

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

HN10108150801

## اولویت بندی افزایش سیمان ، آهک و ماسه بادی به خاکهای رسی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی

محمدنقدی<sup>۱</sup> ، مصطفی یوسفی راد<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات اراک، گرایش خاک و پی

۲- استادیار دانشگاه علوم و تحقیقات اراک

<sup>۱</sup>Mnaghdi90@yahoo.com

### خلاصه

به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک تاکنون از روشهای مختلفی استفاده شده است از این مجموعه روش می توان به مخلوط کردن خاک با سیمان ، ماسه بادی و آهک به طور مجزا و یا با درصدهای ترکیبی اشاره کرد. بسته به نوع پروژه و محدودیت های موجود در آن و یا خواسته مورد نظر، یکی از گزینه ها انتخاب می گردد. در این تحقیق هدف پیدا کردن بهترین گزینه می باشد و معیارهای مورد نظر دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری، وزن مخصوص حداکثر و مدول الاستیسیته با کمترین هزینه بوده است. با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتب<sup>۱</sup> (AHP) مشخص شد مخلوط آهک-خاک رس بیشترین سازگاری را با معیارهای مورد نظر دارد.

واژه های کلیدی: فرایند سلسله مراتبی، خاک رس، سیمان، آهک، ماسه بادی

---

<sup>1</sup> Analytical hierarchy process

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

#### مقدمه

باتوجه به استفاده چشمگیر از خاک رس در پروژه ها و یا اجبار احداث سازه هادر خاکهای رسی بهبود خصوصیات فیزیکی خاک رس از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدین منظور جهت بالا بردن مقاومت خاک رس روش های مختلفی آزمایش شده است. من جمله مخلوط ماسه بادی-خاک، آهک-خاک، سیمان-خاک و در مواردی استفاده از مواد شیمیایی رami توان نام برد.

هدف از این تحقیق انتخاب یکی از گزینه های مذکور است که بیشترین مقاومت فشاری، وزن مخصوص حداکثر و مدول الاستیسته و کمترین هزینه را منجر شود. با استفاده از نتایج تحقیقات قبلی سایرین کاربرد روش AHP در این زمینه نشان داده شده است.

شروع بررسی علمی استفاده از مواد افزودنی به خاک رس جهت بهبود خصوصیات مقاومتی آن به سال 1960 بر میگردد. دایموند با مطالعه در مورد خصوصیات مقاومتی خاکهای رسی بهسازی شده به این نتیجه رسید که میتوان از این خاکها برای زیرسازی باند فرودگاه ها، ساخت سدهای خاکی و همچنین در نقاطی از سازه های آبی که امکان فرسایش وجود دارد استفاده کرد

چون در مورد میزان آهک مورد نیاز برای تثبیت خاکهای رسی مطالعاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که محدوده آهک مورد نیاز برای تثبیت خاکهای رسی بین ۲ تا ۸ درصد میباشد. میشل با مطالعه بر روی خصوصیات تراکمی خاکهای اصلاح شده به این نتیجه رسید که اگر فاصله زمانی بین تهیه نمونه و انجام آزمایش تراکم وجود داشته باشد، منجر به کاهش مقاومت محوری میشود. انجمن تحقیقاتی و اطلاعاتی ساخت صنعتی (CIRIA) با تحقیق بر روی تاثیر تاخیر در تراکم کردن خاکهای مخلوط شده با مواد افزودنی به این نتیجه رسید که هرگونه تاخیر در تراکم کردن بعد از مخلوط کردن خاک با مواد افزودنی، مانع از رسیدن چگالی آن به مقدار حداکثر خود بعد از تراکم میشود. هاموند در مورد بهسازی و افزایش مقاومت خاکهای رسی تثبیت شده با آهک مطالعاتی را انجام داد و به این نتیجه رسید که مقاومت مخلوط خاک رس و آهک به حدی است که می توان از آن جهت تثبیت شیب جانی کانالها و همچنین جهت پیسازی در سازهایی که بار وارده از آنها به پی زیاد نمیشد استفاده کرد. اسینوبی مطالعاتی در مورد تاثیر نیروی تراکم و تاثیر خاکستر و آهک بر روی خصوصیات تراکم و مقاومت محوری خاک رس انجام داد و به این نتیجه رسید که بالاترین مقاومت محوری زمانی حاصل میشود که بلافاصله بعد از مخلوط شدن خاک رس با آهک عمل تراکم صورت پذیرد [۱] مکانیزم تثبیت خاک با سیمان شبیه مکانیزم تثبیت خاک با آهک است با این تفاوت که در تثبیت خاک با آهک بخشی از مواد پرزولانی برای فعل و انفعال شیمیایی خاک با آهک از طریق خاک تأمین می شود، در صورتی که مواد پرزولانی برای تثبیت خاک با سیمان به صورت بالقوه در سیمان موجود هستند و لزوماً نباید از طریق خاک تأمین گردد. مشخصات فنی خاک های تثبیت شده با سیمان بستگی به جنس خاک، مقدار سیمان وزن مخصوص خاک تثبیت و کوبیده شده، کیفیت اختلاط سیمان و خاک، شرایط عمل آوردن مخلوط و زمان دارد. مقاومت خاک های تثبیت شده با سیمان در اثر مرور زمان افزایش می یابد. این افزایش مقاومت در روزهای اول، به سرعت بیش تری

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

انجام می شود و سپس با گذشت زمان از سرعت ازدیاد مقاومت خاک تثبیت شده کاسته می شود. اضافه کردن مقدار سیمان بالاتر از ۲ درصد خواص خاک را تغییر می دهد. [۲]

### روش حل مسأله

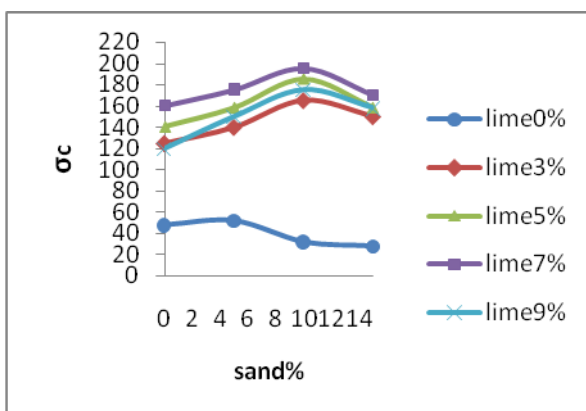
باتوجه به اینکه تاثیرافزایش هریک ازافزودنی ها به خاک رس درتعیین خصوصیات خاک متفاوت می باشد انتخاب گزینه برتر، یک نوع تصمیم گیری چندمعیاره می باشد. براساس مطالعات انجام شده توسط مهدی دریایی [۱] روی خاک بامشخصات زیر روندتغییرات وزن مخصوص حداکثر، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته به ترتیب دراشکال ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده است.

### مشخصات خاک مورد استفاده

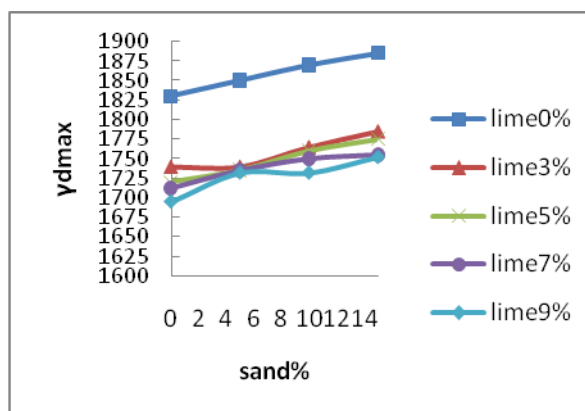
مشخصه	مقادیر	مشخصه	مقادیر
درصد رس	۲۳	رده بندی درسیستم متحد	CL
درصد لای	۷۱	نشانه گروه	۱۱
حد روانی	۳۲	رطوبت اپتیمم	۱۶٫۸
حد خمیری	۲۰٫۵	مقاومت فشاری محصور نشده	۴۸
شاخص خمیری	۱۱٫۵	وزن واحد خشک ماکزیمم	۱۸۲۸
درصد ماسه	۶		

تغییرات مقاومت فشاری خاک باافزودن سیمان به آن در شکل ۴ مشخص شده است. قابل ذکر است که درصد اختلاط هریک ازافزودنی ها نیز در روند تغییرات موثر بوده که در تحقیقی دیگر قابل بررسی می باشد.

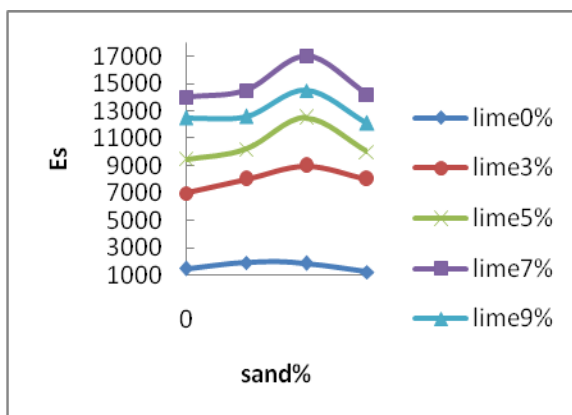
اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
 ۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲



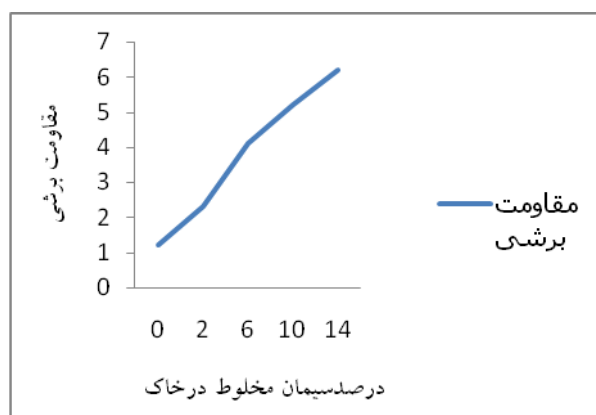
شکل ۲- تغییرات مقاومت فشاری در اثر اختلاط باماسه بادی و آهک



شکل ۱- تغییرات وزن مخصوص حداکثر در اثر اختلاط باماسه بادی و آهک



شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری خاک با افزودن سیمان به آن



شکل ۳- تغییرات مدول الاستیسیته در اثر اختلاط باماسه بادی و آهک

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که برای اولین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد یکی از جامعترین سیستم‌ها برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است که امکان بررسی سناریوهای مختلف را ممکن می‌سازد. زیرا این تکنیک امکان فرمول‌بندی مسأله را بصورت سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را دارد.

این فرایند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت می‌دهد. علاوه بر این روش بر مبنای مقایسات زوجی بنا نهاده شده است که قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌کند. همچنین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم‌رانشان می‌دهد که از مزایای این تکنیک در تصمیم‌گیری چندمعیاره است. [۳].

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

روال کار مدل AHP با مشخص کردن عناصر تصمیم گیری و ارزش گذاری برای آنها آغاز می شود. این عناصر شامل شیوه های مختلف انجام کار و اولویت دادن به معیارها یا ویژگی‌های می باشد. بطور کلی مراحل حل مسأله به روش AHP عبارت است از:

مرحله اول: ساختن درخت سلسله مراتبی

مرحله دوم: انجام مقایسات زوجی

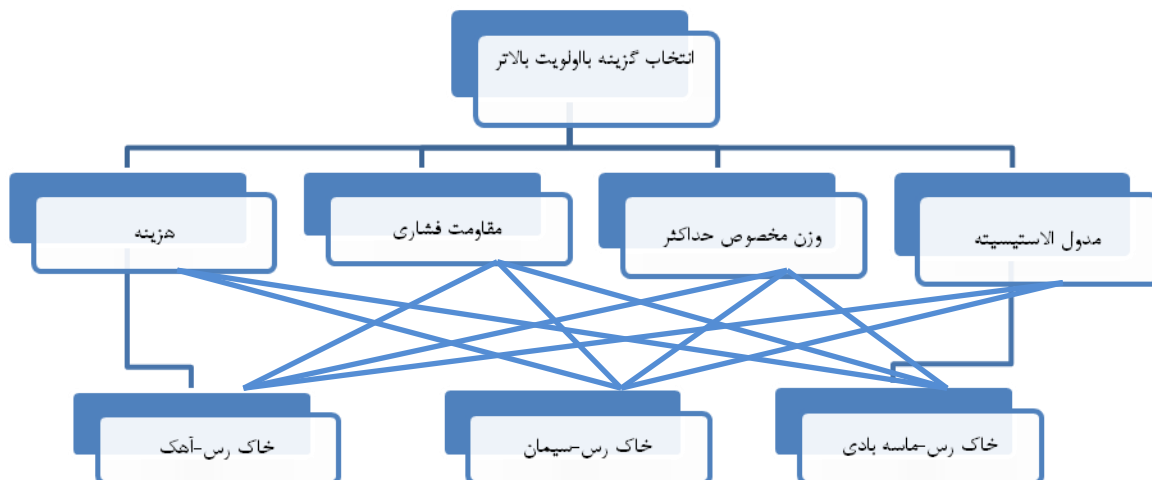
مرحله سوم: محاسبه وزنها

مرحله چهارم: سازگاری سیستم

### مرحله اول: ساختن درخت سلسله مراتبی

در مرحله اول فرایند AHP ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی از موضوع مورد بررسی می باشد که در آن اهداف، معیارها و گزینه ها و ارتباط آنها نشان داده می شود. مراحل بعدی حل مسأله بر مبنای خروجی این مرحله خواهند بود. لذا دقت در تهیه سلسله مراتب و درستی آن تاثیر مستقیم بر دقت و درستی نتایج دارد.

شکل ۵ سلسله مراتب مورد نظر برای اولویت بندی انتخاب بهترین گزینه جهت اختلاط با خاک رس رانشان می دهد. بدین ترتیب هدف یافتن اولویت می باشد. سطح بعدی عنوان معیارها بوده که شامل مقاومت فشاری، وزن مخصوص حداکثر، مدول الاستیسیته و هزینه می باشد. در سطح بعدی گزینه ها شامل خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک-ماسه بادی قرار دارد.



شکل-۵ سلسله مراتب مورد نظر برای اولویت بندی انتخاب بهترین گزینه

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی

۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

برای قضاوت در مورد معیارها و شناخت عوامل مهمتر و وزن دهی آنها می توان از تیم خبرگان استفاده کرد. و یا با استفاده از روش دلفی پرسشنامه تهیه نمود. وزن ها و اولویت هایی که از ماتریس مقایسات زوجی بدست می آید دقیقاً وابسته به قضاوت های زوجی تصمیم گیرنده است و با کمک آنها می توان ارزش هر گزینه را تعیین کرد و آنها را نسبت به هم رتبه بندی نمود بدین صورت گزینه ای که بیشترین وزن را دارد نسبت به سایر گزینه ها در رتبه بالاتری قرار می گیرد. در ماتریس دودویی شرط  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ,  $a_{ii} = 1$  باید برقرار باشد. در جدول (۱) ارزش معیارها نسبت به یکدیگر مشخص شده است.

جدول (۱) - تعیین ارزش معیارها نسبت به یکدیگر

ارزش عددی معادل ارزش نظری	ارزش نظری بر مبنای مقایسه بین دو معیار	
۱	Equal preference	دارای ارزش یکسان و برابر
۳	Weak preference	ارزش یکی نسبت به دیگری کمی بیشتر است
۵	Strong preference	ارزش یکی نسبت به دیگری بیشتر است
۷	Demonstrated preference	ارزش یک نسبت به دیگری مسلماً بیشتر است
۹	Absolute preference	ارزش یک نسبت به دیگری مطلقاً بیشتر است
۲ و ۴ و ۶ و ۸	Intermediate values	ارزشهای بینابینی

در جدول ۲ و ۳ و ۴ اهمیت نسبی هر یک از گزینه ها نسبت به معیارها نشان داده شده است. همچنین در جدول شماره ۶ اهمیت نسبی معیارها نسبت به هدف سنجیده شده است.

جدول شماره ۲ - اهمیت نسبی مدول الاستیسیته در گزینه ها

مدول الاستیسیته ES	خاک رس - سیمان	خاک رس - ماسه بادی	خاک رس - آهک
خاک رس - سیمان	۱	3	$\frac{1}{5}$
خاک رس - ماسه بادی	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{7}$
خاک رس - آهک	5	7	۱

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
 ۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

جدول ۳- اهمیت نسبی مقاومت فشاری در گزینه ها

مقاومت فشاری $\sigma_c$	خاک رس-سیمان	خاک رس-ماسه بادی	خاک رس-آهک
خاک رس-سیمان	۱	۳	$\frac{1}{4}$
خاک رس-ماسه بادی	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{5}$
خاک رس-آهک	4	5	۱

جدول ۴- اهمیت نسبی وزن مخصوص حداکثر در گزینه ها

وزن مخصوص حداکثر $\gamma_{max}$	خاک رس-سیمان	خاک رس-ماسه بادی	خاک رس-آهک
خاک رس-سیمان	۱	3	5
خاک رس-ماسه بادی	$\frac{1}{3}$	۱	۲
خاک رس-آهک	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	۱

جدول ۵- اهمیت نسبی هزینه در گزینه ها

هزینه COST	خاک رس-سیمان	خاک رس-ماسه بادی	خاک رس-آهک
خاک رس-سیمان	۱	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$
خاک رس-ماسه بادی	۸	۱	۳
خاک رس-آهک	۲	$\frac{1}{3}$	۱

جدول ۶- اهمیت نسبی معیارها نسبت به هدف

اولویت بالاتر	مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری	وزن مخصوص حداکثر	هزینه
مدول الاستیسیته	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
مقاومت فشاری	۳	۱	۳	۲
وزن مخصوص حداکثر	۴	$\frac{1}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$
هزینه	۲	$\frac{1}{2}$	۳	۱

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
 ۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

**استخراج وزنها**

به منظور تعیین ارزش نسبی مهارها از روش میانگین حسابی استفاده شده است و سپس با استفاده از وزن معیارها نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی محاسبه شده است. در این زمان چنانچه نرخ ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد بهتر است تصمیم گیرنده در قضاوتهای خود تجدید نظر کند.

$$WE=(0.19,0.08,0.72)$$

$$W\sigma=(0.23,0.10,0.67)$$

$$W\gamma=(0.65,0.23,0.12)$$

$$WC=(0.09,0.71,0.18)$$

$$WSCOPE=(0.1,0.42,0.19,0.27)$$

**محاسبه شاخص و نرخ ناسازگاری**

مقدار شاخص ناسازگاری از رابطه  $I.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$  و نرخ ناسازگاری از رابطه  $I.R. = \frac{I.I.}{I.I.R.}$  تعیین میشود که در آن:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I.I.R	0	0	0/58	0/9	1/12	1/24	1/32	1/41	1/45	1/45

هزینه	وزن مخصوص حداکثر	مقاومت فشاری	مدول الاستیسیته	محاسبه شاخص و نرخ ناسازگاری
$\lambda_{max}$	3/0037	3/0858	3/0649	
I.I	0	0/0429	0/032	
I.R	0	0/07	0/056	

**محاسبه وزن با اولویت نهایی هر گزینه**



اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران  
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی  
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

بعد از اینکه وزن گزینه ها نسبت به معیارها را بدست آوردیم وزن خود معیارها را نیز بطور مشابه نسبت به هدف محاسبه می کنیم سپس وزن نهایی هر گزینه

$$W_i = \sum W_{ij} * V_j$$

بصورت مقابل بدست می آید:

که در آن  $W_{ij}$  وزن گزینه ها نسبت به معیارها و  $V_j$  وزن معیار  $j$  می باشد.

$W_s-c=0.27$

$W_s-s=0.29$

$W_s-l=0.43$

که در آن  $W_s-c$  وزن گزینه ترکیب خاک-سیمان و  $W_s-s$  وزن گزینه ترکیب خاک-ماسه بادی و  $W_s-l$  وزن گزینه خاک-آهک می باشد.

### نتایج

باتوجه به اینکه عوامل متعددی در انتخاب بهترین گزینه جهت اختلاط باخاک جهت بهبود شرایط مقاومتی موثر می باشد و باتوجه به محدودیت های موجود در پروژهها به لحاظ اقتصادی ، موقعیت جغرافیایی، کاربری و... استفاده از رویکرد AHP روش مناسبی جهت حل مساله می باشد در تحقیق حاضر بامنظور نمودن معیارهای فرضی من جمله بیشترین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ، ماکزیمم وزن مخصوص و کمترین هزینه استفاده از مخلوط آهک-خاک رس بعنوان گزینه با اولویت بالاتر انتخاب شد. بدیهی است درصد اختلاط این گزینه و یا ترکیب دو گزینه با درصد های بهینه نیز از عمده ترین عوامل موثر خواهد بود که بسته به نوع خاک متغیر می باشد. و در تحقیقات آینده قابل بررسی می باشد.

### منابع:

- 1- مهدی دریایی بررسی افزایش ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاکهای رسی
- 2- بقولی زاده، ع، ۱۳۸۷، (خاکهای مشکل آفرین و روشهای بهسازی خاک)، پایان نامه کارشناسی ارشد
- 3- قدسی پور، س.ح، (۱۳۷۹)، "فرایند سلسله مراتبی (AHP)"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر