گلوله‌ها که بر فرآیند بعدی یعنی فلوتاسیون تاثیر می‌گذارد با استفاده از تکنیک استخراج با EDTA به عنوان یک معیاری از اندازه‌گیری خوردگی سیستم تعیین شد. در آزمایش‌ها مشاهده گردید که یک ارتباط خطی بین جریان گالوانیک و درصد آهن قابل استخراج بوسیله EDTA وجود دارد و کلیه روندهای مشاهده شده در جریان گالوانیک برای آهن اکسیدی تولید شده در آسیا نیز ملاحظه شد.

- ✓ هنگامی که کانه مس سولفیدی با گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا در حضور نیتروژن خرد شد، بیش‌ترین بازیابی مس در فرآیند فلوتاسیون بدست آمد.
- ✓ بازیابی‌های مس کمتری در خردایش با گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین نسب به گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا مشاهده شد. این تاثیر گلوله‌های فولادی یا به انواع اکسید فلزی تولید شده از گلوله نسبت داده می‌شود که سبب کاهش بازیابی فلوتاسیون می‌شود و یا به انواع اکسید غنی از سولفور تولید شده از کانی نسبت داده می‌شود که موجب افزایش بازیابی فلوتاسیون کانی می‌شود.
- ✓ نتایج نشان داد با افزایش pH و درصد جامد پالپ، قابلیت شناورسازی مس افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که نوع آب در مرحله خردایش روی بازیابی مس تاثیر دارد به گونه‌ای که با تغییر نوع آب از آب شیر به آب یک بار تقطیر شده سبب افزایش بازیابی مس می‌شود.
- ✓ اندازه گالوانیک بزرگتر میان کانی و گلوله‌ها در آسیا منجر به میزان بیشتری آهن اکسیدی تولید شده از کانی و گلوله در آسیا و نیز سبب کاهش بیشتر بازیابی مس در فرآیند فلوتاسیون می‌شود.
- ✓ معادله رگرسیون  $y = -12.7 \ln(x) + 48.72, R^2 = 0.975$  برای ارتباط میان بازیابی مس (y) و میزان انواع آهن اکسیدی تولید شده در تخلیه آسیا (x) بدست آمد.
- ✓ در آزمایش‌های لیچینگ EDTA بعد از فرآیند خردایش کانه مس و کانی خالص پیریت مشاهده شد که به طور متوسط ۷۳/۵۱ درصد محصولات خوردگی تولید شده در آسیای گلوله‌ای از گلوله‌های فولادی می‌باشد.

### ۳-۸. جمع‌بندی نتایج حاصل از فاکتورهای موثر بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های

#### فولادی

پارامترهای بسیار زیادی بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی تاثیر دارند که در این رساله ابتدا ۲۷ فاکتور مهم شناسایی و به طور کیفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس تعدادی از فاکتورهای مهم و موثرتر که قابل کنترل بودند به صورت کمی بررسی شدند.

نتایج ارزیابی کیفی فاکتورها براساس قضاوت کارشناسان (روش دلفی فازی) و تحقیقات پیشین نشان داد:

✓ به ترتیب ترکیب و خصوصیات متالورژیکی بار خردکننده، برهم کنش گالوانیکی بین بار خردکننده و کانی، مینرالوژی کانه، شیمی آب، pH، Eh، درصد جامد، اندازه واسطه خردایش و شرایط مختلف هوادهی به آسیا بیشترین درجه اهمیت را در فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها دارند، ولی نوع تخلیه، قطر آسیا و شکل ذرات از درجه اهمیت کمتری برخوردارند. فاکتورهای pH، درصد جامد، نوع هوادهی به سیستم خردایش، نوع آب، ظرفیت، زمان خردایش، سرعت گردش آسیا، اندازه ذرات، نوع گلوله، توزیع دانه‌بندی گلوله و شارژ گلوله به طور کمی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که:

✓ با افزایش pH و درصد جامد نرخ خوردگی شدیداً کاهش یافت که به خاطر ترسیب نمک آهن روی سطح گلوله می‌باشد. pH و درصد جامد پالپ خردایش به ترتیب با معادلات رگرسیون،  $Y = -2.521x^3 + 21.41x^2 - 64.73x + 160.3$  و  $Y = 0.052x^2 - 6.709x + 283.7$  به نرخ خوردگی مرتبط می‌شوند.

✓ همان‌طور که انتظار می‌رفت تغییر شرایط هوادهی از اکسیژن به هوا و نیتروژن میزان خوردگی را کاهش داد. چراکه اکسیژن‌دهی شدیداً پتانسیل پالپ و محتوای اکسیژن محلول در پالپ را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش اتلاف بار خردکننده می‌گردد.

✓ نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با افزایش زمان خردایش مطابق معادله رگرسیون  $Y = -0.082x^2 + 5.419x + 56.97$  افزایش یافت.

✓ افزایش ظرفیت بار ورودی، نرخ خوردگی گلوله‌ها را کاهش داد. البته این کاهش در میزان خوردگی روند ملایمی داشت. کاهش میزان خوردگی گلوله‌ها با افزایش ظرفیت، احتمالاً بخاطر فضای حرکت گلوله‌ها می‌باشد که در ظرفیت‌های بالا کاهش می‌یابد، بنابراین احتمال تماس بین گلوله‌ها و ذرات کمتر شده و سبب کاهش نرخ خوردگی گلوله‌ها می‌شود.

✓ یک ارتباط خطی ( $Y = 1.945x - 35.16 \leftrightarrow R^2 = 0.977$ ) بین سرعت گردش آسیا و میزان خوردگی گلوله‌های فولادی بدست آمد.

✓ با افزایش وزن شارژ گلوله‌ها مشاهده شد، نرخ خوردگی ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک پیکی می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر گلوله‌ها، میزان خوردگی کاهش می‌یابد. این رفتار افزایش-کاهشی ممکن است با توجه به کاهش فضای حرکت گلوله‌ها و در نتیجه کاهش سطح جدید برای تماس میان گلوله و ذرات کانه با افزایش گلوله از یک میزان معینی باشد. این امر دلالت بر آن دارد که با شارژ مناسب گلوله می‌توان نرخ خوردگی گلوله‌ها را کاهش داد.

✓ با تغییر نوع آب و گلوله فولادی مورد استفاده در آسیا مشاهده شد که میزان خوردگی تغییر بسیاری می‌یابد. تغییر نوع آب از آب معمولی به آب مقطر و نوع گلوله از گلوله فولادی آلیاژ پایین به گلوله کربن و کروم بالا میزان خوردگی به شدت کاهش می‌یابد.

✓ تاثیر اندازه ذرات و گلوله‌های فولادی نشان داد که اولاً حضور ذرات ریز در داخل آسیا و همچنین استفاده از گلوله‌های ریزتر برای خردایش نرخ خوردگی گلوله‌ها را افزایش می‌دهد. این رفتار به این دلیل است که با کاهش ذرات و ابعاد گلوله، سطح موثر تماس گلوله با ذرات افزایش یافته، در نتیجه گلوله سریع‌تر اکسید می‌شود و ثانیاً تاثیر این فاکتورها نسبت به فاکتورهای دیگر از درجه اهمیت کمتری برخوردار بود.

✓ سهم مکانیزم خوردگی از فرسایش کل گلوله‌های فولادی در خردایش کانه مس سولفیدی، ۲۷/۶۸ درصد بدست آمد.

#### ۸-۴. جمع‌بندی نتایج حاصل از مدل‌سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی

مدل‌سازی فرسایش حاصل از خوردگی برای دو نوع گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین و گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا به منظور شناخت بیشتر و پیش‌بینی رفتار خوردگی، ارتباط ریاضی میان پارامترهای موثر و نرخ خوردگی و همچنین برای حداقل کردن میزان خوردگی گلوله‌ها انجام



شد. در این ارتباط ۶ فاکتور مهم و موثر که قابل کنترل و به طور کمی قابل تغییر بودند، انتخاب و مدل‌سازی با استفاده از روش طراحی آماری آزمایش‌ها با بهره‌گیری از مدل سطح - پاسخ و روش طرح مرکب مرکزی انجام شد. پیش از این ارزیابی کمی فاکتورها به این گونه بود که یک فاکتور در چند میزان تغییر داده می‌شد درحالی‌که بقیه فاکتورها ثابت بودند و از تاثیر اندرکنش فاکتورها اطلاعی موجود نبود. امکان بررسی تاثیر اندرکنش فاکتورها بر میزان خوردگی و اینکه اگر پارامترهای مهم در چند سطح به طور هم‌زمان تغییر داده شوند چه تاثیری بر خروجی سیستم یعنی خوردگی دارند بوسیله مدل‌سازی با طراحی آماری آزمایش‌ها فراهم گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد:

✓ به ترتیب اثرات خطی درصد جامد، pH، زمان خردایش، سرعت گردش آسیا، شارژ گلوله‌ها و ظرفیت، اثرات quadratic (درجه دومی) pH و وزن شارژ گلوله‌ها و اثرات متقابل یا هم‌زمان pH و زمان خردایش به طور آماری مهم‌ترین پارامترها در سطح اعتماد ۹۵٪ بر فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بودند.

✓ اثرات خطی همه فاکتورهای مورد بررسی، اثر متقابل بین درصد جامد و سرعت چرخش آسیا، اثر متقابل بین ظرفیت بار ورودی و زمان خردایش و اثرات درجه دومی pH و درصد جامد، فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن-کروم بالا بودند.

✓ برای هم‌گلوله فولادی آلیاژ پایین و هم‌گلوله فولادی کربن و کروم بالا مشاهده شد، با افزایش pH و درصد جامد در محدوده مورد بررسی نرخ خوردگی شدیداً کاهش می‌یابد. این رفتار به این دلیل است که در مقادیر پایین درصد جامد و pH، میزان بیشتری اکسیژن در پالپ حل می‌شود و در نتیجه نرخ خوردگی گلوله‌ها افزایش می‌یابد در حالی‌که در مقادیر بالا به علت تشکیل لایه غیرفعال از اکسید آهن فریک نرخ خوردگی کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش ظرفیت هم‌میزان خوردگی کاهش می‌یابد. افزایش دیگر فاکتورهای مورد بررسی (زمان خردایش، وزن شارژ گلوله‌ها و سرعت گردش آسیا)، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد.

✓ اندرکنش pH و زمان خردایش به شدت روی خوردگی گلوله‌های آلیاژ پایین تاثیر دارد. افزایش pH در سطوح بالا و پایین زمان خردایش، منجر به کاهش میزان خوردگی گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین می‌شود.

✓ اندرکنش درصد جامد و سرعت چرخش آسیا بر روی نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا نشان داد که افزایش درصد جامد در سطوح بالا و پایین سرعت‌های گردش آسیا به مقدار قابل توجهی میزان خوردگی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این اندرکنش ظرفیت و زمان خردایش روی نرخ خوردگی این گلوله‌ها نشان داد که افزایش ظرفیت در سطح بالای زمان خردایش، نرخ خوردگی کاهش می‌یابد در حالی که در سطح پایین زمان خردایش، تاثیر کمی بر نرخ خوردگی دارد.

✓ مدل ریاضی حاصل از مدل‌سازی فرسایش خوردگی برای گلوله‌های فولادی آلیاژ پایین با ضریب تعیین  $(R^2)$  ۰/۹۰۵۵، عبارت است از:

$$CR = +108.25 - 9.65 \times A - 10.57 \times B - 2.65 \times C + 2.71 \times D + 4.39 \times E + 7.07 \times F - 2.03 \times A \times F + 2.34 \times A^2 + 2.09 \times D^2$$

در حالی که مدل ریاضی برای نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا با ضریب تعیین  $(R^2)$  ۰/۹۱۱۰، عبارت است از:

$$CR = +63.90 - 8.38 \times A - 8.53 \times B - 2.1 \times C + 1.91 \times D + 3.08 \times E + 6.21 \times F + 1.70 \times B \times E - 1.81 \times C \times F + 2.77 \times A^2 + 2.89 \times B^2$$

✓ برای بررسی صحت مدل‌های برازش شده، در پیش‌بینی مقادیر متغیر پاسخ به ازای سطوح مختلف فاکتورها، نمودارهای حاصل از باقیمانده‌ها (تفاوت مقادیر بدست آمده به وسیله مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها) مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی حاصل از نمودارها نشان داد که مدل‌های انتخابی، نرخ‌های خوردگی گلوله‌ها را در محدوده پارامترهای مورد بررسی به خوبی پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر این نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از عدم برازش مدل،

ضریب تعیین، ضریب تعیین تعدیلی و دقت کافی نشان داد که چطور مدل خوب بر روی داده‌ها برازش شده است.

مهم‌ترین هدف از انجام آزمایش‌ها، کمینه کردن میزان خوردگی گلوله‌های فولادی بوده است. نتایج آزمایش‌های بهینه‌سازی نشان داد که کمترین میزان خوردگی،  $78/38$  هزارم اینچ در سال (mpy)، مطابق پیش‌بینی مدل برای گلوله‌های آلیاژ پایین در مقادیر  $pH=9/8$ ، درصد جامد  $40\%$ ، ظرفیت  $720$  گرم، وزن شارژ گلوله  $9/25$  کیلوگرم، سرعت گردش آسیا  $70$  دور بر دقیقه و زمان خردایش  $10$  دقیقه بدست می‌آید. در حالی که برای گلوله‌های فولادی حاوی کربن و کروم بالا کمترین میزان خوردگی  $40/76$  هزارم اینچ در سال (mpy) در سطوح،  $pH=10$ ، درصد جامد  $40\%$ ، ظرفیت  $698/4$  گرم، شارژ گلوله  $8$  کیلوگرم، سرعت گردش آسیا  $70$  دور بر دقیقه و زمان خردایش  $10/63$  دقیقه حاصل می‌شود.

## ۸-۵. جنبه‌های نوآوری تحقیق

جنبه‌های نوآوری این رساله به شرح ذیل بیان می‌شوند:

(۱) سهم مکانیزم خوردگی از فرسایش کل گلوله‌های فولادی در خردایش کانه سولفیدی برای اولین بار به طور کمی بیان گردید و مشخص شد که  $27/68$  درصد یعنی بیش از  $1/4$  از فرسایش گلوله‌های فولادی را مکانیزم خوردگی تشکیل می‌دهد.

(۲) در مطالعه الکتروشیمی و خوردگی گلوله‌های فولادی برای اولین بار گزارش داده شد که به طور متوسط  $3/4$  (۷۳/۵ درصد) از محصولات خوردگی حاصل از اکسایش گلوله‌های فولادی هستند. بنابراین تعیین سهم محصولات خوردگی حاصل از گلوله فولادی یکی دیگر از دستاوردهای مهم این مطالعه می‌باشد که می‌توان از آن در مقیاس صنعتی نیز بهره گرفت.

(۳) پارامترهای الکتروشیمیایی آسیا شامل (پتانسیل پالپ، پتانسیل استراحت و غلظت اکسیژن محلول) در خردایش یک کانه مس سولفیدی پورفیری مورد بررسی قرار گرفت. در این ارتباط

مشخص شد که پیش از این تاثیر دو فاکتور شیمی آب و مینرالوژی کانه بر ویژگی‌های الکتروشیمیایی (DO، Eh، OCP) محیط خردایش گزارش نشده بود.

#### ۸-۶. پیشنهادها

تحقیق حاضر جنبه‌های علمی بسیار با ارزشی را در زمینه‌های الکتروشیمی محیط خردایش کانه (یا کانی‌های) سولفیدی مس، اندرکنش‌های بین کانی‌ها با گلوله‌های فولادی و نیز اندرکنش‌های بین خود کانی‌ها، فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌ها شامل فاکتورهای موثر بر آن، محصولات حاصل از خوردگی، مدل‌سازی و کنترل خوردگی گلوله‌ها و تاثیر این عوامل بر فلوتاسیون و بازیابی کانی‌های با ارزش، در اختیار قرار می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده در این رساله، پیشنهاد می‌شود:

✓ با کنترل ویژگی‌های الکتروشیمیایی داخل آسیا شامل پتانسیل پالپ، پتانسیل استراحت کانی‌ها و گلوله‌های فولادی، غلظت اکسیژن محلول و برهم‌کنش گالوانیکی بین پیریت و کالکوپیریت با گلوله‌های فولادی که با کنترل شیمی خردایش (pH، درصد جامد، شیمی آب، تزریق گازهای مختلف به سیستم خردایش) و پارامترهای دیگر مثل تغییر مینرالوژی کانه و استفاده از واسطه-های فولادی با کروم بالاتر امکان پذیر می‌باشد، می‌توان اولاً ویژگی‌های سطح کانی‌ها تغییر داد، ثانیاً انواع آهن اکسیدی یا بعبارتی محصولات خوردگی که حاصل اکسایش گلوله‌ها هستند را کاهش داد و نهایتاً منجر به شناورسازی بهتر کانی‌های با ارزش در فرآیند فلوتاسیون گردید.

✓ در این تحقیق مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر خوردگی گلوله‌های فولادی شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفتند و نشان داده شد که با کنترل پارامترهای مهم می‌توان میزان خوردگی که بخش اعظمی از فرسایش گلوله‌ها را به خود اختصاص می‌دهد، به حداقل رساند. از طرفی با توجه به اینکه خوردگی و سایش اثرات هم‌افزایی دارند با کاهش خوردگی، سایش نیز کاهش می‌یابد. البته این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و نتایج باید مقیاس صنعتی مورد آزمایش قرار گیرد،

ولی شواهد امر حاکی از آن است که با کنترل این فاکتورها و با استفاده از مدل‌های ارائه شده در مدل‌سازی خوردگی گلوله‌ها، می‌توان به نحو چشم‌گیری میزان خوردگی را کاهش داد.

✓ در این مطالعه از مدل‌سازی آماری به منظور مدل‌سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله‌های فولادی استفاده شد. پیشنهاد می‌گردد از روش‌های داده محور دیگر همانند روش‌های هوشمند (شبکه عصبی و ...) برای تخمین و مدل‌سازی خوردگی گلوله‌ها استفاده گردد.

✓ در این تحقیق در مدل‌سازی از ۶ فاکتور مهم شامل pH، درصد جامد، ظرفیت، وزن شارژ گلوله‌ها، سرعت گردش آسیا و زمان خردایش که قابل کنترل و کمی بودند به عنوان پارامترهای مدل استفاده شدند و ارتباط این پارامترها با نرخ خوردگی بوسیله یک معادله درجه دوم بدست آمد، توصیه می‌گردد به مدل‌سازی آماری که در آن علاوه بر پارامترهای کمی فوق الذکر از پارامترهای کیفی و به اصطلاح آماری category شامل توزیع دانه‌بندی ذرات، توزیع دانه‌بندی گلوله‌ها، مینرالوژی کانه، نوع آب مورد استفاده در آسیا و خصوصیات رئولوژی پالپ به عنوان پارامترهای مدل استفاده شود.

✓ هر چند این مطالعه بر روی خردایش کانه سولفیدی مس انجام شد، اما می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در خردایش کانه‌های دیگر هم بدهد بنابراین توصیه می‌گردد مطالعه مشابهی بر برهم کنش گالوانیکی بین کانی‌های سولفیدی و گلوله‌های فولادی در خردایش کانه‌های دیگر مانند آهن نیز انجام گیرد.

✓ این مطالعه نشان داد به راحتی می‌توان با استفاده از ابزار و روش‌های الکتروشیمیایی مانند منحنی‌های پلاریزاسیون، دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی گلوله‌های فولادی را بدست آورد. بنابراین پیشنهاد می‌شود مطالعه‌ای در مورد اعمال پتانسیل به سیستم خردایش در محدوده‌ی پتانسیل خوردگی انجام گیرد، زیرا با اعمال پتانسیلی بیشتر یا کمتر از محدوده‌ی پتانسیل خوردگی (پتانسیل اسراحت)، می‌توان سطح گلوله‌ها و کانی‌ها را کاندی‌تر یا آندی‌تر نمود و به این ترتیب خوردگی را کاهش داد.

✓ تاثیر فاکتورهای مهم (pH، درصد جامد، نوع کانه، نوع گلوله، نوع آب و ...) بر ویژگی‌های الکتروشیمیایی خردایش و متعاقباً تاثیر آنها بر فرآیند فلوتاسیون مس، عبارتی اهمیت محیط خردایش بر شناورسازی مس مورد بررسی قرار گرفت، اما این فاکتورها بهینه نشدند، لذا پیشنهاد می‌گردد که مطالعه‌ای به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فوق‌الذکر برای بهبود بهتر شناورسازی مس انجام گیرد.

## منابع

- آذر ع. و فرجی ح.، (۱۳۸۱) "علم مدیریت فازی"، مرکز مطالعات مدیریت و بهره‌وری ایران، چاپ اول، ۳۰۸ صفحه.
- آگوستین ا.، "شش سیگما و ابزارهای پیشرفته آن" ترجمه: پور حسین مجید، رئیسی محمد تقی، ۱۳۸۴، شرکت مشاورین بهین کیفیت پرداز تهران، ۴۱۶ صفحه.
- پیرون د. ل.، "الکتروشیمی خوردگی"، ترجمه: گل‌نزار محمد علی و ریاحی احمد رضا، ۱۳۷۸، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳۲۳ صفحه.
- تامسون ن. و پایر ج.، "روش‌های الکتروشیمیایی DC در آزمون‌های خوردگی"، ترجمه: احتشام زاده مریم و فهام مهدخت، ۱۳۸۸، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۹۹ صفحه.
- رضایی ب.، (۱۳۷۵) "فلوتاسیون"، انتشارات دانشگاه هرمزگان، چاپ اول، ۴۵۶ صفحه.
- زمانیان ر.، (۱۳۷۶) "خوردگی و روش‌های کنترل آن"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۵۹۸ صفحه.
- زید آبادی ص. و بنیسی ص.، (۱۳۸۰) "تاثیر اندازه ذرات خوراک سلول‌های پرعیارکنی اولیه بر بازیابی"، گزارش فصلی امور تحقیقات و مطالعات شرکت ملی صنایع مس ایران.
- سید رضی س. م.، (۱۳۷۵) "کنترل خوردگی در صنایع"، جلد اول، انتشارات انجمن خوردگی ایران، ۶۶۴ صفحه.
- شفائی س. ض.، (۱۳۸۳)، "استفاده از طراحی آماری آزمایش‌ها در تحقیقات مهندسی"، نخستین همایش فرآوری مواد معدنی.
- مفیدی ج.، (۱۳۷۲) "الکتروشیمی: اصول، روش‌های الکترومتری یا تجزیه‌ای، کاربردهای صنعتی"، انتشارات دانشگاه تهران، فصل سوم، ۳۲۱ صفحه.

مورتیمر ج.، "شیمی عمومی"، ترجمه: طوسی خواجه نصیرالدین، مستشاری ع. و نفیسی موقر ج.، جلد اول، فصل دهم، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۲.

مونتهگومری د. س.، "کنترل کیفیت آماری"، ترجمه: نورالسنا رسول، ۱۳۷۶، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ۹۴۲ صفحه.

حسن زاده محله ا.، (۱۳۹۱)، "بررسی امکان بهبود بازیابی ذرات باارزش قفل شده در سلول‌های پرعیارکنی اولیه کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

Abuzriba M. B, Dodd R. A., Worzala F. J. and Conrad J. R. (1992) "Wear corrosion: separation of the components of corrosion and wear", **Corrosion**, 48, 1, pp. 2-4.

Adam K. (1983) "Grinding media corrosion and its effect on flotation of sulfide minerals", PhD Thesis, University of Minnesota.

Adam K. and Iwasaki I. (1984) "Grinding media-sulfide mineral interaction and its effect on flotation", pp. 66-80, in: *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing*, Richardson P. E., Srinivasan S. and Woods R. (Editors), Electrochem. Soc., Pennington, USA.

Adam K., Natarajan K. A. and Iwasaki I. (1984) "Grinding media wear and its effect on the flotation of sulfide minerals", **Int. J. Miner. Process.**, 12, 1-3, pp. 39-54.

Ahn J. H. and Gebhardt J. E. (1991) "Effect of grinding media-chalcopyrite interaction on the self-induced flotation of chalcopyrite", **Int. J. Miner. Process.**, 33, 1-4, pp. 243-262.

Ailor W. H. (1971) "**Handbook of Corrosion Testing and Evaluation**", New York, John Wiley & Sons, Inc., p. 173.

Aldrich C. (2013) "Consumption of steel grinding media in mills – A review", **Miner. Eng.**, 49, pp. 77 – 91.

Bard A. J. and Faulkner L. R (2000) "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications", John Wiley & Sons, New York.

Bezera M. A., Santelli R. E., Oliveira E. P., Villar L. S. and Escaleira L. A. (2008) "Review response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry", **Talanta**, 76, 5, pp. 965-977.



- Boikess R. and Edelson E. (1978) “**chemical principles**”, Happer and Row, New York.
- Bond F. C. (1964) “Metal wear in crushing and grinding”, **Chem. Eng. Prog.**, 60, 2, pp. 90-100.
- Bruckard W. J., Sparrow G. J. and Woodcock J. T. (2011) “A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides”, **Int. J. Miner. Process.**, 100, 1-2, pp. 1–13.
- Cases J. M., Kongolo M., De Donato P., Michot L. and Erre R. (1990) “Interaction of finely ground galena and potassium amyloxanthate in flotation, 1. Influence of alkaline grinding”, **Int. J. Miner. Process.**, 28, 3-4, pp. 313-337.
- Chen C. S. and Liu Y. C. (2007) “A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering”, **Tunn. Under. Sp. Tech.**, 22, 4, pp. 337-387.
- Chen G. L., Tao D. and Parekh B. K. (2006) “A laboratory study of high chromium alloy wear in phosphate grinding mill”, **Int. J. Miner. Process.**, 80, 1, pp. 35–42.
- Cheng X. (1991) “Effects of pulp potentials and chalcopyrite - pyrrhotite interaction on flotation separation”, a thesis submitted to the faculty of the graduate school of the University of Minnesota.
- Cheng X. and Iwasaki I. (1992) “Pulp potential and its implications to sulphide flotation”, **Miner. Process. Extract. Metall. Rev.**, 11, 1-2, pp. 187-210
- Chenje T. W., Simbi D. J. and Navara E. (2003) “The role of corrosive wear during laboratory milling”, **Miner. Eng.**, 16, 7, pp. 619-624.
- Chenje T. W., Simbi D. J. and Navara E. (2004) “Relationship between microstructure, hardness, impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations”, **Mater. Des.**, 25, 1, pp. 11-18,.
- Cullinan V. J. (1999) “Improving the flotation response of fine galena”, PhD Thesis, University of South Australia, Adelaide.
- Cullinan V. J., Grano S., Greet C.J., Johnson N. W. and Ralston J. (1999) “Investigating fine galena recovery problems in the lead circuit of Mount Isa mines lead/zinc concentrator. Part1: Grinding media effects”, **Miner. Eng.**, 12, 2, pp. 147–163.
- Dalkey Norman, Helmer Olaf, 1963, “An experimental application of the Delphi method to the use of experts”, **Manage. Sci.**, 9, 3, pp. 458-467.

- Dun D. J. (1985) “Metal removal mechanisms comprising wear in mineral processing”; wear materials, SME, New York, pp. 501-508.
- Ekmekçi Z and Demirel H. (1997) “Effects of galvanic interaction on collectorless flotation behaviour of chalcopyrite and pyrite”, **Int. J. Miner. Process.**, 52, 1, pp. 31-48.
- Fontana M. G. (1986) “**Corrosion engineering**”, 3rd Ed. New York: McGraw-Hill. p 1-5, 457.
- Friis E. P., Anderson J. E. T., Madsen L. L., Bonander N., Per Moller, and Ulstrup J. (1998) “Dynamics of *Pseudomonas aeruginosa* azurin and its Cys3Ser mutant at single-crystal gold surfaces investigated by cyclic voltammetry and atomic force microscopy”, **Electrochim. Acta**, 43, 9, pp. 1114-1122.
- Gangopadhyay A. K. and Moore J. J. (1985) “Assessment of wear mechanisms in grinding media”, Transaction Vol. 278, SME–AIME; Minerals and metallurgical processing, pp. 145-151.
- Grano S., Ralston J. and Smart R. S. C. (1990) “Influence of electrochemical environment on the flotation behaviour of Mt. Isa copper and lead-zinc ore”, **Int. J. Miner. Process.**, 30, 1-2, pp. 69-97.
- Greet C. J. (2008) “The significance of grinding environment on the flotation of UG2 ores” Third International Platinum Conference ‘Platinum in Transformation’, pp. 29-35, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Greet C. J. and Smart R. St. C. (2002) “Diagnostic Leaching of Galena and its Oxidation Products with EDTA”, **Miner. Eng.**, 15, 7, pp. 515–522.
- Greet C. J., Kinal J. and Steinier P. (2005) “Grinding media - Its effects on pulp chemistry and flotation behavior–Fact or Fiction?”, Centenary of flotation symposium, pp. 967-972, Brisbane, QLD.
- Greet C. J., Small G. L., Steinier P. and Grano S. R. (2004) “The Magotteaux Mill®: investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance”, **Miner. Eng.**, 17, 7-8, pp. 891-896.
- Gundewar C. S., Natarajan K. A., Nayak U. B. and Satyanarayana K. (1990) “Laboratory studies on ball wear in the grinding of a hematite-magnetite ore”, **Int. J. Miner. Process.**, 29, 1-2, pp. 121-139.

- Guy P. J. and Trahar W. J. (1984) “The influence of grinding and flotation environments on the laboratory batch flotation of galena”, **Int. J. Miner. Process.**, 12, 1-3, pp. 15-38.
- Hayes R. A. and Ralston J. (1988) “The collectorless flotation and separation of sulphide minerals by Eh control”, **Int. J. Miner. Process.**, 23, 1-2, pp. 55-84.
- Heng-xing X. (2002) “Wear mechanisms and mathematical models of steel balls in wet grinding”, Changsha: Central South University.
- Heng-xing X., Song-ren L. and Ding-huo L. (2003) “Electrochemical corrosion of steel balls in wet grinding”, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 13, 4, pp. 958-962.
- Heyes G. W. and Trahar W. J. (1984) “The flotation of pyrite and pyrrhotite in the absence of conventional collectors”, In: Richardson, P.E., Srinivasan, S. (Eds.), *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing*. The Electrochemical Society, America, pp. 219–232.
- Hoey G. R, Dingley W. and Freeman C. (1975) “Corrosion inhibitors reduce ball wear in grinding sulfide ore”, **CIM Bulletin**, 68, pp. 120-123.
- Holmes P. R. and Crundwell F. K. (1995) “Kinetic aspects of galvanic interactions between minerals during dissolution”, **Hydrometallurgy**, 39, 1-3, pp. 353-375.
- Huang G. (2005) “Modeling of sulfide minerals-grinding media electrochemical interaction during grinding”, PhD Thesis, University of South Australia, Adelaide.
- Huang, G. and Grano S. (2005) “Galvanic interaction of grinding media with pyrite and its effect on floatation”, **Miner. Eng.**, 18, 12, pp. 1152–1163.
- Huang, G. and Grano S. (2006) “Galvanic interaction between grinding media and arsenopyrite and its effect on flotation: Part I. Effect of grinding on flotation and surface properties”, **Int. J. Miner. Process.**, 78, 3, pp. 182– 197.
- Huang, G., Grano S. and Skinner, W. (2006) “Galvanic interaction between grinding media and arsenopyrite and its effect on flotation: Part II. Effect of grinding on flotation and surface properties”, **Int. J. Miner. Process.**, 78, 3, pp. 198– 213.
- Ishikawa A., Amagasa M., Shiga T., Tomizawa G., Totsuta R. and Mieno H. (1993) “The max–min Delphi method and fuzzy Delphi method via fuzzy integration”, **Fuzzy Sets Syst.**, 55, 3, pp. 241-253.
- Iwasaki I, Reimer S. C, Orlich J. N. and Natarajan K. A. (1985) “Corrosive and abrasive wear in ore grinding”, **Wear**, 103, 3, pp. 253-67.

- Iwasaki I., Moore J. J. and Lindeke L. A. (1987) “Effect of ball mill size on media wear”, Transaction Vol.282, SME–AIME, Minerals and metallurgical processing, pp.160-166.
- Iwasaki I., Pozzo R. L., Natarajan K. A., Adam K. and Orlich J. N. (1988) “Nature of corrosive and abrasive wear in ball mill grinding”, **Int. J. Miner. Process.**, 22, 1-4, pp. 345-360.
- Iwasaki I., Riemer S. C. and Orlich, J. N. (1985) “Effects of percent solids and mill loading on ball wear in laboratory taconite grinding”, Transaction Vol. 278, SME – AIME, Minerals and metallurgical processing, pp.185-191.
- Jang J. W., Iwasaki I. and Moore J. J. (1989) “The effect of galvanic interaction between martensite and ferrite in grinding media wear”, **Corrosion**, 45, 5, pp. 402-407.
- Jones D. A. (1996) “**Principles and prevention of corrosion**”, pp. 3-31, 2nd edition. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall.
- Kissinger P. and W. R. Heineman (1996). “**Laboratory techniques in electroanalytical chemistry**”, Second Edition, 2ed, CRC.
- Leppinen J. O., Kalapudas R. and Heiskanen, K. (2000) “Influence of grinding media on the electrochemistry of sulphide ore flotation”, pp. 1-12, In: Electrochemistry in Mineral and Metal Processing, Woods R. and Doyle F. M. (Editors), Electrochem. Soc., Pennington, USA.
- Li J., Zhong T-K. and E. Wadsworth M, (1992) “Application of mixed potential hydrometallurgy”, **Hydrometallurgy**, 29, 1-3, pp. 47-60.
- Martin C. J., McIvor R. E., Finch J. A. and Rao S.R. (1991) “Review of the effect of grinding media on flotation of sulphide minerals”, **Miner. Eng.**, 4, 2, pp. 121-132.
- Meulendyke M. J. and Purdue J. D. (1989) “Wear of grinding media in the mineral processing industry”, Transaction Vol. 286, Minerals and metallurgical processing, SME–AIME, pp. 167-171.
- Miettunen H., Kaukonen R., Corin K., Ojala S. and L. Keiski R. (2012) “Effect of reducing grinding conditions on the flotation behaviour of low – S content PGE ores”, **Miner. Eng.**, 36–38, pp. 195–203.
- Montgomery D. C. (2001) “Design and Analysis of Experiments”, New York: John Wiley & Sons.

- Moore J. J., Perez R., Gangopadhyay A. and Eggert J. F. (1988) “Factors affecting wear in tumbling mills: Influence of composition and microstructure”, **Int. J. Miner. Process.**, 22, 1-4, pp. 313-343.
- Murray T., Pipino L. and Gigch J. (1985) “A pilot study of fuzzy set modification of Delphi”, **Hum Syst Manag.**, 5, 1, pp. 76-80.
- Myers R. H. and Montgomery D. C. (2002) “Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments”, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, New York.
- Natarajan K. A. (1992) “Ball wear and its control in the grinding of a lead-zinc sulphide ore”, **Int. J. Miner. Process.**, 34, 1-2, pp. 161-175.
- Natarajan K. A. (1996) “Laboratory studies on ball wear in grinding of a chalcopyrite ore”, **Int. J. Miner. Process.**, 46, 3-4, pp. 205–213.
- Natarajan K. A. and Iwasaki I. (1984) “Electrochemical aspects of grinding media-mineral interactions in magnetite ore grinding”, **Int. J. Miner. Process.**, 13, 1, pp. 53-71.
- Natarajan K. A. and Iwasaki I. (1984) “Electrochemical aspects of grinding media-mineral interactions in magnetite ore grinding”, **Int. J. Miner. Process.**, 13, 1, pp. 53-71.
- Natarajan K. A., Riemer S. C. and Iwasaki I. (1984) “Corrosive and erosive wear in magnetic taconite grinding”, AIMMPE Transactions 276, pp.10–14.
- Orlich J. N. and Iwasaki I. (1987) “Effects of slurry rheology and ball coating on abrasion wear and the grinding rate of quartzite”, Transaction Vol. 282, SME – AIME, Minerals and metallurgical processing, pp. 32-36.
- Pavlica J. J. and Iwasaki I. (1982) “Electrochemical and magnetic interaction in pyrrhotite flotation”, Trans. SME/AIME, 272: 1885-1890.
- Peng Y. (2002) “Grinding environment studies in the control of oxidation and interaction between sulphide minerals and grinding media”, PhD Thesis, University of South Australia, Adelaide.
- Peng Y. and Grano S. (2010) “Inferring the distribution of iron oxidation species on mineral surfaces during grinding of base metal sulphides”, **Electrochim Acta**, 55, 19, pp. 5470–5477.

- Peng Y., Grano S., Fornasiero D. and Ralston J. (2003a) “Control of grinding conditions in the flotation of chalcopyrite and its separation from pyrite”, **Int. J. Miner. Process.**, 69, 1-4, pp. 87-100.
- Peng Y., Grano S., Fornasiero D. and Ralston J. (2003b) “Control of grinding conditions in the flotation of galena and its separation from pyrite”, **Int. J. Miner. Process.**, 70, 1-4, pp. 67-82.
- Pozzo R. L. and Iwasaki I. (1987) “An electrochemical study of pyrrhotite-grinding media interaction under abrasive condition”, **Corrosion**, 43, 3, pp. 159-164.
- Pozzo R. L. and Iwasaki I. (1989) “Pyrite-pyrrhotite-grinding media interactions and their effects on media wear and flotation”, **Electrochem. Soc. J.**, 16, 6, pp. 1734-1740.
- Pozzo R. L., Malicsi A. S. and Iwasaki I. (1990) “Pyrite-pyrrhotite-grinding media contact and its effect on flotation”, **Miner. Metall. Process.**, 7, 1, pp. 16-21.
- Radziszewski P. (2000) “Developing an experimental procedure for charge media wear prediction”, **Miner. Eng.**, 13, 8-9, pp. 949-961.
- Rajagopal V. and Iwasaki I. (1992) “Wear behaviors of chromium-bearing cast irons in wet grinding”, **Wear**, 154, 2, pp. 241-258.
- Rand D. A. J. and Woods R. (1984) “Eh Measurements in Sulfide Mineral Slurries”, **Inter. J. Miner. process.**, 13, 1, pp.29-42.
- Rey M. and Formanek V. (1960) “Some factors affecting selectivity in the differential flotation of lead-zinc ores, particularly in the presence of oxidized lead minerals”, Vth IMPC Proc.. IMM, London, pp. 343-353.
- Rumball J. A. and Richmond G. D. (1996) “Measurement of oxidation in a base metal flotation circuit by selective leaching with EDTA”, **Inter. J. Miner. process.**, 48, 1-2, pp. 1-20.
- Saaty T. L. (1980) “**The analytic hierarchy process**”, New York: McGraw- Hill.
- Tao D. and Parekh B. K. (2004) “Corrosion protection of grinding mills in the phosphate industry using impressed current technology”; Final Technical Report Prepared for Florida Institute of Phosphate Research, University of Kentucky, Lexington, KY 40514 USA.
- Tao D. and Parekh, B.K. (2004) “Corrosion protection of grinding mills in the phosphate industry using impressed current technology”, Final Technical Report

Prepared for Florida Institute of Phosphate Research, University of Kentucky, Lexington, KY 40514 USA.

- Tao D., Chen G. L. and Parekh B. K. (2005) “Corrosion protection of mild carbon steel media in phosphate grinding mill using impressed current technology”, **Miner. Eng.**, 18, 5, pp. 481-488.
- Tao D., Chen G. L. and Parekh B. K. (2007) “An electrochemical study of corrosive wear of phosphate grinding mill”, **J. Appl. Electrochem.**, 37, 2, pp. 187–194.
- Uhlig H. H. (1971) “Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering”, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Wadsworth M. E., Zhu X. and Li J. (1993) “Electrochemistry of pyrite”, In: Hiskey, J.B., Warren, G.W. (Eds.), *Hydrometallurgy: Fundamental, Technology and Innovation*, Proc. 4th Milton E. Wadsworth Intl. Symp., pp. 85–99.
- Wang J. (2000) “**Analytical Electrochemistry**”, Chapter 2, John Wiley & Sons.
- Wang X. and Xie Y. (1990) “The effect of grinding media and environment on the surface properties and flotation behaviour of sulphide minerals”, **Miner. Process. Extract. Metall. Rev.**, 7, 1, pp. 49-79.
- Winter G. and Woods R. (1973) “The relation of collector redox potential to flotation efficiency: monothiocarbonates”, **Separation Sci.**, 8, 2, pp. 261-267.
- Wunder G. W (1979) “Sarcheshmeh Concentrator Operating Manual (Section4: Primary grinding)”, Parson-Jurden International Corporation, National Iranian Copper Industries.
- Yelloji Rao M. K. and Natarajan K. A. (1990a) “Studies on chalcopyrite ore grinding with respect to ball wear and effect on flotation”, **Miner. Metall. Process.**, 7, pp. 35-37.
- Yelloji Rao M. K. and Natarajan K. A. (1990b) “Effect of electrochemical interactions among sulphide minerals and grinding medium on the flotation of sphalerite and galena”, **Inter. J. Miner. process.**, 29, 3-4, pp. 175-194.
- Yelloji Rao M. K. and Natarajan K.A. (1988) “Influence of galvanic interaction between chalcopyrite and some materials on flotation”, **Miner. Eng.**, 1, 4, pp. 281–294.
- Yelloji Rao M. K. and Natarajan, K. A. (1989) “Effect of galvanic interaction between grinding media and minerals on sphalerite flotation”, **Inter. J. Miner. process.**, 27, 1-2, pp. 95-109.

- Yelloji Rao M. K. and Natarajan, K. A. (1991) "Factors influencing ball wear and flotation with respect to ore grinding", **Miner. Process. Extract. Metall. Rev.**, 7, 3-4, pp. 137-17.
- Yuan X. M., Palsson B.I. and Forsberg K. S. E. (1996a) "Flotation of a complex sulphide ore II. Influence of grinding environments on Cu/Fe sulphide selectivity and pulp chemistry", **Inter. J. Miner. process.**, 46, 3-4, pp. 181-204.
- Yuan X. M., Palsson B.I. and Forsberg K. S. E. (1996b) "Flotation of a complex sulphide ore I. Cu/Zn selectivity control by adjusting pulp potential with different gases", **Inter. J. Miner. process.**, 46, 3-4, pp. 155-179.
- Zoski C. G. (2007) "**Handbook of electrochemistry**", Elsevier Science.



پیوست‌ها

پیوست الف:

ماتریس مقایسه زوجی، ماتریس مقایسه فازی و وزن فازی

فاکتورهای موثر بر خوردگی



جدول (۲): ماتریس مقایسه فازی برای اهمیت نسبی فاکتورها (برای ۶ فاکتور)

|                | F <sub>1</sub>  | F <sub>2</sub>  | F <sub>3</sub>  | F <sub>4</sub> | F <sub>5</sub> | F <sub>6</sub> |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| F <sub>1</sub> | ۱,۱,۱           | ۱,۱/۲۲۳,۱/۲۹    | ۱/۲۹,۱/۸۶۴,۳    | ۱,۱/۳۰۸,۱/۸    | ۱/۲۹,۱/۴۷۱,۱/۸ | ۱/۲۹,۱/۴۷۱,۱/۸ |
| F <sub>2</sub> | ۰/۷۸,۰/۸۱۸,۱    | ۱,۱,۱           | ۱,۱/۵۲۴,۲/۳۳    | ۰/۷۸,۱/۰۷,۱/۴  | ۱,۱/۲۰۳,۱/۴    | ۱,۱/۲۰۳,۱/۸    |
| F <sub>3</sub> | ۰/۳۳,۰/۵۳۷,۰/۷۸ | ۰/۴۳,۰/۶۵۶,۱    | ۱,۱,۱           | ۰/۶,۰/۷۰۲,۰/۷۸ | ۰/۴۳,۰/۷۸۹,۱   | ۰/۴۳,۰/۷۸۹,۱   |
| F <sub>4</sub> | ۰/۵۶,۰/۷۶۵,۱    | ۰/۷۱,۰/۹۳۵,۱/۲۹ | ۱/۲۹,۱/۴۲۵,۱/۶۷ | ۱,۱,۱          | ۰/۷۱,۱/۱۲۵,۱/۴ | ۰/۷۱,۱/۱۲۵,۱/۴ |
| F <sub>5</sub> | ۰/۵۶,۰/۶۸,۰/۷۸  | ۰/۷۱,۰/۸۳۱,۱    | ۱,۱/۲۶۷,۲/۳۳    | ۰/۷۱,۰/۸۸۹,۱/۴ | ۱,۱,۱          | ۰/۷۱,۱,۱/۴     |
| F <sub>6</sub> | ۰/۵۶,۰/۶۸,۰/۷۸  | ۰/۵۶,۰/۸۳۱,۱    | ۱,۱/۲۶۷,۲/۳۳    | ۰/۷۱,۰/۸۸۹,۱/۴ | ۰/۷۱,۱,۱/۴     | ۱,۱,۱          |

یک مثال از نحوه محاسبات  $\tilde{Z}_i$ ،  $\tilde{W}_i$  و  $W_i$  در زیر ارائه شده است:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{\alpha}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{\alpha}_{in}]^{1/n} \Rightarrow \tilde{Z}_1 = [\tilde{\alpha}_{11} \otimes \tilde{\alpha}_{12} \dots \otimes \tilde{\alpha}_{127}]^{1/27} = [1.2239, 1.5254, 1.9433]$$

$$\sum \tilde{Z}_i = [20.707, 28.07, 39.456] \quad \tilde{Z}_2 = [0.9609, 1.2476, 1.7218], \dots, \tilde{Z}_{27} = [0.735, 0.9065, 1.2657]$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \Rightarrow \tilde{W}_1 = \tilde{Z}_1 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_{27})^{-1} = [0.031, 0.0543, 0.0939]$$

$$\tilde{W}_2 = [0.0243, 0.0444, 0.0832], \dots, \tilde{W}_{27} = [0.0186, 0.0323, 0.0611]$$

$$W_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_{ij})^{1/3}, W_1 = (0.031 \times 0.0543 \times 0.0939)^{1/3} = 0.054, W_2 = 0.0448, \dots, W_{27} = 0.0332$$

جدول (۳): وزن و اهمیت فاکتورهای موثر (بر اساس وزن فازی) بر فرسایش خوردگی گلوله‌ها طبق قضاوت کارشناسان

| فاکتورها                            | وزن فازی فاکتورها ( $\tilde{W}_i$ ) |              |        | عدد فازی $\tilde{Z}_i$ |        |        |        |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------|------------------------|--------|--------|--------|
|                                     | فاکتورها ( $W_i$ )                  | وزن غیر فازی |        |                        |        |        |        |
| ترکیبها و خصوصیات متالورژیکی گلوله  | ۰/۰۵۴                               | ۰/۰۹۳۹       | ۰/۰۵۴۳ | ۰/۰۳۱                  | ۱/۹۴۳۳ | ۱/۵۲۵۴ | ۱/۲۲۳۹ |
| اندازه بار گلوله فولادی             | ۰/۰۴۴۸                              | ۰/۰۸۳۲       | ۰/۰۴۴۴ | ۰/۰۲۴۳                 | ۱/۷۲۱۸ | ۱/۲۴۷۶ | ۰/۹۶۰۹ |
| توزیع دانه بندی بار گلوله           | ۰/۰۲۸۵                              | ۰/۰۵۸۳       | ۰/۰۲۹۱ | ۰/۰۱۳۶                 | ۱/۲۰۷۴ | ۰/۸۱۸۴ | ۰/۵۳۷۲ |
| سختی گلوله                          | ۰/۰۴۱۴                              | ۰/۰۷۸۶       | ۰/۰۴۱۵ | ۰/۰۲۱۸                 | ۱/۶۲۸  | ۱/۱۶۶۴ | ۰/۸۶۱۴ |
| شکل گلوله                           | ۰/۰۳۷۳                              | ۰/۰۷۱۲       | ۰/۰۳۶۹ | ۰/۰۱۹۷                 | ۱/۴۷۴۲ | ۱/۰۳۷  | ۰/۷۷۷۳ |
| وزن بار گلوله‌ها                    | ۰/۰۳۷۵                              | ۰/۰۷۰۵       | ۰/۰۳۶۹ | ۰/۰۲۰۲                 | ۱/۴۶۰۶ | ۱/۰۳۷  | ۰/۷۹۹۴ |
| مینرالورژی کانه                     | ۰/۰۴۹۷                              | ۰/۰۹۱۳       | ۰/۰۴۹۱ | ۰/۰۲۷۴                 | ۱/۸۸۹۸ | ۱/۳۷۹۵ | ۱/۰۸۴۵ |
| اندیس کار                           | ۰/۰۳۳۲                              | ۰/۰۶۴۹       | ۰/۰۳۲۳ | ۰/۰۱۷۴                 | ۱/۳۴۲۸ | ۰/۹۰۶۵ | ۰/۶۸۸۵ |
| سختی کانه                           | ۰/۰۳۲۴                              | ۰/۰۶۰۴       | ۰/۰۳۲۳ | ۰/۰۱۷۴                 | ۱/۲۵   | ۰/۹۰۶۵ | ۰/۶۸۸۵ |
| دانسیته کانه                        | ۰/۰۳۳۲                              | ۰/۰۶۱۱       | ۰/۰۳۲۳ | ۰/۰۱۸۶                 | ۱/۲۶۵۷ | ۰/۹۰۶۵ | ۰/۷۳۵  |
| اندازه ذرات                         | ۰/۰۳۵۶                              | ۰/۰۶۸۸       | ۰/۰۳۴۵ | ۰/۰۱۹۱                 | ۱/۴۲۴۶ | ۰/۹۶۹۶ | ۰/۷۵۳۵ |
| شکل ذرات                            | ۰/۰۲۳۵                              | ۰/۰۴۶۴       | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۰۱۱۳                 | ۰/۹۶۱  | ۰/۶۹۰۸ | ۰/۴۴۸۱ |
| قطر آسیا                            | ۰/۰۱۷۳                              | ۰/۰۵۸۸       | ۰/۰۲۱۱ | ۰/۰۰۴۲                 | ۱/۲۱۷۶ | ۰/۵۹۳۲ | ۰/۱۶۶۱ |
| سرعت آسیا                           | ۰/۰۲۶۳                              | ۰/۰۵۷۲       | ۰/۰۲۶۳ | ۰/۰۱۲۱                 | ۱/۱۸۴۷ | ۰/۷۳۸۹ | ۰/۴۷۶۸ |
| نوع تخلیه آسیا                      | ۰/۰۱۲۶                              | ۰/۰۲۹۱       | ۰/۰۱۴۵ | ۰/۰۰۴۷                 | ۰/۶۰۲۷ | ۰/۴۰۸۲ | ۰/۱۸۵۳ |
| pH پالپ                             | ۰/۰۴۸۱                              | ۰/۰۸۷۹       | ۰/۰۴۹۱ | ۰/۰۲۵۷                 | ۱/۸۲۰۷ | ۱/۳۷۹۵ | ۱/۰۱۶  |
| درصد جامد پالپ                      | ۰/۰۴۵۳                              | ۰/۰۸۱۶       | ۰/۰۴۴۴ | ۰/۰۲۵۷                 | ۱/۶۹   | ۱/۲۴۷۶ | ۱/۰۱۶  |
| ویسکوزیته                           | ۰/۰۳۵۱                              | ۰/۰۶۴۹       | ۰/۰۳۴۵ | ۰/۰۱۹۳                 | ۱/۳۴۲۸ | ۰/۹۶۹۶ | ۰/۷۶۳  |
| Eh پالپ                             | ۰/۰۴۶۸                              | ۰/۰۸۸۸       | ۰/۰۴۶۷ | ۰/۰۲۴۸                 | ۱/۸۳۷۷ | ۱/۳۱۱۹ | ۰/۹۷۸۹ |
| گازهای خالص                         | ۰/۰۴۱۷                              | ۰/۰۸۰۶       | ۰/۰۴۱۵ | ۰/۰۲۱۷                 | ۱/۶۶۹۱ | ۱/۱۶۶۴ | ۰/۸۵۶۱ |
| شیمی آب                             | ۰/۰۴۹۱                              | ۰/۰۸۹۶       | ۰/۰۴۹۱ | ۰/۰۲۶۹                 | ۱/۸۵۴۹ | ۱/۳۷۹۵ | ۱/۰۶۴۵ |
| درجه حرارت                          | ۰/۰۳۶۱                              | ۰/۰۶۹۵       | ۰/۰۳۶۹ | ۰/۰۱۸۴                 | ۱/۴۳۷۹ | ۱/۰۳۷  | ۰/۷۲۸۲ |
| خصوصیات رئولوژی پالپ                | ۰/۰۲۸۶                              | ۰/۰۶۳        | ۰/۰۳۱۲ | ۰/۰۱۲                  | ۱/۳۰۵  | ۰/۸۷۵۴ | ۰/۴۷۲۶ |
| برهم‌کنش گالوانیکی بین گلوله و کانی | ۰/۰۵۴                               | ۰/۰۹۳۹       | ۰/۰۵۴۳ | ۰/۰۳۱                  | ۱/۹۴۳۳ | ۱/۵۲۵۴ | ۱/۲۲۳۹ |
| ظرفیت                               | ۰/۰۳۴۴                              | ۰/۰۶۶۳       | ۰/۰۳۴۵ | ۰/۰۱۷۸                 | ۱/۳۷۲۳ | ۰/۹۶۹۶ | ۰/۷۰۳۶ |
| بار در گردش                         | ۰/۰۳۵۱                              | ۰/۰۶۴۹       | ۰/۰۳۴۵ | ۰/۰۱۹۳                 | ۱/۳۴۲۸ | ۰/۹۶۹۶ | ۰/۷۶۳  |
| زمان خردایش                         | ۰/۰۳۳۲                              | ۰/۰۶۱۱       | ۰/۰۳۲۳ | ۰/۰۱۸۶                 | ۱/۲۶۵۷ | ۰/۹۰۶۵ | ۰/۷۳۵  |

پیوست ب:

طراحی آماری آزمایش‌ها

## طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup> شامل یک آزمایش یا یکسری از آزمایش‌ها می‌شود که به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی تغییراتی ایجاد می‌گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. روش‌های طراحی آزمایش‌ها را می‌توان در توسعه یا رفع مشکلات فرآیند و نتیجتاً بهبود عملکرد آن، موثر دانست. کاربرد این فنون می‌تواند باعث بهبود بازده، کاهش زمان آزمایش‌ها، و یا حتی کاهش هزینه‌ها گردد. با پیشرفت یک آزمایش، بعضی از متغیرها حذف و تعدادی دیگر اضافه می‌شوند. ناحیه‌ای که بعضی از عامل‌ها در آن بررسی می‌شوند، تغییر می‌کند و یا حتی متغیرهای پاسخ جدیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نتیجتاً مراحل آزمایش معمولاً به صورت متوالی انجام می‌گیرد (نورالسنا، ۱۳۷۶).

مراحل مختلف استفاده از طراحی آزمایش‌ها را می‌توان به شرح ذیل بر شمرد (نورالسنا، ۱۳۷۶):

الف- طراحی آزمایش: در این مرحله ابتدا پارامترهای مورد مطالعه و سطوح تغییرات آن‌ها براساس نظر کارشناسانه محقق انتخاب می‌شود. بعد از انتخاب پارامترها آرایه یا چارچوب و نظم انجام آزمایش‌ها تعیین می‌شود. مرحله بعد تعیین فاکتورها و تاثیرات متقابل در ستون مربوط به آرایه می‌باشد (در روش فاکتوریل جزئی این مرحله برای جلوگیری از اختلاط تاثیر پارامترها دارای اهمیت بسیار است). بعد از انتخاب ستون‌ها شرایط هر آزمایش تعیین می‌شود. مرحله آخر ترتیب انجام آزمایش‌ها و تعداد تکرار آن‌ها می‌باشد.

ب- انجام آزمایش‌ها: در این مرحله با توجه به نظم و ترتیب انتخاب شده، آزمایش‌ها انجام و پاسخ‌های سیستم اندازه‌گیری می‌شود. باید به این نکته توجه نمود که جهت کاهش خطاهای ممکن، انتخاب تصادفی شماره آزمایش و همچنین تکرار و بلوک‌بندی حائز اهمیت می‌باشد.

ج- تحلیل نتایج: در این مرحله تاثیر فاکتورها به طور جداگانه و همچنین تاثیرات متقابل (اندرکنش) شناخته می‌شوند. دقت در ماهیت و معنی اندرکنش حائز اهمیت است. باید به این نکته توجه نمود که

---

<sup>۱</sup> -DOE

در آزمایش‌های بهینه‌سازی و کنترل نتایج فقط سطوح فاکتورها تغییر می‌کند و تغییر تاثیر متقابل ممکن نیست. بخش دیگر تحلیل نتایج، محاسبه اهمیت و تاثیر نسبی (به صورت درصد) فاکتورها می‌باشد. و بخش نهائی تحلیل نتایج، انجام آزمایش‌ها در شرایط بهینه می‌باشد.

د- اعتبار بخشی به آزمایش‌ها: در این مرحله آزمایش‌ها تکمیلی برای اعتبار بخشی به یافته‌ها و تکرار آزمایش‌ها برای تایید نتایج صورت می‌گیرد.

در صورت رعایت موارد فوق و تحلیل چند جانبه پاسخ سیستم، طراحی آماری آزمایش‌ها دارای خصوصیات: (۱) کارائی بالا، (۲) استفاده حداکثر از کم‌ترین داده‌های موجود، (۳) صرفه جوئی قابل توجه در وقت و هزینه، (۴) امکان بهینه‌سازی و پیش بینی پاسخ سیستم در شرایط معین، و (۵) بدست آوردن تاثیر و میزان (سنگینی) تاثیر پارامترها بر پاسخ‌های سیستم، می‌باشد.

ه) تحلیل آماری یک فرآیند و بهینه‌سازی: معمولاً در یک آزمایش ویژگی شناسی، هدف تعیین متغیرهایی است که بر متغیر پاسخ اثر می‌گذارند، بعد از انجام این آزمایش مرحله بعدی بهینه‌سازی خواهد بود و یا به عبارت دیگر تعیین ناحیه‌ای که متغیرهای مهم در آن قرار می‌گیرند و باعث می‌شوند تا بهترین پاسخ حاصل گردد و به عنوان مثال اگر متغیر پاسخ بازده در نظر گرفته شود، باید به دنبال ناحیه‌ای گشت که بیش‌ترین بازده را در بر دارد.

لازم به ذکر است که در آزمایش‌ها نقش تصادفی کردن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است با تصادفی کردن ترتیب انجام آزمایش‌ها اثر هر گونه عوامل خارجی که ممکن است متغیر پاسخ را تحت تاثیر قرار دهند تقریباً خنثی خواهند شد.

## مفاهیم و تعاریف اساسی

در ابتدا بهتر است برخی از اصطلاحاتی که به طور وسیع در طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌گردند یادآوری شوند، این اصطلاحات عبارتند از (نورالسنا، ۱۳۷۶، پورحسین و رئیسی، ۱۳۸۴):

- پاسخ: متغیر خروجی که مورد مطالعه قرار می‌گیرد (مانند نرخ خوردگی، بازیابی، عیار)



- عامل<sup>۱</sup>: عامل متغیری است که تاثیر آن روی خروجی یا متغیر پاسخ توسط آزمایش بدست می‌آید (برای نمونه pH، درصد جامد)

- سطح<sup>۲</sup>: سطح یک فاکتور یا عامل، مقداری است که عامل در طول آزمایش می‌گیرد در حقیقت وضعیت عوامل کمی (مانند ۷۰ دور بر دقیقه در برابر ۸۰ دور بر دقیقه سرعت گردش آسیا) یا مشخصه‌های وصفی از یک عامل کیفی (مانند گلوله فولادی آلیاژ پایین در برابر گلوله فولادی کربن و کروم بالا) را سطح می‌گویند.

- تاثیر اصلی<sup>۳</sup>: تاثیر اصلی یک عامل روی پاسخ خروجی معیاری است که مشخص می‌کند عامل چقدر پاسخ خروجی را از یک مقدار مرجع تغییر می‌دهد. مقدار مرجع را اغلب مقدار میانگین پاسخ‌های خروجی در نظر می‌گیرند.

- تاثیر متقابل یا تاثیر مجازی<sup>۴</sup>: تاثیر دو یا چند عامل به طور همزمان روی پاسخ خروجی معیاری است که مشخص می‌کند دو یا چند عامل به طور همزمان چقدر پاسخ خروجی را از یک مقدار مرجع تغییر می‌دهند.

## معرفی معمول ترین روش‌های استاندارد طراحی آزمایش‌ها

### آزمایش‌های عاملی یا فاکتوریل<sup>۵</sup> کامل

طرح‌های عاملی اغلب در آزمایش‌هایی استفاده می‌شوند که با چندین فاکتور درگیر هستند و در مطالعه اثر فاکتورهای پاسخ سیستم لازم می‌باشند. معمولاً چندین مورد خاص از طرح‌های عاملی کاربرد زیادی دارند و در موارد عملی از سایر طرح‌ها قابل توجه‌تر هستند.

---

<sup>1</sup> - Factor

<sup>2</sup> - Level

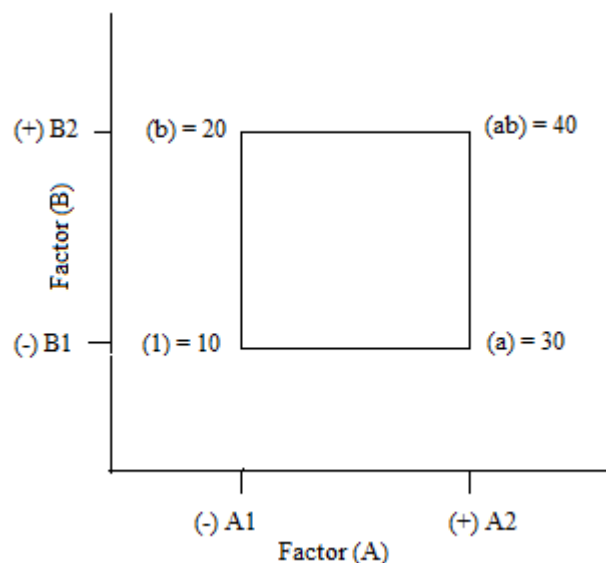
<sup>3</sup> - Main Effect

<sup>4</sup> - Intraction

<sup>5</sup> -factorial

یک آزمون کامل از یک طرح، خواستار  $2^k = 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2$  مشاهده است و آن طرح عاملی  $2^k$  نامیده می‌شود. طرح  $2^k$  وقتی مفید است که تعداد زیادی فاکتورهای شبیه به هم مورد بررسی قرار می‌گیرند. طرح  $2^k$  کم‌ترین تعداد اجرای سیستم که برای K فاکتور می‌تواند وجود داشته باشد را بدست می‌آورد و کاملاً مورد بررسی قرار می‌دهد. البته لازم به ذکر است که به علت در نظر گرفتن فقط دو سطح ممکن است که خطا ایجاد شود و در واقع با این کار فرض خطی بودن تغییرات متغیر مورد بررسی قبول شده است.

مهم‌ترین کاربرد یک طرح عاملی زمانی است که ارزیابی اثرات چندین عامل، مورد نظر باشد. در بعضی از طرح‌ها، عامل‌های مورد مطالعه همگی با هم تغییر می‌کنند. در حقیقت منظور از آزمایش عاملی، آزمایشی است که در هر تکرار کامل آن کلیه ترکیب‌های سطوح عامل‌های مورد نظر بررسی می‌شوند. بنابراین اگر دو عامل A و B را در نظر گرفته شود به طوری که عامل A دارای a سطح و عامل B دارای b سطح باشد آنگاه هر تکرار این آزمایش دارای ab ترکیب مختلف خواهد بود. در طرح‌های عاملی اثر یک عامل به عنوان میزان تغییر در پاسخ مشاهده شده وقتی که سطح عامل مورد نظر تغییر داده شود، تعریف می‌گردد. این اثر را به علت مرتبط بودن با عامل‌های اصلی مورد مطالعه، اثر اصلی می‌نامند.



شکل (۱): یک آزمایش عاملی با دو فاکتور

در طرح  $2^k$  سطوح پایین و بالای فاکتورهای A و B با علامت - و + نشان داده می‌شوند. به این علامت گذاری معمولاً نوتاسیون هندسی گفته می‌شود. معمولاً یک ترکیب از رفتارها به صورت مجموعه‌ای از حروف کوچک نشان داده می‌شود. اگر یک حرف کوچک حضور داشته باشد، یعنی فاکتور مورد نظر با سطح پایین خود در ترکیب شرکت کرده است. برای مثال ترکیب رفتار a نشان‌دهنده این است که فاکتور A با سطح بالای خود و B با سطح پایین خود شرکت کرده‌اند. ترکیب رفتار، اگر هر دو فاکتور با سطح پایین خود شرکت کنند به صورت (۱) نشان داده می‌شود و اگر هر دو با سطح بالای خود شرکت کنند به صورت ab نمایش داده می‌شوند. این نوتاسیون همچنین برای طرح‌های  $2^k$  نیز بکار می‌رود. به عنوان مثال اگر در یک ترکیب رفتاری آزمایش A و C با سطح بالای خود و D و B با سطح پایین خود شرکت کنند حاصل به صورت ac نمایش داده می‌شود.

اگر (۱)، a، b و ab را برای کل حالات با n مشاهده نیز تعمیم داده شود، نحوه تخمین تاثیر این فاکتورها به شرح ذیل بدست می‌آید.

فرض برای یک طرح  $2^2$ ، تخمین اثر اصلی A، تفاضل میانگین مشاهدات سمت راست مربع (جائی که A در سطح بالای خود قرار دارد) با میانگین مشاهدات سمت چپ (جائی که A در سطح پایین قرار دارد) حاصل می‌شود.

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{a+ab}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}[a+ab-b-(1)] \quad (1)$$

همچنین اثر اصلی B تفاضل میانگین سطح بالای فاکتور B (قسمت بالای مربع) و میانگین سطح پایین B (سمت پایین مربع) بدست می‌آید.

$$B = \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} = \frac{b+ab}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}[b+ab-a-(1)] \quad (2)$$

اثر متقابل AB به صورت تفاضل میانگین قطرهای مربع به صورت زیر خواهد بود.

$$AB = \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n}[ab+(1)-a-b] \quad (3)$$

مقادیر داخل براکت در سه فرمول بالا کنتراست (مقایسه) نامیده می‌شود و به طور مثال بدست می‌آید:

$$Contrast_A = a + ab - b - (1) \quad (4)$$

در این معادلات همیشه ضرائب کنتراست (مقایسه) + ۱ و یا - ۱ است.

این مقایسه‌ها را می‌توان از جدول علامت‌های مثبت و منفی طرح  $2^2$  نظیر جدول (۱) تهیه نمود.

جدول (۱): طرح فاکتوریل  $2^2$

| رفتار ترکیب‌ها | اثر عاملی |    |    |    |
|----------------|-----------|----|----|----|
|                | I         | A  | B  | AB |
| 1              | +۱        | -۱ | -۱ | +۱ |
| a              | +۱        | +۱ | -۱ | -۱ |
| b              | +۱        | -۱ | +۱ | -۱ |
| ab             | +۱        | +۱ | +۱ | +۱ |

اثرات اصلی یا متقابل هریک از عوامل جدول (۱) را می‌توان از فرمول ذیل به دست آورد.

$$EFFECT = \frac{CONTRAST}{2^{k-1}} \quad (5)$$

که k تعداد فاکتور و n تکرار آزمایش می‌باشد.

مجموع مربعات (SS) برای هر یک از اثرات را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$SS = \frac{CONTRAST^2}{n2^k} \quad (6)$$

### روش کسری عاملی یا فاکتوریل جزئی<sup>۱</sup>

با افزایش تعداد عامل‌ها در طرح‌های  $2^k$  تعداد آزمایش‌های مورد نیاز نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، یک طرح  $2^5$  نیاز به ۳۲ آزمایش دارد، در این طرح فقط ۵ درجه آزادی مربوط

<sup>۱</sup> - Factorial Fraction

به اثرات اصلی و ۱۰ درجه آزادی مربوط به اثرات متقابل دو گانه می‌شود. اگر بتوان فرض کرد. که بعضی از اثرات مرتبه بالاتر ناچیز هستند، آنگاه می‌توان از یک طرح عاملی کسری بجای یک طرحی که شامل  $2^k$  آزمایش است استفاده نمود و اطلاعاتی در مورد اثرات و متقابل مرتبه پایین بدست آورد. در این بخش تکرار کسری طرح  $2^k$  معرفی خواهد شد.

الف) کسر یک دوم طرح  $2^k$ : کسر یک دوم طرح  $2^k$  شامل  $2^{k-1}$  آزمایش است و معمولاً آن را طرح عاملی کسری می‌نامند. به عنوان مثال، در طرح  $2^{(3-1)}$  که کسر یک دوم طرح  $2^3$  است، با در نظر گرفتن جدول (۲) اثرات اصلی آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$A=1/2[a-b-c+abc] \quad (۷)$$

$$B=1/2[-a+b-c+abc] \quad (۸)$$

$$C=1/2[-a-b+c+abc] \quad (۹)$$

به همین ترتیب اگر اثرهای AB، AC و BC آورده شوند، مشاهده می‌شود که  $B=AC$ ،  $A=BC$  و  $C=AB$ ، که اصطلاحاً می‌گویند هم اثر هستند. هم اثری نتیجه مستقیمی است که از تکرار کسری حاصل می‌گردد. در اغلب موارد علمی، این امکان وجود دارد که بتوان کسر مورد نظر را به گونه‌ای انتخاب نمود که اثرات اصلی و اثرات متقابل مرتبه بالا (که احتمالاً ناچیز هستند) هم اثر گردند.

جدول (۲): علامت‌های +۱ و -۱ برای طرح

| اثر عاملی |    |    |    |    |    |     |    | رفتار |
|-----------|----|----|----|----|----|-----|----|-------|
| ABC       | BC | AC | C  | AB | B  | A   | I  |       |
| +۱        | +۱ | -۱ | -۱ | -۱ | -۱ | +۱  | +۱ | A     |
| +۱        | -۱ | +۱ | -۱ | -۱ | +۱ | -۱  | +۱ | B     |
| +۱        | -۱ | -۱ | +۱ | +۱ | -۱ | -۱  | +۱ | C     |
| +۱        | +۱ | +۱ | +۱ | +۱ | +۱ | +۱  | +۱ | Abc   |
| -۱        | -۱ | -۱ | -۱ | +۱ | +۱ | +۱  | +۱ | Ab    |
| -۱        | -۱ | +۱ | +۱ | -۱ | -۱ | +۱  | +۱ | Ac    |
| -۱        | +۱ | -۱ | +۱ | -۱ | +۱ | -۱  | +۱ | Bc    |
| -۱        | +۱ | +۱ | -۱ | +۱ | -۱ | -۱۱ | +۱ | ۱     |

باید در نظر داشت که طرح  $2^{(3-1)}$  با انتخاب فقط آزمایش‌هایی که باعث می‌گردند تا ABC دارای اثر مثبت باشد، حاصل گردیده است. بنابراین ABC مولد کسر یک دوم نامیده می‌شود. بعلاوه عنصر واحد I نیز برای هر چهار آزمایش دارای علامت مثبت است و در نتیجه  $I=ABC$  خواهد بود که از آن به عنوان رابطه معرف طرح نام برده می‌شود.

با در نظر گرفتن  $I=ABC$  می‌توان هم اثر هر یک از عامل‌ها را بدست آورد. به عنوان مثال، هم اثر A به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$A=A.ABC=A.....A^2BC=BC \quad (10)$$

و این به دلیل  $A.I=A$  و  $I=A^2$  می‌باشد. ضمناً هم اثرهای B و C نیز به این صورت تعیین می‌گردند.  
 ب) تصویر طرح  $2^{k-1}$ : اگر یک یا چند عامل از کسر یک دوم طرح  $2^k$  حذف گردد آنگاه طرح موجود را می‌توان بر روی یک طرح عاملی کامل تصویر نمود.

دلیل استفاده از این طرح به خاطر کاهش تعداد اجراهای آزمایش می‌باشد. علاوه بر این استفاده از این طرح مزایای دیگری نیز دارد، که عبارتند از: ۱- جمع آوری اطلاعات در رابطه با تاثیر فاکتورها بر یک فرآیند و ۲- تولید مدل ریاضی متناسب فرآیند

ج) تجزیه طرح: مفهوم تجزیه طرح یکی از روش‌های مفید برای دسته‌بندی طرح‌های عاملی کسری بر حسب ساختار هم اثر آنها می‌باشد. تجزیه‌های III, IV, V طرح‌ها معمولاً از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. تعریف هر یک از این طرح‌ها همراه با مثالی برای هر یک در زیر ارائه گردیده است.

طرح‌های تجزیه III: در این طرح‌ها هیچ یک از اثرات اصلی دیگر هم اثر نیست ولی اثرات اصلی با اثرات متقابل دوگانه هم اثر هستند و اثرات متقابل دوگانه ممکن است با یکدیگر هم اثر باشند به عنوان مثال، طرح  $2^{(3-1)}$  با  $I=ABC$  یک طرح تجزیه III است. به منظور نشان دادن تجزیه طرح معمولاً از اعداد رومی استفاده می‌شود. بنابراین کسر یک دوم فوق یک طرح  $2^{3-1}_{III}$  می‌باشد.

طرح‌های تجزیه IV: در این طرح‌ها هیچ یک از اثرات اصلی با اثرات اصلی دیگر و یا اثرات متقابل دوگانه هم اثر نیست ولی اثرات متقابل دوگانه با یکدیگر هم اثر هستند. به عنوان مثال، طرح  $2^{(4-1)}$  با  $I=ABC$  در یک طرح تجزیه IV با  $2^{4-1}$  است.

طرح‌های تجزیه V: در این طرح‌ها هیچ یک از اثرات اصلی یا اثرات متقابل دوگانه با اثرات اصلی یا متقابل دیگر هم اثر نیست ولی اثرات متقابل دوگانه با اثرات متقابل سه گانه هم اثر هستند. به عنوان مثال، طرح  $2^{(5-1)}$  با  $I=ABC$  یک طرح تجزیه V است.

طرح‌های تجزیه III و IV در آزمایش‌های غربالی که عامل‌های مهم شناسایی می‌گردند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. طرح تجزیه IV اطلاعات مفیدی در مورد اثرات اصلی و اثرات متقابل دوگانه فراهم می‌سازد.

## روش سطح - پاسخ<sup>۱</sup>

روش‌های سطح پاسخ مجموعه‌ای از فنون آماری و ریاضی است که می‌توان در بهبود فرآیند به کار برد. در این فرآیندها چندین متغیر  $X_1, X_2, \dots, X_k$  بر خروجی فرآیند یا پاسخ که معمولاً آن با  $y$  نشان داده می‌شود، اثر می‌گذارند. در چنین شرایطی هدف اصلی بهینه کردن میزان پاسخ است. روشی که در تجزیه و تحلیل سطح پاسخ به کار می‌رود را می‌توان چنین خلاصه کرد: (۱) انجام چندین آزمایش که داده‌های قابل اطمینانی در مورد فرآیند فراهم می‌سازند، (۲) برازش یک مدل ریاضی که رابطه بین متغیرهای فرآیند  $X_1, X_2, \dots, X_k$  و پاسخ  $y$  را توصیف می‌کند، و (۳) استفاده از مدل ریاضی در تعیین سطوح بهینه متغیرهای فرآیند و یا به عبارتی دیگر  $X$ ها در چه سطوحی باید بکار برده شوند تا حداکثر (و یا حداقل) مقدار برای  $y$  حاصل گردد.

روش سطح پاسخ معمولاً از یک سری آزمایش‌های پی در پی تشکیل گردیده است. در مراحل اولیه تجزیه و تحلیل، معمولاً سعی می‌شود تا ۱- متغیرهای مهم فرآیند شناسایی گردند، ۲- تعیین شود

---

<sup>۱</sup> -Response Surface

که آیا فرآیند در اطراف نقطه بهینه قرار دارد، و ۳- اگر چنین نیست آن را به سمت نقطه بهینه هدایت کرد. در مرحله آخر، از نمودارهای تراز و سایر تجزیه و تحلیل‌ها جهت تعیین و درک بهتر فرآیند استفاده می‌شود.

## آنالیز واریانس

به منظور سادگی در ابتدا یک عامل با  $a$  سطح مختلف در نظر گرفته می‌شود و پاسخ مشاهده شده در هر یک از این سطوح این عامل، یک متغیر تصادفی را تشکیل می‌دهد. داده‌های حاصل را می‌توان به صورتی که در جدول (۳) ارائه شده، نشان داد که هدف مقایسه سطوح این عامل با یکدیگر می‌باشد.

جدول (۳): تجزیه و تحلیل واریانس برای یک آزمایش یک عاملی

| سطح عامل | مشاهده                     | جمع      | متوسط          |
|----------|----------------------------|----------|----------------|
| ۱        | $y_{11}y_{12}\dots y_{1n}$ | $y_{1.}$ | $\bar{y}_{1.}$ |
| ۲        | $y_{21}y_{22}\dots y_{2n}$ | $y_{2.}$ | $\bar{y}_{2.}$ |
| .        | .                          | .        | .              |
| .        | .                          | .        | .              |
| a        | $y_{a1}y_{a2}\dots y_{an}$ | $y_{a.}$ | $\bar{y}_{a.}$ |
|          |                            | $y_{..}$ | $\bar{y}_{..}$ |

جدول (۳)  $Y_{ij}$  مشاهده  $j$  که در سطح  $i$  عامل مورد نظر تهیه شده است را نشان می‌دهد. برای انجام این محاسبات فرض می‌شود که تعداد مشاهدات تهیه شده در هر یک از این سطوح عامل مورد مطالعه  $(n)$  یکسان هستند. مشاهدات جدول را می‌توان بوسیله مدل زیر توصیف کرد:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (11)$$

در مدل بالا  $y_{ij}$  مشاهده  $j$ ،  $\mu$  پارامتر مشترک برای همه سطوح که میانگین کل نامیده می‌شود،  $\tau_{ij}$  پارامتر مربوط به سطح  $i$  ام عامل و  $\varepsilon_{ij}$  مولفه خطای تصادفی مدل را نشان می‌دهد. هدف اصلی در این



تجزیه و تحلیل، آزمایش یک سری فرضیه‌های خاص در مورد تاثیر عامل مورد نظر و تخمین آن‌ها می‌باشد، به منظور آزمایش فرضیه‌ها، فرض می‌شود که خطاهای مدل متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نرمال و با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  هستند. همچنین فرض می‌شود که واریانس  $\sigma^2$  برای همه سطوح عامل مورد نظر ثابت است. لازم است که مشاهدات بصورت تصادفی تهیه گردند تا محیطی که عامل‌ها در آن قرار دارند حتی الامکان از یکنواختی برخوردار باشند. این طرح را طرح کاملاً تصادفی می‌نامند.  $a$  سطح عامل مورد نظر را به دو طریق می‌توان تعیین کرد. در روش اول این سطوح می‌توانند توسط شخص آزمایش کننده انتخاب گردد. در چنین حالتی فرضیه‌هایی در مورد  $\tau_i$  آزمایش می‌شوند و نتایج حاصل نیز فقط برای سطحی که در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده‌اند معتبر است و این نتایج را نمی‌توان به سطوح مشابهی از عامل مورد نظر که در تجزیه و تحلیل شامل نگردیده‌اند تعمیم داد. این مدل را مدل اثرات ثابت می‌نامند. در روش دوم  $a$  سطح انتخاب شده می‌تواند یک نمونه تصادفی از جامعه بزرگتر سطوح باشد. در چنین حالتی می‌توان نتایج حاصل که بر اساس نمونه بدست آمده‌اند را به کلیه سطوح عامل تعمیم داد. تحت چنین شرایطی  $\tau_i$  متغیرهای تصادفی هستند و اطلاعاتی که فقط در مورد بعضی از آن‌ها بدست می‌آید بی‌فایده خواهد بود. در این حالت فرضیه‌هایی در مورد تغییرپذیری  $\tau_i$  آزمایش شده تا این تغییرپذیری تخمین زده شود. این مدل را مدل اثرات تصادفی یا مولفه‌های واریانس می‌نامند.

در این بخش تجزیه و تحلیل واریانس برای مدل اثرات تک عاملی ارائه خواهد شد. اثرات عامل  $\tau_i$  معمولاً به صورت انحرافات از میانگین کل تعریف می‌گردد:

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (12)$$

اگر  $Y_i$  مجموع مشاهدات مربوط به سطح عامل و  $\bar{Y}_i$  میانگین این مشاهدات باشد همچنین اگر که  $Y_{..}$  مجموع کل مشاهدات و  $\bar{Y}_{..}$  میانگین کل مشاهدات باشند در این صورت:

$$Y_i = \sum_{j=1}^h Y_{ij}, \bar{Y}_i = Y_i / n, i = 1, 2, \dots, a \quad (13)$$

$$Y = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}, \bar{Y}_{..} = Y_{..} / N \quad (14)$$

در رابطه‌های فوق  $N=an$  مجموع کل مشاهدات را نشان می‌دهد.

حال فرضیه مساوی بودن میانگین‌های مربوط به  $a$  سطح عامل بررسی می‌شوند. فرضیه‌های مناسبی که باید آزمایش گردند عبارتند از:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (15)$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad \text{حداقل یکی از میانگین‌ها برابر صفر نباشد} \quad (16)$$

در معادله ۱۵ اگر فرضیه صفر درست باشد آنگاه هر مشاهده از میانگین کل ( $\mu$ ) و یک خطای تصادفی ( $\varepsilon_{ij}$ ) خواهد بود. روش آزمون فرضیه‌هایی که در بالا ارائه گردیده‌اند را تجزیه و تحلیل واریانس می‌نامند. نام تجزیه و تحلیل واریانس به این علت انتخاب شده که تغییرپذیری کل داده‌ها به مولفه‌های مختلف تقسیم می‌گردد. مجموع مربعات تصحیح شده کل که معیاری برای تغییر پذیری کل موجود در داده‌هاست را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [(\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..}) + (Y_{ij} - \bar{Y}_i)]^2 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..}] (Y_{ij} - \bar{Y}_i) \quad (18)$$

جمله مربوط به ضریب برداری در رابطه فوق صفر است زیرا انحراف از میانگین همواره صفر است و در نتیجه:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (19)$$

رابطه اخیر بیانگر این واقعیت است که تغییر پذیری کل موجود در داده‌ها که بوسیله مجموع مربعات تصحیح شده کل محاسبه می‌گردد را می‌توان به مجموع مربعات اختلاف‌های بین میانگین‌های سطوح

عامل مورد مطالعه و میانگین کل و همچنین مجموع مربعات اختلاف‌های مشاهدات در سطح خاصی از عامل مورد مطالعه از میانگین آن سطح تقسیم می‌کرد. اختلاف بین میانگین‌های سطوح عامل مشاهده شده و میانگین کل، اختلاف بین سطوح عامل مورد نظر را اندازه گیری می‌کند در حالی که اختلاف‌های بین مشاهدات یک سطح عامل مورد نظر از نظر میانگین آن سطح می‌تواند صرفاً در اثر خطای تصادفی ایجاد شده باشد. بنابراین رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$SS_T = SS_{Factor} + SS_{Error} \quad (20)$$

در رابطه فوق  $SS_T$  مجموع مربعات کل،  $SS_{Factor}$  مجموع مربعات عامل مورد مطالعه و  $SS_{Error}$  مجموع مربعات خطا را نشان می‌دهد. اگر بزرگ باشد علت آن وجود پراکندگی زیاد بین میانگین‌های سطوح عامل مورد مطالعه است. بنابراین با مقایسه با می‌توان ملاحظه نمود که چه میزان از آن در اثر خطای تصادفی قابل بیان می‌باشند. این مقایسه وقتی بهتر معنا پیدا می‌کند که ابتدا هر یک از این مجموع مربعات را با تقسیم نمودن بر درجه آزادی متناظر با آن، هم مقیاس شوند. مجموع مشاهدات کل برابر  $N=an$  است که در این صورت دارای درجه آزادی  $N-1$  خواهد بود. عامل مورد مطالعه دارای  $a$  سطح است و بنابراین دارای درجه آزادی خواهد بود. بالاخره در هر سطح عامل مورد مطالعه، آزمایش  $n$  مرتبه تکرار می‌شود و از این طریق تعداد  $n-1$  درجه آزادی در تخمین خطای آزمایش فراهم می‌گردد. با وجود  $a$  سطح برای عامل مورد مطالعه، تعداد درجه آزادی‌های خطا برابر  $N-a$  خواهد شد.

نسبت مجموع مربعات به درجه آزادی متناظر با آن را میانگین مربعات می‌نامند.

$$MS_{Factor} = SS_{Factor} / (a - 1) \quad (21)$$

$$MS_E = SS_E / (a(n - 1)) \quad (22)$$

می‌توان نشان داد که میانگین مربعات خطا ( $MS_E$ ) واریانس خطای آزمایش یا  $\sigma^2$  را تخمین می‌زند. بعلاوه  $MS_{Factor}$  فقط زمانی  $\sigma^2$  را تخمین می‌زند که میانگین‌های مربوط به سطوح عامل مورد نظر یکسان باشند. اگر میانگین‌های مربوط به سطوح عامل مورد مطالعه یکسان نباشند، آنگاه  $MS_{Factor}$  از

$\sigma^2$  بزرگتر خواهد بود. براساس این واقعیت می توان یک آزمون آماری براساس توزیع F (فیشر) و آماره زیر به منظور پی بردن به حالت تساوی بین میانگین های سطوح عامل مورد مطالعه انجام داد:

$$F_0 = MS_{Factor} / MS_E \quad (23)$$

اگر  $F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)}$  باشد، آنگاه میانگین های سطوح عامل مورد نظر با یکدیگر تفاوت دارند (جدول ۴).

جدول (۴): تجزیه و تحلیل واریانس برای یک آزمایش یک عاملی

| Variation      | Alternativ es                   | Error                       | Total    |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------|----------|
| Sum of squares | $SS_A$                          | $SS_E$                      | $SS_T$   |
| Degree freedom | $a - 1$                         | $a(n - 1)$                  | $an - 1$ |
| Mean square    | $s_a^2 = SS_A / (a - 1)$        | $s_e^2 = SS_E / [a(n - 1)]$ |          |
| Computed F     | $s_a^2 / s_e^2$                 |                             |          |
| Tabulated F    | $F_{[1-\alpha; (a-1), a(n-1)]}$ |                             |          |

### تجزیه و تحلیل آماری بیش از یک عامل

تجزیه و تحلیل بحث شده در بخش قبل را می توان به آزمایش های با تعداد عوامل بیشتر تعمیم داد. برای مثال اگر دو عامل A و B داشته باشیم و عامل A دارای a سطح و عامل B دارای b سطح باشند و آزمایش n مرتبه تکرار شود و ترتیب انجام آزمایش برای abn آزمایش تصادفی باشد، در نتیجه در این طرح مشاهدات بوسیله مدل زیر بیان می شود:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (24)$$

در مدل فوق  $\mu$  اثر میانگین کل،  $\tau_i$  اثر عامل A در سطح i،  $\beta_j$  اثر متقابل B در سطح j و اثر متقابل بین A و B را نشان می دهد.  $\varepsilon_{ijk}$  خطای تصادفی است که متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نرمال و

با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  می باشد. هدف اصلی از چنین آزمایش بررسی فرضیه های زیر است:

۱- اثر عامل A معنی دار نیست، ۲- اثر عامل B معنی دار نیست، ۳- اثر متقابل AB معنی دار نیست. به منظور سهولت در انجام محاسبات، مجموع مشاهدات در سطح i ام عامل A را با  $Y_{i..}$ ، مجموع مشاهدات در سطح j عامل B را با  $Y_{.j.}$  و مجموع مشاهدات درایه ij جدول تجزیه و تحلیل واریانس را با  $Y_{ij.}$  و مجموع کل مشاهدات با  $Y_{...}$  نشان داده می‌شود. در این صورت میانگین سطر i، میانگین ستون j و میانگین خانه ij و میانگین کل به ترتیب برابر خواهند بود با  $\bar{Y}_{i..}$ ،  $\bar{Y}_{.j.}$ ،  $\bar{Y}_{ij.}$  و  $\bar{Y}_{...}$  بنابراین در تجزیه و تحلیل واریانس داریم:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk} - \bar{Y}_{...})^2 \quad (25)$$

به صورت زیر تفکیک می‌شود:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk} - \bar{Y}_{...})^2 &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{...})^2 + \\ n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_{ij.} - \bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{.j.} + \bar{Y}_{...})^2 &+ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij.})^2 \end{aligned} \quad (26)$$

یا به عبارتی دیگر:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (27)$$

به منظور پی بردن به وجود یا عدم وجود اثرات عامل‌های سطری و ستونی و همچنین اثرات متقابل، میانگین مربعات متناظر با هر اثر بر میانگین خطا تقسیم می‌گردد. هر یک از این نسبت‌ها دارای توزیع F با درجه آزادی صورت برابر با درجه آزادی میانگین مربعات صورت و درجه آزادی مخرج برابر با  $ab(n-1)$  خواهد بود. اگر مقدار F محاسبه شده از مقدار F بدست آمده از جدول توزیع فیشر (توزیع F) بیشتر باشد، فرضیه فوق رد است.

رابطه‌های ساده زیر برای جمع مربعات وجود دارند که در صورت نیاز می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. مجموع مربعات کل را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n [Y_{ijk}^2 - (Y_{...}^2 / abn)] \quad (28)$$

مجموع مربعات اثرات اصلی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a [(Y^2_{i..} / bn) - (Y^2_{...} / abn)] \quad (29)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b [(Y^2_{.j.} / an) - (Y^2_{...} / abn)] \quad (30)$$

مجموع مربعات مربوط به اثرات متقابل معمولاً در دو مرحله محاسبه می‌گردند. ابتدا جمع مربعات کل به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$SS_{Subtotal} = \sum \sum [(Y^2_{ij.} / h) - (Y^2_{...} / abn)] \quad (31)$$

مجموع مربعات فوق شامل  $SS_A$  و  $SS_B$  است، بنابراین در مرحله دوم به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$SS_{AB} = SS_{Subtotal} - SS_A + SS_B \quad (32)$$

مجموع مربعات خطا را می‌توان از طریق هر یک از رابطه‌های زیر محاسبه نمود:

$$SS_E = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_{AB}) \quad (33)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (34)$$

جدول (۵): تجزیه و تحلیل واریانس برای یک طرح دو عاملی، مدل اثرات ثابت

|                | A                                | B                                | AB                                    | Error                      |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Sum of squares | $SS_A$                           | $SS_B$                           | $SS_{AB}$                             | $SS_E$                     |
| Deg freedom    | $a-1$                            | $b-1$                            | $(a-1)(b-1)$                          | $ab(n-1)$                  |
| Mean square    | $s_a^2 = SS_A / (a-1)$           | $s_b^2 = SS_B / (b-1)$           | $s_{ab}^2 = SS_{AB} / [(a-1)(b-1)]$   | $s_e^2 = SS_E / [ab(n-1)]$ |
| Computed $F$   | $F_a = s_a^2 / s_e^2$            | $F_b = s_b^2 / s_e^2$            | $F_{ab} = s_{ab}^2 / s_e^2$           |                            |
| Tabulated $F$  | $F_{[1-\alpha; (a-1), ab(n-1)]}$ | $F_{[1-\alpha; (b-1), ab(n-1)]}$ | $F_{[1-\alpha; (a-1)(b-1), ab(n-1)]}$ |                            |

پیوست ج:

نتایج مدل سازی فرسایش حاصل از خوردگی گلوله ها

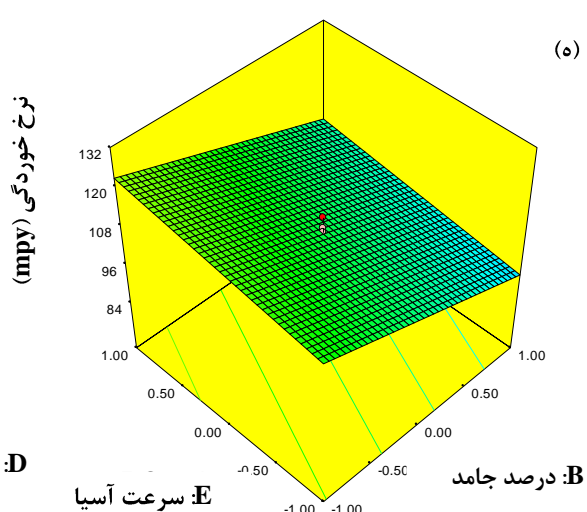
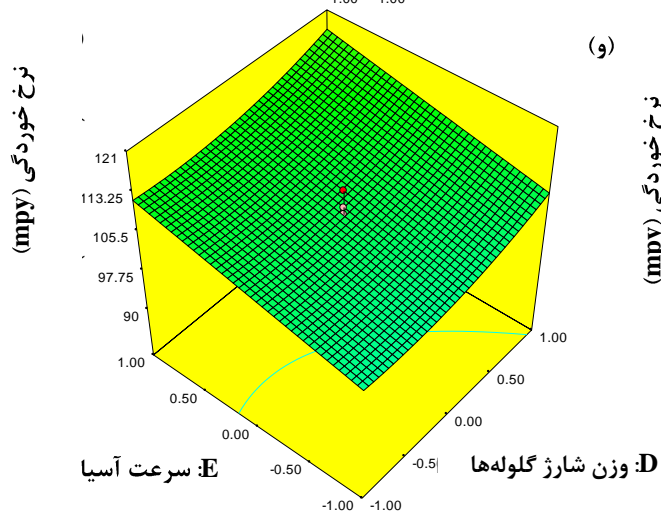
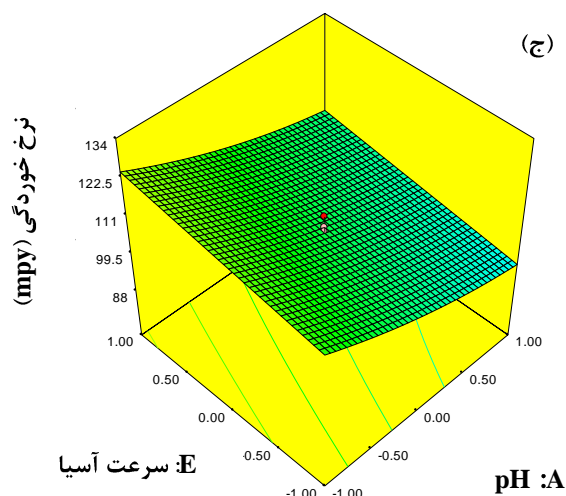
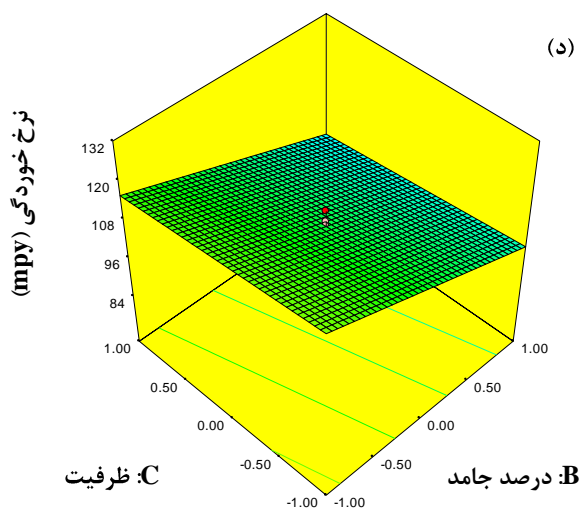
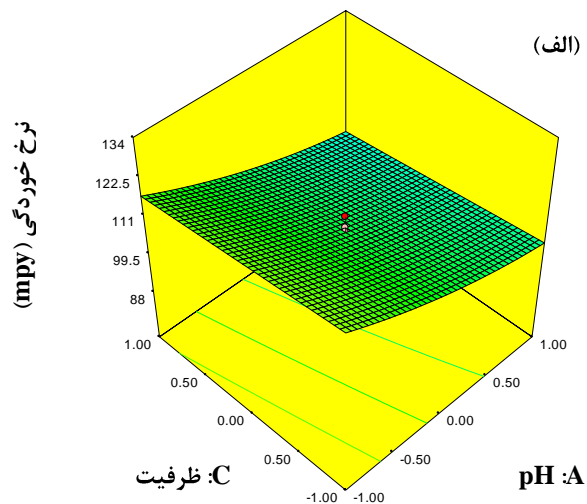
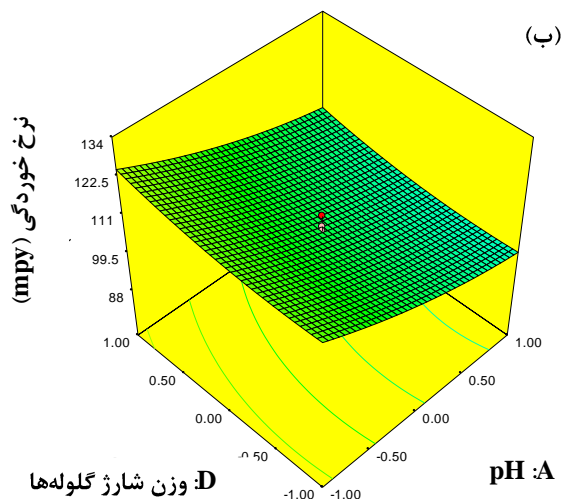
جدول (۱): آنالیز واریانس مدل Quadratic در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین

| میزان P  | میزان F  | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع تغییرات                  |
|----------|----------|----------------|------------|--------------|-------------------------------|
| < ۰/۰۰۰۱ | ۱۶/۱۷۴۳۱ | ۴۶۶/۹۸۱۵       | ۲۷         | ۱۲۶۰۸/۵      | مدل                           |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۱۲۸/۹۸۱۷ | ۳۷۲۳/۹۳۵       | ۱          | ۳۷۲۳/۹۳۵     | pH (A)                        |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۱۵۴/۸۹۷۴ | ۴۴۷۲/۱۶۸       | ۱          | ۴۴۷۲/۱۶۸     | درصد جامد (B)                 |
| ۰/۰۰۵۰   | ۹/۷۳۸۳۹۵ | ۲۸۱/۱۶۵۱       | ۱          | ۲۸۱/۱۶۵۱     | ظرفیت (C)                     |
| ۰/۰۰۴۲   | ۱۰/۱۹۱۶۷ | ۲۹۴/۲۵۲        | ۱          | ۲۹۴/۲۵۲      | وزن شارژ گلوله (D)            |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۲۶/۷۲۷۶۱ | ۷۷۱/۶۷۴۴       | ۱          | ۷۷۱/۶۷۴۴     | سرعت آسیا (E)                 |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۶۹/۳۲۴۲۹ | ۲۰۰/۱/۵۱۸      | ۱          | ۲۰۰/۱/۵۱۸    | زمان خردایش (F)               |
| ۰/۳۱۷۲   | ۱/۰۴۷۵۵۳ | ۳۰/۲۴۴۷۵       | ۱          | ۳۰/۲۴۴۷۵     | pH × درصد جامد                |
| ۰/۹۶۰۸   | ۰/۰۰۲۴۶۸ | ۰/۰۷۱۲۵۳       | ۱          | ۰/۰۷۱۲۵۳     | pH × ظرفیت                    |
| ۰/۶۵۵۴   | ۰/۲۰۴۶۳۶ | ۵/۹۰۸۲۰۳       | ۱          | ۵/۹۰۸۲۰۳     | pH × وزن شارژ گلوله           |
| ۰/۴۷۳۱   | ۰/۵۳۲۹۵۵ | ۱۵/۳۸۷۳۸       | ۱          | ۱۵/۳۸۷۳۸     | pH × سرعت آسیا                |
| ۰/۰۴۴۰   | ۴/۵۶۳۱۷۲ | ۱۳۱/۷۴۷        | ۱          | ۱۳۱/۷۴۷      | pH × زمان خردایش              |
| ۰/۰۸۹۹   | ۳/۱۴۸۰۱۶ | ۹۰/۸۸۸۹        | ۱          | ۹۰/۸۸۸۹      | درصد جامد × ظرفیت             |
| ۰/۸۱۸۲   | ۰/۰۵۴۱۰۲ | ۱/۵۶۲۰۲۸       | ۱          | ۱/۵۶۲۰۲۸     | درصد جامد × وزن شارژ گلوله    |
| ۰/۱۶۵۴   | ۲/۰۵۸۴۸۸ | ۵۹/۴۳۲۲۵       | ۱          | ۵۹/۴۳۲۲۵     | درصد جامد × سرعت آسیا         |
| ۰/۱۷۲۸   | ۱/۹۸۵۵۱۱ | ۵۷/۳۲۵۲۸       | ۱          | ۵۷/۳۲۵۲۸     | درصد جامد × زمان خردایش       |
| ۰/۳۶۴۴   | ۰/۸۵۷۶۹۵ | ۲۴/۷۶۳۲        | ۱          | ۲۴/۷۶۳۲      | ظرفیت × وزن شارژ گلوله        |
| ۰/۵۸۴۵   | ۰/۳۰۸۰۳۹ | ۸/۸۹۳۶۵۳       | ۱          | ۸/۸۹۳۶۵۳     | ظرفیت × سرعت آسیا             |
| ۰/۰۷۳۵   | ۳/۵۳۲۶۸۲ | ۱۰۱/۹۹۴۹       | ۱          | ۱۰۱/۹۹۴۹     | ظرفیت × زمان خردایش           |
| ۰/۵۷۷۰   | ۰/۳۲۰۵۸۱ | ۹/۲۵۵۷۵۳       | ۱          | ۹/۲۵۵۷۵۳     | وزن شارژ گلوله × سرعت آسیا    |
| ۰/۹۴۴۸   | ۰/۰۰۴۹۱۱ | ۰/۱۴۱۷۷۸       | ۱          | ۰/۱۴۱۷۷۸     | وزن شارژ گلوله × زمان خردایش  |
| ۰/۵۶۵۶   | ۰/۳۴۰۲۴۶ | ۹/۸۲۳۵۲۸       | ۱          | ۹/۸۲۳۵۲۸     | سرعت آسیا × زمان خردایش       |
| ۰/۰۲۱۹   | ۶/۰۸۴۷۶۴ | ۱۷۵/۶۷۸۱       | ۱          | ۱۷۵/۶۷۸۱     | pH <sup>2</sup>               |
| ۰/۱۱۶۳   | ۲/۶۷۳۳۳۸ | ۷۷/۱۸۴۱        | ۱          | ۷۷/۱۸۴۱      | (درصد جامد) <sup>۲</sup>      |
| ۰/۲۲۶۵   | ۱/۵۴۸۰۰۸ | ۴۴/۶۹۳۷۹       | ۱          | ۴۴/۶۹۳۷۹     | (ظرفیت) <sup>۲</sup>          |
| ۰/۰۳۸۶   | ۴/۸۳۸۱۸۹ | ۱۳۹/۶۸۷۳       | ۱          | ۱۳۹/۶۸۷۳     | (وزن شارژ گلوله) <sup>۲</sup> |
| ۰/۳۵۴۷   | ۰/۸۹۳۹   | ۲۵/۸۰۸۵۲       | ۱          | ۲۵/۸۰۸۵۲     | (سرعت آسیا) <sup>۲</sup>      |
| ۰/۱۸۸۰   | ۱/۸۴۶۰۱  | ۵۳/۲۹۷۶۵       | ۱          | ۵۳/۲۹۷۶۵     | (زمان خردایش) <sup>۲</sup>    |
|          |          | ۲۸/۸۷۱۸۱       | ۲۲         | ۶۳۵/۱۷۹۷     | باقیمانده                     |
| ۰/۱۲۳۱   | ۲/۸۷۸۹۱۸ | ۳۳/۹۰۰۱۸       | ۱۷         | ۵۷۶/۳۰۳۱     | عدم فیت بودن                  |
|          |          | ۱۱/۷۷۵۳۲       | ۵          | ۵۸/۸۷۶۶      | خطای خالص                     |
|          |          |                | ۴۹         | ۱۳۲۴۳/۶۸     | Cor Total                     |

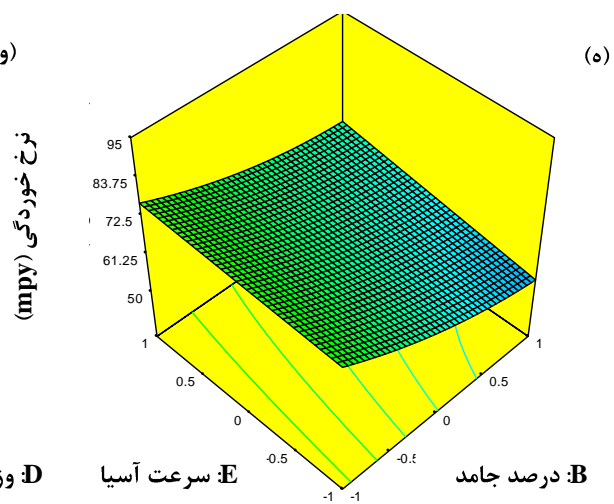
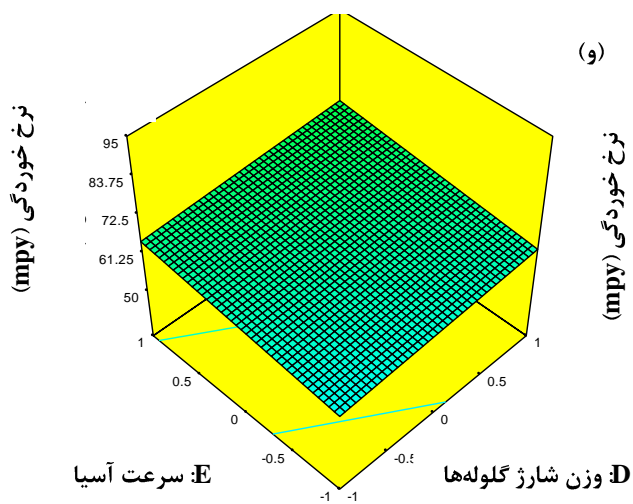
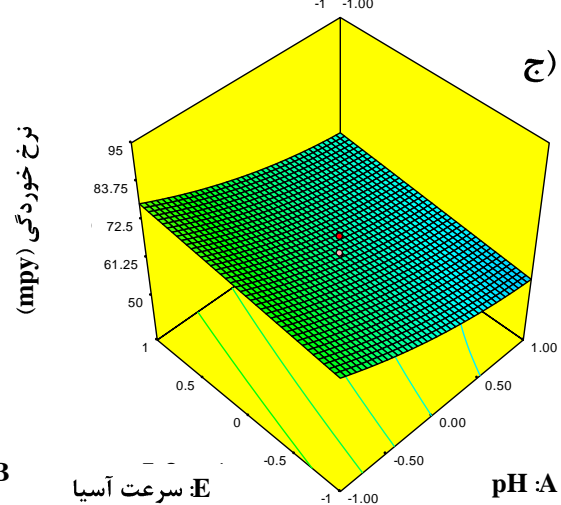
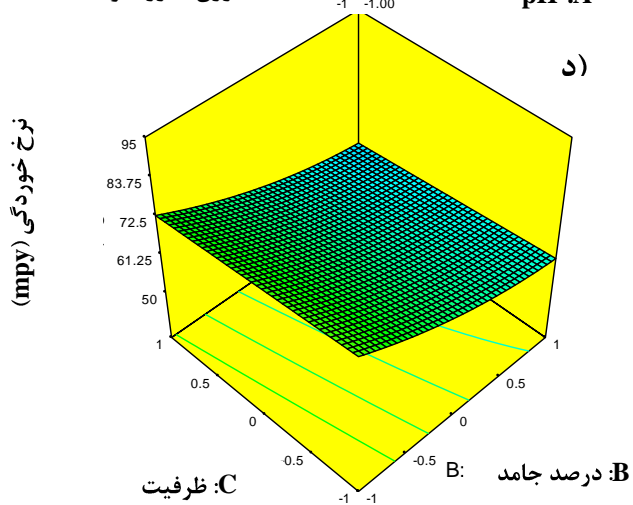
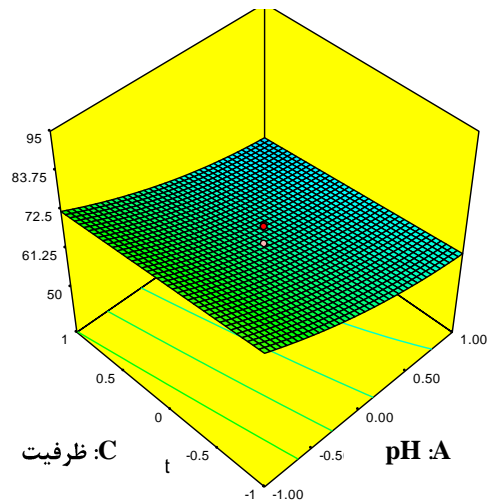
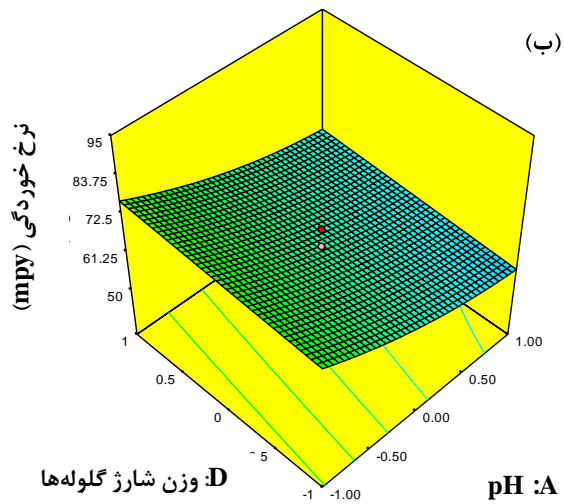


جدول (۲): آنالیز واریانس مدل Quadratic در روش سطح پاسخ برای گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا

| میزان P  | میزان F  | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع تغییرات                        |
|----------|----------|----------------|------------|--------------|-------------------------------------|
| < ۰/۰۰۰۱ | ۱۱/۲۸۹۴۵ | ۳۲۸/۸۶۷۲       | ۲۷         | ۸۸۷۹/۴۱۳     | مدل                                 |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۹۶/۳۴۶۸۵ | ۲۸۰۶/۶۳        | ۱          | ۲۸۰۶/۶۳      | pH (A)                              |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۹۹/۹۱۰۳۴ | ۲۹۱۰/۴۳۶       | ۱          | ۲۹۱۰/۴۳۶     | درصد جامد (B)                       |
| ۰/۰۲۲۰   | ۶/۰۷۸۶۰۴ | ۱۷۷/۰۷۲۶       | ۱          | ۱۷۷/۰۷۲۶     | ظرفیت (C)                           |
| ۰/۰۳۵۸   | ۴/۹۹۸۸۳۸ | ۱۴۵/۶۱۸۶       | ۱          | ۱۴۵/۶۱۸۶     | وزن شارژ گلوله (D)                  |
| ۰/۰۰۱۶   | ۱۳/۰۳۰۳۱ | ۳۷۹/۵۷۹۲       | ۱          | ۳۷۹/۵۷۹۲     | سرعت آسیا (E)                       |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۵۳/۰۳۰۳۸ | ۱۵۴۴/۸         | ۱          | ۱۵۴۴/۸       | زمان خردایش (F)                     |
| ۰/۹۳۲۴   | ۰/۰۰۷۳۶۴ | ۰/۲۱۴۵۱۳       | ۱          | ۰/۲۱۴۵۱۳     | pH × درصد جامد                      |
| ۰/۶۸۶۲   | ۰/۱۶۷۶۱۹ | ۴/۸۸۲۸۱۳       | ۱          | ۴/۸۸۲۸۱۳     | pH × ظرفیت                          |
| ۰/۵۹۷۹   | ۰/۲۸۶۴۲۲ | ۸/۳۴۳۶۱۳       | ۱          | ۸/۳۴۳۶۱۳     | pH × وزن شارژ گلوله                 |
| ۰/۳۹۶۲   | ۰/۷۴۸۸۰۴ | ۲۱/۸۱۳۰۱       | ۱          | ۲۱/۸۱۳۰۱     | pH × سرعت آسیا                      |
| ۰/۳۷۳۴   | ۰/۸۲۵۴۹۷ | ۲۴/۰۴۷۱۱       | ۱          | ۲۴/۰۴۷۱۱     | pH × زمان خردایش                    |
| ۰/۴۸۰۰   | ۰/۵۱۶۳۸۷ | ۱۵/۰۴۲۶۱       | ۱          | ۱۵/۰۴۲۶۱     | درصد جامد × ظرفیت                   |
| ۰/۵۲۱۳   | ۰/۴۲۴۸۲۴ | ۱۲/۳۷۵۳۱       | ۱          | ۱۲/۳۷۵۳۱     | درصد جامد × وزن شارژ گلوله          |
| ۰/۰۸۹۴   | ۳/۱۵۸۳۶۲ | ۹۲/۰۰۴۶۱       | ۱          | ۹۲/۰۰۴۶۱     | درصد جامد × سرعت آسیا               |
| ۰/۲۱۴۶   | ۱/۶۳۳۳۴۱ | ۴۷/۵۸۰۰۱       | ۱          | ۴۷/۵۸۰۰۱     | درصد جامد × زمان خردایش             |
| ۰/۸۹۷۵   | ۰/۰۱۶۹۹۳ | ۰/۴۹۵۰۱۲       | ۱          | ۰/۴۹۵۰۱۲     | ظرفیت × وزن شارژ گلوله              |
| ۰/۶۶۴۶   | ۰/۱۹۳۲   | ۵/۶۲۸۰۱۲       | ۱          | ۵/۶۲۸۰۱۲     | ظرفیت × سرعت آسیا                   |
| ۰/۰۷۱۷   | ۳/۵۸۱۴۳۸ | ۱۰۴/۳۲۹        | ۱          | ۱۰۴/۳۲۹      | ظرفیت × زمان خردایش                 |
| ۰/۸۳۳۴   | ۰/۰۴۵۳۲۴ | ۱/۳۲۰۳۱۳       | ۱          | ۱/۳۲۰۳۱۳     | وزن شارژ گلوله × سرعت آسیا          |
| ۰/۶۶۳۶   | ۰/۱۹۴۳۵۴ | ۵/۶۶۱۶۱۳       | ۱          | ۵/۶۶۱۶۱۳     | وزن شارژ گلوله × زمان خردایش        |
| ۰/۲۸۰۵   | ۱/۲۲۴۱۱۳ | ۳۵/۶۵۹۰۱       | ۱          | ۳۵/۶۵۹۰۱     | سرعت آسیا × زمان خردایش             |
| ۰/۰۰۸۳   | ۸/۴۲۱۸۸  | ۲۴۵/۳۳۳۴       | ۱          | ۲۴۵/۳۳۳۴     | pH <sup>۲</sup>                     |
| ۰/۰۰۶۲   | ۹/۱۵۹۷۵۷ | ۲۶۶/۸۲۸۱       | ۱          | ۲۶۶/۸۲۸۱     | ظرفیت <sup>۲</sup> (درصد جامد)      |
| ۰/۷۸۱۹   | ۰/۰۷۸۵۳۲ | ۲/۲۸۷۶۶۱       | ۱          | ۲/۲۸۷۶۶۱     | ظرفیت <sup>۲</sup> (ظرفیت)          |
| ۰/۶۰۹۰   | ۰/۲۶۹۲۹۷ | ۷/۸۴۴۷۶۱       | ۱          | ۷/۸۴۴۷۶۱     | ظرفیت <sup>۲</sup> (وزن شارژ گلوله) |
| ۰/۶۱۷۱   | ۰/۲۵۷۱۹۹ | ۷/۴۹۲۳۲        | ۱          | ۷/۴۹۲۳۲      | ظرفیت <sup>۲</sup> (سرعت آسیا)      |
| ۰/۶۵۱۹   | ۰/۲۰۹۱۸۱ | ۶/۰۹۳۵۴۱       | ۱          | ۶/۰۹۳۵۴۱     | ظرفیت <sup>۲</sup> (زمان خردایش)    |
|          |          | ۲۹/۱۳۰۴۸       | ۲۲         | ۶۴۰/۸۷۰۶     | باقیمانده                           |
| ۰/۰۹۲۱   | ۳/۳۶۶۹۵  | ۳۴/۶۶۹۷۲       | ۱۷         | ۵۸۹/۳۸۵۲     | عدم فیت بودن                        |
|          |          | ۱۰/۲۹۷۰۷       | ۵          | ۵۱/۴۸۵۳۵     | خطای خالص                           |
|          |          |                | ۴۹         | ۹۵۲۰/۲۸۴     | Cor Total                           |



شکل (۱): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی با آلیاژ پایین بر اساس فاکتورهای pH-ظرفیت (الف)، pH-وزن شارژ گلوله‌ها (ب)، pH-سرعت آسیا (ج)، درصد جامد-ظرفیت (د)، درصد جامد-سرعت آسیا (ه) و وزن شارژ گلوله‌ها-سرعت آسیا (و)

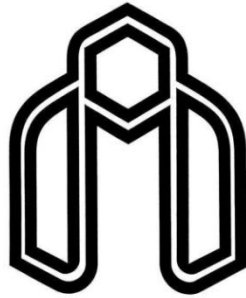


شکل (۲): نمودار سطوح تراز حاصل از نرخ خوردگی گلوله‌های فولادی کربن و کروم بالا بر اساس فاکتورهای pH-ظرفیت (الف)، pH-وزن شارژ گلوله‌ها (ب)، pH-سرعت آسیا (ج)، درصد جامد-ظرفیت (د)، درصد جامد-سرعت آسیا (ه) و وزن شارژ گلوله‌ها-سرعت آسیا (و)

## **Abstract**

Ball mills are common grinding equipment in the mineral processing industries, which their balls are damageable components. The ball wear is resulted from three mechanisms of impact, abrasion and corrosion, in which corrosion mechanism due to chemical-electrochemical nature has been investigated less. On the other hand, corrosion is observed more in grinding of sulphide ores, because most sulfide minerals are semiconductors. The aims of this research work were focused on studying of the electrochemical behavior of ball mills, evaluating of the factors affecting the balls corrosion rate and modeling of the steel balls corrosion to find an optimum condition for minimizing the corrosion rate. In order to obtain goals of thesis, a specialized electrochemical grinding system including, ball mill and electrochemical equipment (potentiostat/galvanostat accompanied by a three-electrode system) in Sarcheshmeh copper mine was designed and constructed. Study of electrochemical behavior of ball mill showed that the ball type, water chemistry, aeration conditions into the mill, ore mineralogy, increase of pH and solid percentage changed considerably the electrochemical characterizations and led to a reducing environment. Consequently, it caused that the galvanic couple among minerals and balls, oxidized iron species inside the mill and copper recovery in flotation process accordingly reduced. It also was estimated that 73.51% of the corrosion products, was generated from the steel balls oxidation. Evaluation of factors affecting the corrosive wear indicated that nitrogenization the mill, using distilled water and high carbon chromium steel balls, increase of pulp pH and solid content strongly reduced balls corrosion rate. It was also observed that corrosion rate enhanced with reducing throughout and increasing grinding time and mill speed. In addition, the ball charge weight enhanced, up to certain value, the rate of corrosion increased and thereafter decreased. Meanwhile, it was determined that corrosion mechanism was formed 27.68% of balls total wear. The modeling of balls corrosions implied minimum corrosion rate of low alloy steel ball (78.38 mpy) obtained at pulp pH=9.8, solid percentage, 40, throughout, 720g, ball charge weight, 9.25kg, rotation speed, 70rpm and grinding time, 10 minutes, while minimum corrosion rate for high carbon chromium steel (40.76 mpy) obtained at pulp pH=10, solid percentage, 40, throughout, 700g, ball charge weight, 8kg, rotation speed, 70rpm and grinding time, 10.5 minutes. Finally, mathematical models with coefficients of correlation upper than 0.9 were suggested.

**Keywords:** Sarcheshmeh copper ore, galvanic interaction, balls corrosion, and modeling.



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining, Oil and Geophysics

**Electrochemical investigation of effective factors on  
grinding environment of copper sulfide minerals and  
modeling to control medium corrosion rate**

PhD Thesis  
in Mineral Processing Engineering

By:  
**Asghar Azizi**

Supervisors:  
**Prof. Seid Ziaeddin Shafaei**  
**Prof. Mohammad Noaparast**

Advisor:  
**Dr. Mahammad Karamoozian**

September 2013