

"یادداشت فنی"

## انتخاب گونه گیاهی مناسب برای بازسازی معدن مس سرچشمه به روش TOP SIS فازی

ایرج علوی<sup>۱</sup>، افشین اکبری<sup>۲\*</sup>، محمد عطایی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، Iraj\_alavi@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت ۲۰ دی ۱۳۹۰، پذیرش ۸ بهمن ۱۳۹۱)

### چکیده

با استخراج هرچه بیشتر از معادن و وسیع تر شدن فضای عملیاتی آن‌ها، وسعت زمین‌های تحت تأثیر فعالیت‌های معدن‌کاری به‌ویژه محل‌های انباشت باطله، افزایش می‌یابد. در نتیجه ضرورت بازسازی معادن نیز بیشتر می‌شود. انتخاب گونه گیاهی و کاشت آن به منظور حفظ محیط زیست منطقه و بازسازی معدن، از مهم‌ترین راه‌کارهاست. در این مقاله معدن مس سرچشمه که یکی از ۱۰ معدن بزرگ مس جهان است، مطالعه شد، گونه‌های متناسب با فاکتورهای اولیه طرح بازسازی شامل نوع استفاده مجدد از زمین استخراج شده، شرایط اقلیمی و طبیعت خاک انتخاب شدند و سپس فاکتورهای ثانویه مشخص شدند، در ادامه ماتریس‌های تصمیم‌گیری بر اساس پرسشنامه‌هایی که توسط کارشناسان تکمیل شد، به دست آمد و گونه‌های گیاهی بر اساس فاکتورهای ثانویه که معیارهای چشم‌انداز منطقه، مقاومت در برابر بیماری و حشرات، قدرت و نحوه رشد، دسترسی به گونه گیاهی، بازدهی اقتصادی، حفاظت از خاک و ذخیره آب، جلوگیری از انواع آلودگی‌ها، می‌باشند، با روش TOP SIS فازی، اولویت‌بندی شدند و مناسب‌ترین گونه‌های گیاهی در محدوده معدن‌کاری و سدباطله به ترتیب اولویت، بادام کوهی (بادام وحشی)، گز، بنه (پسته وحشی)، اُفدرا، گون، سالسولا به‌دست آمدند.

### کلمات کلیدی

بازسازی معدن، انتخاب گونه گیاهی، معدن مس سرچشمه، روش TOP SIS فازی، بادام کوهی

## ۱- مقدمه

بازسازی معدن به صورت بخشی جدایی ناپذیر از طراحی کل معدن باید از همان مراحل ابتدایی عملیات معدن کاری مورد توجه قرار گیرد. سایت معدن باید بازسازی شود که استفاده مجدد از زمین و ساختارشناسی سایت معدن یا محیط زیست سایت باید باهم سازگار باشند [۱]. بیشترین روش‌هایی که برای بازسازی زمین‌های آلوده به کار می‌روند با نظر کارشناسی مهندسان ژئوشیمی، آب‌شناسی، بوم‌شناسی و محیط زیستی هستند که ۳ مرحله دارد: برداشتن منبع آلودگی، استفاده نکردن از سایت معدن و نوسازی سایت [۲]. برای بازسازی یک معدن، به منظور هر نوع استفاده بعدی از زمین‌های تحت تأثیر و حفاظت از محیط زیست منطقه، انتخاب و کاشت گونه‌های گیاهی یکی از مراحل مهم است [۳]. گیاهان انتخابی، باید در مقابل شرایط نامساعد خاک منطقه معدن کاری شده و باطله معدنی، مقاوم باشند [۴]. اسیدیته مناسب برای رشد گیاهان ۶.۵ تا ۷.۵ است [۵]. گونه‌های گیاهی بومی بهترین سازگاری را با شرایط اقلیمی منطقه دارند و در صورت اضافه شدن کود و تقویت کننده، شرایط رشد بهتر می‌شوند [۶]. برادشاو، چن و همکاران، تافی، کریک و کروگر، فاکتورهای محدود کننده رشد گیاهان روی خاک معدن کاری شده را ارزیابی کردند. کایرنس، اررینگتون، کاوو، برای استفاده مجدد از زمین معدن کاری شده تحقیقاتی انجام دادند. تأثیر گیاه کاری در زمین معدن کاری شده توسط آلکساندر و پاسکه بررسی شد. اوبرمن، اصانلو، اکبری و حمیدیان، نوع استفاده مجدد از زمین معدن کاری شده را مشخص کردند. سلطان محمدی، آقاجانی، رضایی و اصانلو به روش‌های ELECTER, AHP و TOPSIS، استفاده‌های ممکن از زمین‌های استخراج شده معدنی را بررسی کردند. در رابطه با موضوع تخصصی این تحقیق نیز، اصانلو، پارسایی تحقیقی در مورد بازسازی معدن مس سرچشمه انجام دادند. بانگیان انتخاب گونه گیاهی برای بازسازی معدن مس سونگون را به روش تحلیل سلسله مراتبی انجام داد. علوی و همکاران برای بازسازی معدن مس سرچشمه، بهترین گونه گیاهی را به روش AHP فازی به دست آوردند.

## ۲- اهمیت انتخاب گونه‌های گیاهی در بازسازی معدن

انتخاب گونه گیاهی برتر در هر برنامه بازسازی فواید متعددی چون حفظ سلامت و احیای محیط زیست، چشم انداز منطقه، سود اقتصادی، رفاه زندگی برای مردم منطقه، کاهش آلودگی خاک و آب و هوا، ذخیره آب زیرزمینی، جلوگیری از فرسایش

خاک، دارد [۷]. عوامل مؤثر بر انتخاب گونه‌های گیاهی به دو گروه اولیه (اصلی) و ثانویه (فرعی) تقسیم می‌شوند. عوامل اصلی آن دسته از عواملی هستند که گونه‌های گیاهی منتخب به‌طور قطع باید دارای تناسب و هماهنگی لازم با آن‌ها باشند. ولیکن عوامل فرعی عواملی هستند که شرایط منطقه را شام می‌شوند و بر اساس آنها گونه‌های گیاهی منتخب نسبت به یکدیگر اولویت‌بندی خواهند شد [۸].

الف) عوامل اولیه عبارتند از:

- ۱) نوع استفاده مجدد از زمین
- ۲) شرایط اقلیمی منطقه
- ۳) طبیعت خاک

## ۲-۱- انتخاب گونه گیاهی بر اساس عوامل اولیه

گونه‌های گیاهی باید دارای هماهنگی و تناسب لازم با فاکتورهای اولیه باشند.

در مرحله بعد گونه‌های موجود نسبت به عامل اولیه دوم مورد بررسی قرار می‌گیرند.

انواع استفاده مجدد از زمین می‌تواند شامل موارد زیر باشد: کشاورزی، جنگل داری، دریاچه، آبیگر، تفریح، ساخت و ساز، نگهداری و بقا، خاکریزی [۹].

در مرحله دوم از بین گونه‌های منتخب از مرحله اول، گونه‌های متناسب با شرایط اقلیمی محل انتخاب شده و بقیه گزینه‌ها مردود می‌شوند. در این مرحله گونه‌های بومی منطقه دارای ارجحیت از نظر سازگاری با شرایط اقلیمی می‌باشند. شرایط اقلیمی منطقه شامل موارد زیر است:

شیب و نوع زمین، روشنایی و تابش آفتاب، آب و هوا، رطوبت، دما، باد، آلاینده‌های هوا.

کیفیت خاک منطقه نیز به عنوان فاکتور سوم برای عوامل اولیه، از میان گونه‌های منتخب بر اساس فاکتورهای اول و دوم برخی از گزینه‌ها را مردود می‌نماید.

ب) عوامل ثانویه عبارتند از:

چشم‌انداز منطقه، مقاومت در برابر بیماری، تعدی توسط انسان، قدرت و نحوه رشد، سازگاری با سایر گونه‌ها در منطقه، بازدهی اقتصادی، مقاومت در برابر حشرات، حفاظت از خاک، ذخیره آب، جلوگیری از انواع آلودگی‌ها، دسترسی به گونه گیاهی

## ۲-۲- اولویت بندی گونه های گیاهی بر اساس عوامل ثانویه

در این روش M گزینه به وسیله N معیار، مورد ارزیابی قرار می گیرند. اساس این روش بر این است که گزینه انتخابی، باید کمترین فاصله را با راه حل ایده آل (بهترین حالت) و بیشترین فاصله را با راه حل ضد ایده آل (بدترین حالت) داشته باشد. کلیه مقایسه ها بر اساس قضاوت های کارشناسان و تصمیم گیرنده ها انجام می شود.

### ۳- مطالعه موردی

شهر رفسنجان در حاشیه جنوبی کویر لوت و در شمال غربی استان کرمان قرار گرفته است. معدن مس سرچشمه با مختصات "۲۰'۵۲" ۵۵° طول شرقی و "۴۰'۵۶" ۲۹° عرض شمالی و ارتفاع از سطح دریا به طور متوسط ۲۶۲۰ متر، یکی از ۱۰ معدن بزرگ مس دنیاست که در ۶۵ کیلومتری جنوب غربی رفسنجان قرار دارد. معدن مس سرچشمه در جنوب شرقی ایران واقع شده است [۱۰].

### ۴- انتخاب گونه گیاهی برای بازسازی معدن مس سرچشمه رفسنجان

اهداف این تحقیق، بازسازی و حفظ محیط زیست معدن، انتخاب گونه گیاهی مناسب برای بازسازی معدن و زیباسازی منطقه اطراف معدن و سد باطله هستند. با توجه به اینکه معدن مس سرچشمه مشکلات زیست محیطی زیادی را برای مردم و زمین ها و آب های زیرزمینی منطقه به وجود آورده است، برای زیبایی چشم انداز منطقه و حفظ محیط زیست منطقه نیاز به بازسازی به روش های مختلف دارد که به دلیل دور بودن معدن از شهرو سرسبز نبودن منطقه انتخاب گونه گیاهی مناسب بهترین روش است.

### ۴-۱- بررسی عوامل اولیه انتخاب گونه های گیاهی در معدن سرچشمه

- نوع استفاده مجدد از زمین

با توجه به شرایط موجود در منطقه و دور بودن از شهر و این که در تحقیق بازسازی معدن سرچشمه، در تمامی موارد از

در زیر، ضریب اهمیت های پرسشنامه ها به صورت کیفی و کمی آمده است. اهمیت های کمی، جایگزین توصیف های کیفی شد. اعداد فازی برای بیان متغیر های زبانی در ماتریس تصمیم گیری (۹ تا ۱) تعریف شده که خیلی کم [۱،۲،۳]، کم [۲،۳،۵]،

استفاده مجدد از زمین معدن کاری، گیاه کاری از موارد ضروری برای اجرای طرح بازسازی بوده است، پس نوع استفاده مجدد بر پایه گیاه کاری بنا نهاده شد [۱۰].

- شرایط اقلیمی

رفسنجان دارای زمستان های سرد و تابستان های گرم و خشک می باشد که منطقه کویری با اقلیم خشک معتدل با میانگین بارندگی ۹۱ میلی متر است. متوسط رطوبت نسبی ایستگاه معدن طی دوره آماری موجود ۳۸٪ است. تغییرات سالیانه ی درجه حرارت در این ناحیه از ۲۲- تا ۳۲+ درجه سانتی گراد می باشد. گیاه های مورد نظر باید سازگار با این شرایط جوی باشند [۱۰].

- طبیعت خاک

طبق آزمایشات انجام شده از خاک منطقه، به علت وجود پیریت، اسیدیته خاک زیاد است. میزان مس، سرب، مولیبدن و سولفات بیش از مقدار استاندارد است [۱۰].

### ۴-۲- انتخاب گونه های گیاهی بر اساس عوامل ثانویه با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده آل فازی

با توجه به عوامل اصلی و تطابق گونه های مختلف گیاهان با این شرایط موجود در محدوده مجتمع مس سرچشمه کرمان ۶ گونه گیاهی برتر و سازگار با این شرایط انتخاب شدند که عبارتند از: بنه، بادام کوهی، اُفدرا، گون، سالسولا، گز. سپس با توجه به ۷ معیار چشم انداز، مقاومت در برابر بیماری و حشرات، نحوه و قدرت رشد، دسترسی به گونه گیاهی، بازدهی اقتصادی، حفاظت از خاک و ذخیره آب، جلوگیری از آلودگی ها، مناسب ترین گزینه با روش شباهت به گزینه ایده آل فازی انتخاب می گردد که با مراحل زیر به دست آمد.

اساس این روش فاصله از حل ایده آل مثبت و حل ایده آل منفی است که شامل مراحل زیر است [۱۱].

۱- با استفاده از پرسشنامه ها، ماتریس تصمیم گیری گزینه ها به معیار ها بدست آمده شد که در جدول ۱ آمده است.

متوسط [۷،۵،۳]، زیاد [۹،۷،۵]، خیلی زیاد [۹،۹،۷] هستند [۱۰].

جدول ۱: ماتریس تصمیم گیری گزینه ها نسبت به معیارها

چشم انداز منطقه	مقاومت در برابر بیماری	نحوه رشد	گونه گیاهی دسترسی به	اقتصاد	ذخیره خاک و آب	جلوگیری از آلودگی ها
بنه	۲.۳.۵	۲.۳.۵	۹.۷.۵	۷.۵.۳	۹.۷.۵	۹.۹.۷
بادام	۷.۵.۳	۹.۷.۵	۹.۹.۷	۹.۷.۵	۹.۷.۵	۹.۷.۵
افدرا	۷.۵.۳	۷.۵.۳	۹.۷.۵	۷.۵.۳	۷.۵.۳	۹.۷.۵
گون	۲.۳.۵	۷.۵.۳	۹.۷.۵	۲.۳.۵	۷.۵.۳	۲.۳.۵
سالسولا	۷.۵.۳	۷.۵.۳	۲.۳.۵	۲.۳.۵	۷.۵.۳	۲.۳.۵
گز	۹.۷.۵	۹.۷.۵	۷.۵.۳	۲.۳.۵	۹.۷.۵	۷.۵.۳

$$V_j^+ = \max_i \{ \tilde{v}_{ij3} \} \quad (3)$$

$$V_j^- = \min_i \{ \tilde{v}_{ij1} \} \quad (4)$$

که:  $V_j^+ =$  ایده آل ترین هر ستون،  $V_j^- =$  غیرایده آل ترین هر ستون

$$A^+ = (\tilde{V}_1^+, \tilde{V}_2^+, \dots, \tilde{V}_n^+) \quad (5)$$

$$A^- = (\tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \dots, \tilde{V}_n^-) \quad (6)$$

$A^- =$  حل ضد ایده آل،  $A^+ =$  حل ایده آل،

$\tilde{V}_1^+ =$  عنصر ایده آل ماتریس بی بعد موزون،  $\tilde{V}_n^- =$  عنصر ضد ایده آل ماتریس بی بعد موزون

۶- تعیین فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل :

$$d_i^+ = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n (\tilde{V}_{ij} - V_j^+)^2} \quad (7)$$

$$d_i^- = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n (\tilde{V}_{ij} - V_j^-)^2} \quad (8)$$

$d_i^+ =$  فاصله از حل ایده آل،

$d_i^- =$  فاصله از حل ضد ایده آل

۷- تعیین شاخص شباهت

۲- وزن معیارها مشخص می شود.

بردار وزن (۱ تا ۰) از نرمالایز کردن ضریب اهمیتها بدست آمد که از تقسیم اعداد فازی کم اهمیتها بر مجموع آنها حساب شد که در زیر مشاهده می شود.  $[1 = 0.37, 2 = 0.74, 3 = 0.11, 5 = 0.18, 7 = 0.25, 9 = 0.33]$ .

۳- بدون بعد کردن ماتریس تصمیم: برای معیار مثبت، در هر ستون بیشترین عدد انتخاب شده، سپس همه درایهها بر آن تقسیم می شوند. برای معیار منفی، کمترین عدد برای هر ستون انتخاب شده و بر همه درایهها تقسیم می شوند.

$$c_j^+ = \max_j c_{ij} \quad (1)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right)$$

که:  $\tilde{r}_{ij} =$  عنصر ماتریس سلول بی مقیاس،  $c_j^+ =$  مولفه اول،  $c_j^* =$  ماکزیمم مولفه های هر ستون

۳- تشکیل ماتریس بدون بعد وزن دار شده

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{W}_{ij} \quad (2)$$

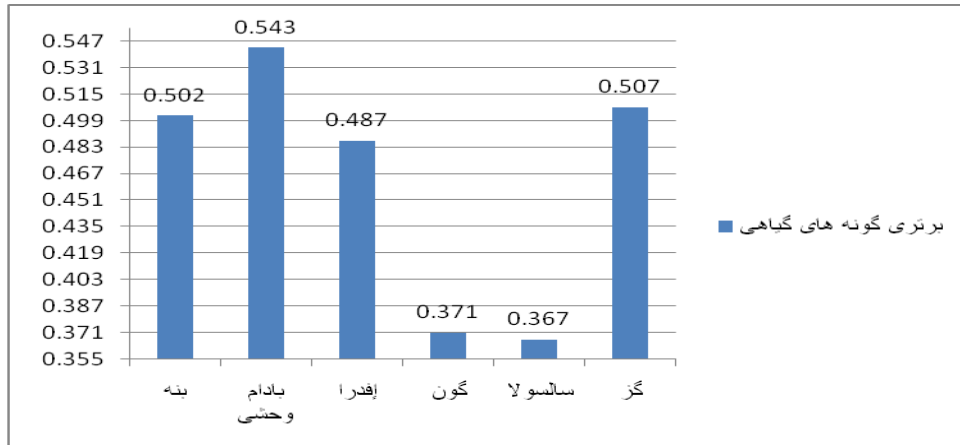
که:  $\tilde{V}_{ij} =$  عنصر بی مقیاس بی بعد،  $\tilde{W}_{ij} =$  بردار وزن

۴- تعیین حل ضد ایده آل و ایده آل : حل ایده آل برای معیار مثبت، ماکزیمم مولفه سوم و برای معیار منفی، مینیمم مولفه سوم، در هر ستون بدست می آید. حل ضد ایده آل برای معیار منفی، مینیمم مولفه اول و ماکزیمم مولفه اول، در هر ستون، بدست می آید.

۸- اولویت بندی گزینه‌ها: بر اساس ترتیب شاخص شباهت، در شکل ۱، اولویت گونه‌های گیاهی مشخص شد.

$$CC = \frac{d^-}{d^- + d^+} \quad (9)$$

که:  $CC =$  نزدیکی نسبی (شاخص شباهت)



شکل ۱: نمودار امتیازات گونه‌های گیاهی برای کاشت گیاهان برتر در معدن سرچشمه به روش TOP SIS فازی

#### ۵- نتیجه‌گیری

بخش عمده‌ای از اراضی رفسنجان که اغلب در مناطق بیابانی قرار دارند را مراتع فقیر تشکیل می‌دهند که بهره‌برداری از آن‌ها به عنوان چراگاه، فاقد توجیه فنی و اقتصادی است. در این تحقیق درخت بادام کوهی به عنوان سازگارترین گیاه در شرایط سخت منطقه معدنی مس سرچشمه با نظر کارشناسان مربوطه و امتیازدهی به معیارهای مختلف، با روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی، انتخاب شد. بعد از بررسی‌ها و تحقیقات جامعی که در منطقه انجام گرفت، نتایجی بر اساس برنامه‌های کنترلی تدوین شد که در صورت اجرا، کمک زیادی به بهبود محیط زیست اطراف مجتمع مس سرچشمه می‌کند که اهم برنامه‌ها و پیشنهادها در زیر آورده شده است.

۱- برنامه کنترل فرسایش خاک: باید هر ۶ ماه یک بار میزان فرسایش خاک، مورد بررسی قرار گرفته و تثبیت اراضی فرسایش یافته، انجام شود.

۲- برنامه کنترل منابع آب: برای حفظ تعادل سفره، باید ضوابطی مؤثر برای جلوگیری از برداشت اضافی آب و کنترل منابع آب اجرا شود. البته با توجه به بازیافت آب در زمان بهره‌برداری از سد باطله و استفاده مجدد از آن در فرآیند کنستانتتره مس، این عمل می‌تواند هر ۶ ماه یک بار صورت پذیرد.

۳- برنامه کنترل آلودگی‌های زیست محیطی: با در نظر گرفتن شرایط محیطی، منابع آلاینده و اثرات زیست محیطی مرتبط

با آن‌ها، انجام کلیه نمونه برداری‌ها و آزمایشات آب و خاک در مقاطع مختلف زمانی باید به صورت دوره‌ای به سازمان حفاظت محیط زیست گزارش شود و در مقایسه با استانداردهای زیست محیطی تحلیل شود.

۴- برنامه کنترل پوشش گیاهی: به منظور کنترل پوشش گیاهی منطقه، باید گونه‌های مناسب بومی سازگار با شرایط منطقه که در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی مؤثرند، کاشته شوند. در طی هر مقطع زمانی ۶ ماهه انجام عملیات نمونه برداری جهت کنترل کمی و کیفی پوشش گیاهی، نسبت به شرایط گذشته منطقه ضروری است.

برای انتخاب بهترین گونه گیاهی، ابتدا مناطق اطراف معدن مس سرچشمه کرمان مورد بازدید قرار گرفت. سپس یک سری آزمایشات، شامل آزمایش خاک، آب و رویش گیاهان بومی آن منطقه انجام شد. چندین گونه گیاهی که در حوالی معدن مس سرچشمه توانایی رویش دارند، به عنوان گزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اعمال نظر کارشناسان منابع طبیعی، محیط زیست و مهندسان معدن رفسنجان در فرم پرسشنامه، بهترین گونه گیاهی با توجه به شرایط و معیارهای تأثیر گذار، بادام کوهی (بادام وحشی)، با استفاده از روش TOPSIS فازی به دست آمد. البته گیاهان بنه، گز، گون، سالسولا، افدرا هم دارای شرایط خوبی هستند.

شایان ذکر است که چون برای اولین بار این تحقیق در معدن مس سرچشمه انجام گرفته است، نیاز به اجرای عملی آن در

- [10] Alavi, I., Akbari A., and Parsaei M., "*Plant type Selection for Sarcheshmeh Copper Mine reclamation by Fuzzy-AHP method*", BLOUR science and expertise magazine, AMIRKABIR University of Technology, Nom 29 (2011), 10-17.
- [11] Momeni, M., "*New Topics in Operation Research*", Faculty of Management University of Tehran, TEHRAN University Press, Vol1 (2006).1-63,187-231.

سال‌های پیش رو امری طبیعی است. البته با توجه به وضعیت وخیم زیست محیطی پیش آمده در اطراف معدن، کاشت این گونه‌های گیاهی باید در اولویت کاری مسئولان سرچشمه قرار گیرد، تا عناصر مضر و آلودگی‌های مختلف را جذب کرده و زیبایی خاصی به مناظر اطراف داده شود.

## منابع

- [1] Soltanmohammadi, H., Osanloo, M., Aghajani AB; 2010; "*An analytical approach with a reliable logic and a ranking policy for post-mining land-use determination*", *Land Use Policy*, vol 27, pp 364-372.
- [2] "*Environmental Impacts Associated With Mining Operation and Mineral Extraction Processes*", GDACE Mining and Environmental Impact Guide Chapter 9: *Environmental Impacts*, pp 109-191.
- [3] LU, Xia., HU, Zhen-qi., LIU, Wei-jie., HUANG, Xiao-yan; 2007; "*Vegetation Growth Monitoring Under Coal Exploitation Stress by Remote Sensing in the Bulianta Coal Mining Area*", Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China. *J China Univ Mining & Technol*, 17(4): 0479-0483.
- [4] N, Haque. , Peralta-Videa , J.R., Duarte-Gardea, M., Gardea-Torresdey, J.L; 2009; "*Differential effect of metals/metalloids on the growth and element uptake of mesquite plants obtained from plants grown at a copper mine tailing and commercial seeds*", *Bioresource Technology* 100, 6177-6182.
- [5] Akbari, A, D., Osanloo, M., Hamidian, H; 2007; "*Selecting post mining land use through analytical hierarchy processing method: case study in Sungun copper open pit mine of Iran*". pp5.
- [6] Redente, E. F., Baker, D. A; 1996; "*Direct revegetation of mine tailings- A case study in Colorado*". In *Planning, Rehabilitation and Treatment of Disturbed Lands*, Billings Symposium, 1996, p.183-191.
- [7] Bangian A H., Osanloo M; 2008; "*Multi Attribute Decision Model for Plant Species Selection in Mine Reclamation Plans: Case STUDY SUNGUN COPPER MINE*", Post-Mining, February 6-8, Nancy, France. 1-11.
- [8] Osanloo M., "*Mine Reclamation*". Tehran: AMIRKABIR University of Technology Press, Vol 1(2001). 183-193.
- [9] Soltanmohammadi. H., Osanloo, M., Rezaei, B., Aghajani, A.B; 2008; "*Achieving to some outranking relationships between post mining land uses through mined land suitability analysis*", *Int. J. Environ. Sci. Tech*, Vol 5, pp 535-546.