

## بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط مصالح در طرح اختلاط بتن

### با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری Lingo

محمد کاظم شربتدار<sup>۱</sup>، هادی شیرین سخنان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

۲- کارشناس ارشد عمران گرایش سازه دانشگاه سمنان

پست الکترونیکی نویسنده رابط (hadishirinsokhan@gmail.com)

#### چکیده

با توجه به نقش کلیدی بتن در پروژه‌های عمرانی، افزایش کیفیت آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد و یکی از عوامل بسیار موثر در کیفیت آن دانه‌بندی مصالح می‌باشد. در حال حاضر برای تعیین نسبت‌های اختلاط در طرح اختلاط بتن، دو منحنی دانه‌بندی (با دو ضریب فولر تامسون متفاوت) به عنوان حداقل و حداکثر (بتن با دانه‌بندی نرم‌تر و درشت‌تر) برای منحنی دانه‌بندی تعیین می‌شود و توسط شخص تهیه‌کننده طرح اختلاط سعی می‌شود نسبت‌های اختلاط مصالح طوری تعیین شود که منحنی دانه‌بندی بتن در بین آن دو منحنی قرار بگیرد. پر واضح است که در این حالت منحنی دانه‌بندی بتن نزدیک‌ترین منحنی به منحنی ایدئال با یک توان فولر تامسون مشخص نمی‌باشد. بنابراین بهینه‌سازی طرح اختلاط در این مقاله، به مفهوم رسیدن به بهترین نسبت‌های اختلاط مصالح مصرفی است، به طوری که منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بتن نزدیک‌ترین حالت به منحنی ایدئال تعیین شده در طرح اختلاط بتن (منحنی با یک توان فولر مشخص) باشد. بنابراین یک تابع که مقدار آن اختلاف بین منحنی دانه‌بندی طرح و منحنی دانه‌بندی ایدئال است، نوشته می‌شود و سپس نسبت‌های اختلاط هر کدام از مصالح طوری تعیین می‌شود که مقدار آن تابع مینیمم باشد. پر واضح است با مینیمم شدن این تابع بهترین و نزدیک‌ترین منحنی دانه‌بندی به حالت ایدئال آن حاصل می‌شود. به منظور آزمون و صحت سنجی روش بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله، یک نمونه طرح اختلاط بتن که قبلاً در یک کارخانه بتن مطابق با روش طرح ملی مخلوط بتن تهیه شده است، بهینه‌سازی می‌شود و با مقایسه منحنی دانه‌بندی آن مشاهده می‌شود که دانه‌بندی مصالح بتن نزدیک‌ترین منحنی را به دانه‌بندی ایدئال دارد.

کلمات کلیدی: تکنولوژی بتن، طرح اختلاط، نسبت‌های مصالح، بهینه‌سازی، نرم‌افزار لینگو

## ۱. مقدمه

در عصر حاضر با گسترش پروژه‌های عمرانی و انبوه‌سازی ساختمان‌ها، بتن به‌عنوان یک ماده مهم و استراتژیک در ساخت سازه‌ها شناخته می‌شود. با توجه به نقش سازه‌های بتن، کیفیت آن اعم از کارایی و مقاومت آن بر کسی پوشیده نیست. غالباً در این پروژه‌ها حجم بتن مصرفی قابل توجه می‌باشد لذا بهینه‌سازی در ساخت آن باعث بالا بردن کیفیت سازه و کاهش هزینه به مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌شود همچنین مطالعه ادبیات فنی این موضوع نشان می‌دهد که با وجود تحقیقات گسترده در زمینه تکنولوژی بتن، مطالعات محدودی در حوزه روش‌های طرح اختلاط بهینه وجود دارد [۱]. از این رو موضوع بهینه‌سازی در ساخت آن اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند و مورد استقبال مدیران پروژه و کارخانه‌های بتن قرار می‌گیرد.

در طرح اختلاط بتن ویژگی‌های بتن مانند مقاومت، دوام، کارایی، جداسدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی از اهمیت زیادی برخوردار است و الزام رسیدن به این ویژگی‌ها داشتن بهترین دانه‌بندی سنگدانه‌ها می‌باشد. به این منظور در متن اصلی روش ملی طرح مخلوط، با توجه به استفاده از رابطه اصلاح شده فولر- تامسون، منحنی‌هایی برای دانه‌بندی سنگدانه‌هایی با چند حداکثر اندازه مختلف ارائه شده است که در صورت نیاز میتوان با قرار دادن حداکثر اندازه سنگدانه، محدوده دانه‌بندی مطلوب را بدست آورد [۲]. در این روابط، تغییر توان  $n$  نیز به عنوان یک متغیر میتواند بافت دانه‌بندی را درشت یا ریز نماید. نباید انتظار داشت که منحنی‌های دانه‌بندی ارائه شده، حداقل فضای خالی را بوجود آورند. اما میتوان انتظار داشت با این دانه‌بندی‌ها در مجموع به بتن مطلوبی دست یافت. تغییر توان  $n$  و یا تغییر درشتی و ریزی بافت دانه‌بندی به نوع بتن مطلوب و نوع پروژه و قطعه و هم چنین نوع وسیله حمل و ریختن بستگی دارد.

در این مقاله بهینه‌سازی در طرح اختلاط به مفهوم رسیدن به بهترین نسبت‌های اختلاط مصالح مصرفی است، به طوری که منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بتن نزدیک‌ترین حالت به منحنی ایدئال تعیین شده از رابطه فولر که توضیح داده شد، در طرح اختلاط بتن باشد. این در حالی است که در حال حاضر در کارخانه‌های بتن برای تهیه طرح اختلاط، دو منحنی دانه‌بندی به‌عنوان حداقل و حداکثر برای منحنی دانه‌بندی از رابطه فولر تامسون تعیین می‌شود و توسط شخص تهیه‌کننده طرح اختلاط سعی می‌شود نسبت‌های اختلاط طوری تعیین شود که منحنی دانه‌بندی بتن در بین آن دو منحنی قرار بگیرد. منظور از حداقل و حداکثر در دانه‌بندی، دو منحنی یکی با دانه‌بندی نرم‌تر و توان فولر کوچک‌تر و یک منحنی دیگر با دانه‌بندی درشت‌تر و ضریب فولر بزرگ‌تر می‌باشد. در ادامه این مقاله ابتدا به تشریح روش طرح اختلاط بتن و در ادامه به بهینه‌سازی آن مطابق تئوری ارائه‌شده در این مقاله، پرداخته می‌شود.

## ۲. طرح اختلاط بتن

طبق روش ملی طرح اختلاط بتن (نشریه ض-۴۷۹) برای ساخت بتن همگن ضروری است که سنگدانه‌های ریزودرشت به‌گونه‌ای با یکدیگر مخلوط شوند که ضمن ایجاد انسجام کافی بتن نیز دارای کارایی مناسب باشد. اهمیت دانه‌بندی را می‌توان به این صورت مطرح کرد که مقدار خمیر سیمان در بتن، تابع فضای خالی بین سنگدانه‌ها و کل مساحت سطح سنگدانه‌ها می‌باشد، زیرا منافذ بین سنگدانه‌ها توسط خمیر سیمان اشغال می‌شود و سطح سنگدانه‌ها باید با خمیر سیمان اندود شود. وقتی که اندازه سنگدانه یکنواخت باشد حجم منافذ بین سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد اما اگر از سنگدانه با اندازه‌های مختلف باشد، ذرات ریزتر بین ذرات درشت قرار می‌گیرند و به این ترتیب حجم منافذ کاهش می‌یابد. بنابراین باید منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در یک محدوده منحنی ایدئال قرار گیرد. روابط این منحنی در قسمت بعدی این مقاله تشریح می‌شود.

- تعیین نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط:

رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری این گونه است که افزایش این نسبت باعث افزایش منافذ مویینه در بتن می‌شود و با کاهش این منافذ به مقاومت فشاری افزوده می‌شود، بنابراین نسبت آب به سیمان، اثر قابل توجهی در مقاومت بتن

دارد. در طرح اختلاط این نسبت مطابق آیین‌نامه ملی بتن ایران و بر اساس مقاومت ملات استاندارد سیمان (رده مقاومتی سیمان که برای سیمان تیپ II پرتلند ۳۵۰ است) و مقاومت فشاری متوسط بتن، تعیین می‌گردد

• تعیین مقدار آب در طرح اختلاط:

میزان آب آزاد در مخلوط بتن نیز تابع عوامل متعددی مانند کارایی موردنظر، حداکثر اندازه سنگدانه، دانه‌بندی و نوع سنگدانه‌های مصرفی از نظر بافت و شکل است. مقدار آب مهم‌ترین عامل مؤثر در کارایی و روانی بتن است. به‌گونه‌ای که افزایش مقدار آب باعث افزایش سهولت پمپاژ و تراکم‌پذیری آن می‌شود. از طرفی هم افزایش آب باعث کاهش مقاومت و جداسازی ذرات و آب می‌گردد.

مقدار آب مخلوط باید در حدی باشد که جذب ذرات سنگدانه شود و سپس با ایجاد لایه‌ای از دوغاب سیمان، بر روی سنگدانه‌ها حالت روغن‌کاری را به وجود آورد. که به این منظور مطابق روابط موجود در آیین‌نامه ملی بتن ایران مقدار آب مورد نیاز در بتن بر اساس مدول نرمی برای انواع سنگدانه‌هایی که بسته به بافت و شکل آن‌ها تعیین می‌شود.

### ۳. بهینه‌سازی طرح اختلاط

در این قسمت به بهینه‌سازی نسبت اختلاط مصالح به‌عنوان نکته نوآورانه این مقاله پرداخته می‌شود. در حال حاضر در تهیه طرح اختلاط دو منحنی دانه‌بندی (با دو ضریب فولر متفاوت) به‌عنوان حداقل و حداکثر، برای منحنی دانه‌بندی تعیین می‌شود و توسط شخص تهیه‌کننده طرح اختلاط سعی می‌شود نسبت‌های اختلاط طوری تعیین شود که منحنی دانه‌بندی بتن در بین این دو قرار بگیرد [۳]. پرواضح است که منحنی دانه‌بندی تعیین‌شده به این روش برای بتن نمی‌تواند دقیقاً منطبق بر یک منحنی با یک ضریب فولر مشخص باشد زیرا ممکن است قسمتی از منحنی دانه‌بندی، به منحنی حد پایین (منحنی با ضریب فولر بزرگ‌تر) منطبق یا نزدیک باشد و قسمتی دیگر از آن به حد بالایی (منحنی با ضریب فولر کوچک‌تر) نزدیک‌تر باشد. بنابراین برای رسیدن به هدف این پژوهش، در این مقاله یک تابع که مقدار آن اختلاف بین منحنی دانه‌بندی طرح و منحنی دانه‌بندی ایدئال است، نوشته می‌شود و سپس نسبت‌های اختلاط هرکدام از مصالح طوری تعیین می‌شود که مقدار آن تابع مینیمم باشد. پر واضح است با مینیمم شدن این تابع بهترین و نزدیک‌ترین منحنی دانه‌بندی به حالت ایدئال آن حاصل می‌شود. این عملیات بهینه‌سازی و مینیمم کردن تابع به وسیله برنامه کامپیوتری لینگو انجام می‌شود. به این منظور برای وارد کردن اطلاعات خام به این نرم‌افزار اطلاعاتی مانند منحنی دانه‌بندی طرح، منحنی دانه‌بندی ایدئال و ... به ماتریس تبدیل می‌شود.

در ادامه به تشریح منحنی دانه‌بندی ایدئال، نرم‌افزار لینگو و روش بهینه‌سازی آن پرداخته می‌شود

• منحنی ایدئال سنگدانه‌ها:

دانه‌بندی مطلوب بتن در واقع بر اساس رابطه فولر- تامسون اصلاح‌شده به دست آمده است. در رابطه شماره ۱، فرمول فولر- تامسون مشاهده می‌شود [۲].

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n * 100\%$$

(۱)

در صورتی که مرز سنگدانه و مواد ریزدانه ۰,۰۷۵mm (زیرا ذرات ریزتر از ۰,۰۷۵mm ارزش سنگدانه‌ای ندارد و درصد آن ناچیز است) باشد، دانه‌بندی مطلوب بتن بر اساس رابطه فولر- تامسون اصلاح‌شده به دست می‌آید. در رابطه شماره ۲، فرمول اصلاح‌شده فولر- تامسون مشاهده می‌شود [۲].

$$P(D, d, n) = \frac{100\%}{1 - \left(\frac{0.075}{D}\right)^n} * \left[ \left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0.075}{D}\right)^n \right] \quad (2)$$

که در آن:

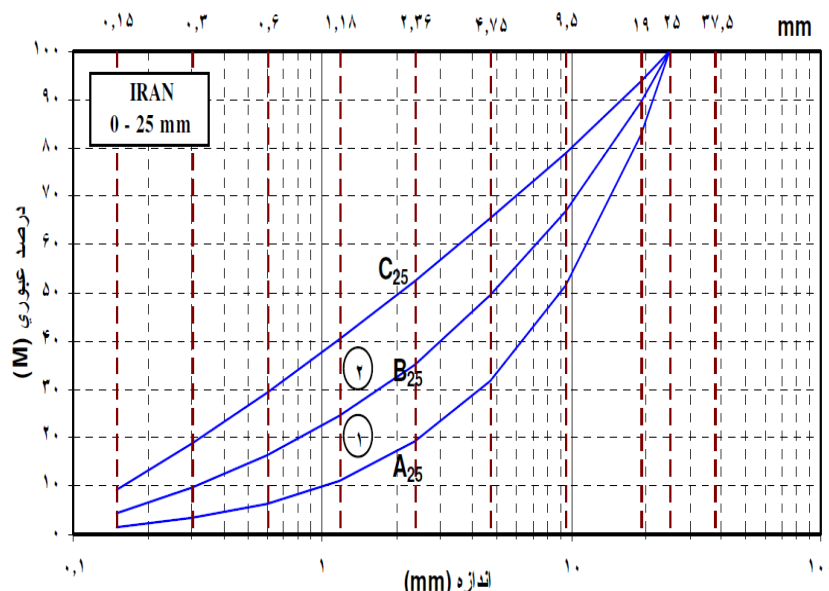
$P$  = درصد تجمعی عبوری از الک به قطر  $d$

$D$  = حداکثر اندازه سنگدانه

$n$  = درجه منحنی

همچنین منحنی رسم شده مطابق این فرمول در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. در این منحنی توان ضریب فولر برای منحنی درجه  $A$  برابر  $0.67$ ، برای منحنی  $B$  برابر  $0.35$  و برای منحنی  $C$  برابر  $0.1$  است. بنابراین منحنی  $A$  درشت‌ترین و منحنی  $C$  ریزترین دانه‌بندی را دارد.

مصرف عمده بتن در صنعت ساخت‌وساز امروزه بتن قابل پمپاژ است و طبق آیین‌نامه ملی بتن ایران بتن قابل پمپاژ باید در محدوده ۱ قرار گیرد یعنی درجه  $(n)$  از  $0.35$  تا  $0.55$  باشد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مخلوط ریزودرشت، با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر

#### • نرم‌افزار Lingo:

نرم‌افزار لینگو یکی از محصولات System Lindo می‌باشد که جز قوی‌ترین ابزار برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی به شمار می‌رود. به‌طور کلی اولین قدم در حل یک مسئله و بهینه‌سازی آن، مدل‌سازی آن با رعایت چهارچوب‌ها و محدودیت‌های خاص می‌باشد. طبیعتاً مدل‌سازی یک پدیده واقعی و شبیه‌سازی آن به‌صورت یک مسئله ریاضی، نیازمند در نظرگیری مفروضات و محدودیت‌هایی می‌باشد که آن را از دنیای واقعی دور می‌کند بنابراین هر چقدر بتوان مدل را به پدیده واقعی موجود نزدیک‌تر کرد جواب به دست آمده از حل آن واقعی‌تر بوده و با توجیه بیشتری می‌توان آن را در صنعت مورد استفاده قرار داد. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی یک مسئله مورد تجزیه و تحلیل وجود دارد. یکی از این ابزار کارا استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد. ارائه مفهوم این نوع مدل‌سازی همراه با ارائه روش‌های حل آن نیز بوده است. به‌عنوان ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به بیان ساده مدل برنامه‌ریزی، قابلیت ورود اطلاعات از نرم‌افزارهای بانک داده، قابلیت استخراج و ارسال نتایج، و قابلیت فراخوانی نرم‌افزار از داخل نرم‌افزار بانک اطلاعاتی یا ماکرو در اکسل اشاره نمود.

• منحنی دانه‌بندی ایدئال:

به‌منظور وارد کردن اطلاعات به برنامه کامپیوتری لینگو منحنی ایدئال دانه‌بندی به فرمت یک ماتریس نوشته می‌شود تا برای تعریف در برنامه‌های کامپیوتری آسان باشد [۴]. همچنین طبق استاندارد برای دانه‌بندی در بازه ۰/۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر (برای مصالح بتن) نیز، دانه‌بندی با ۹ عدد الک انجام می‌شود و درصدهای عبوری آن مطابق رابطه اصلاح‌شده فولر تامسون که در قسمت قبل مطرح شد محاسبه می‌گردد و به شکل ماتریس دانه‌بندی ایدئال ( $E$ ) تعریف می‌شود.

$$E = [e1, i] = [P(D, .15, n) \ P(D, .3, n) \ \dots \ P(D, 25, n)] \quad (3)$$

• منحنی دانه‌بندی حاصل از اختلاط سنگ‌دانه‌ها:

اکنون باید به دنبال فرمولی بود برای به دست آوردن نمودار دانه‌بندی حاصل از اختلاط  $N$  نوع سنگ‌دانه‌ها (معمولاً ماسه، نخودی و بادامی) که منحنی طبقه‌بندی هر کدام از سنگ‌دانه‌ها معلوم است. همچنین این فرمول فرمت ریاضی داشته باشد که تعریف آن برای برنامه‌های کامپیوتری (به‌منظور بهینه‌سازی) آسان باشد.

برای به دست آوردن این فرمول طبق مراحل زیر عمل می‌شود  
آزمایش دانه‌بندی را برای هر نوع از سنگ‌دانه‌ها (معمولاً ماسه، نخودی و بادامی) انجام می‌شود. طبق استاندارد برای دانه‌بندی در بازه ۰/۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر نیز با ۹ عدد الک انجام می‌شود و سپس نتایج آن را به شکل یک ماتریس  $9 \times 1$  با نام ماتریس  $A$ ، مطابق رابطه شماره ۴ تعریف می‌شود.

$$A = [a_{j,i}] \quad (4)$$

$A =$  ماتریس  $9 \times 1$  درصد عبوری در دانه‌بندی

$i =$  امین سنگ‌دانه در اختلاط بتن (ماسه یا نخودی یا بادامی)

$j =$  امین الک در دانه‌بندی سنگ‌دانه

در طرح اختلاط هر کدام از سنگ‌دانه‌ها با نسبت  $k$  درصد وجود دارد که آن را با عنوان ماتریس نسبت‌های اختلاط (ماتریس  $K$ ) به شکل یک ماتریس  $3 \times 1$  مطابق رابطه شماره ۵ تعریف می‌شود.

$$K = [k_{1,i}] \quad (5)$$

اکنون با ضرب دو ماتریس ( $A * K$ ) مطابق رابطه شماره ۶، یک ماتریس  $1 \times 3$  (در اینجا ماتریس  $9 \times 3$ ) به دست می‌آید که این ماتریس همان درصد عبوری یا منحنی دانه‌بندی حاصل از اختلاط سنگ‌دانه‌ها است و آن با ماتریس  $B$  نشان داده می‌شود

$$B = K * A \quad (6)$$

بنابراین با توجه به موارد بالا اگر برای ۳ نوع سنگ‌دانه ماسه نخودی و بادامی فرمول دانه‌بندی تشکیل شود، مطابق رابطه شماره ۷ می‌باشد.

$$[k1 \ k2 \ k3] * \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & \dots & A19 \\ A21 & A22 & A23 & \dots & A29 \\ A31 & A32 & A33 & \dots & A39 \end{bmatrix} = [b11 \ b12 \ b13 \ \dots \ b19] \quad (7)$$

• تعیین نسبت‌های اختلاط سنگ‌دانه‌ها منطبق بر منحنی فولر با درجه موردنظر:

باید مجموع مربعات اختلاف جزئی بین منحنی ایدئال (ماتریس E) و منحنی واقعی (ماتریس B) را مینیمم کرد. بنابراین مجموع مربعات اختلاف بین منحنی ایدئال و منحنی دانه‌بندی واقعی، به شکل یک ماتریس  $1 \times 9$  با نام C تعریف می‌شود که برای این کار نیاز به آزمون خطای بالایی می‌باشد و در این مقاله برای انجام آن از برنامه‌های کامپیوتری Lingo استفاده می‌شود. به عبارت دیگر برای تکمیل مدل‌سازی ریاضی برای نرم‌افزار و رسیدن به بهینه‌ترین حالت باید مقدار تابع رابطه شماره ۸ مینیمم باشد.

$$C = [c_{ij}] = B - E \quad (8)$$

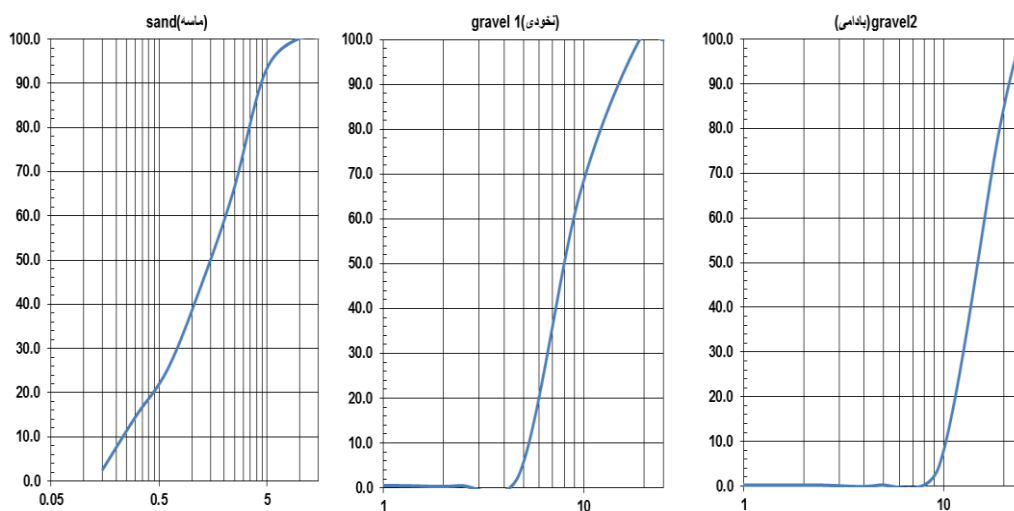
$$\sum_{j=1}^9 (C1j)^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

در حقیقت با توجه به اینکه ماتریس E مشخص می‌باشد با حل مسئله بالا توسط نرم‌افزار (مینیمم کردن رابطه ۹) نیز، ماتریس B به دست می‌آید و با توجه به رابطه شماره ۷ و معلوم بودن ماتریس A نیز، ماتریس K که همان مقادیر نسبت‌های اختلاط هرکدام از مصالح است به دست می‌آید. لازم به توضیح است چون محاسبات این ضرایب (درایه‌های ماتریس K) به وسیله کامپیوتر انجام می‌شود ممکن است که نتایج از نظر فیزیکی توجیه نداشته باشد مثلاً ضریب k منفی باشد و یا بزرگ‌تر از ۱ باشد که برای جلوگیری از این اتفاق باید در کامپیوتر برای k محدودیتی در نظر گرفته شود.

$$0 < k < 1$$

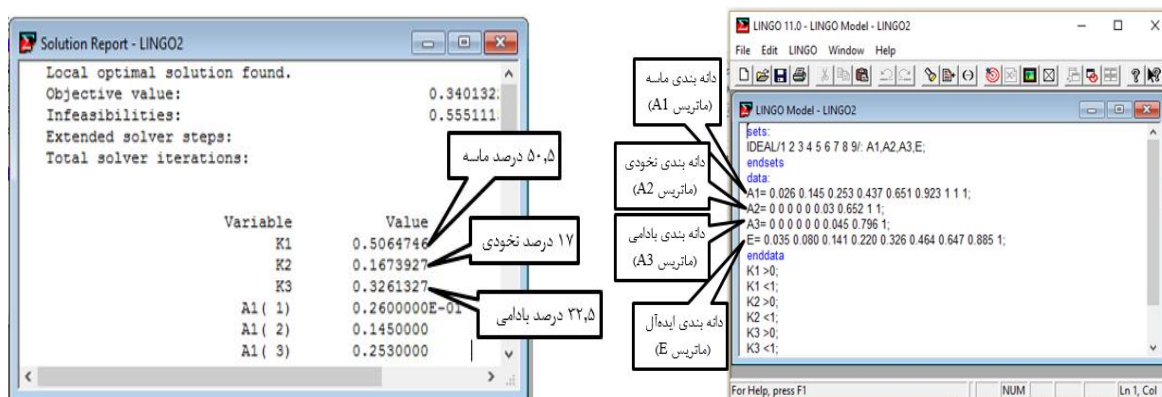
• بهینه‌سازی یک نمونه طرح اختلاط:

در این قسمت به بهینه‌سازی یک نمونه طرح اختلاط مطابق روش ارائه شده در این مقاله پرداخته می‌شود این طرح اختلاط قبلاً در یک کارخانه بتن مطابق با روش طرح ملی مخلوط بتن تهیه شده است و در این مقاله صرفاً به بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط مصالح آن برای رسیدن به نزدیک‌ترین منحنی دانه‌بندی ممکن به منحنی ایدئال پرداخته می‌شود. طرح اختلاط بتن مذکور، برای بتن با مقاومت  $250 \text{ kg/cm}^2$  (رده C25) و با عیار  $350 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. مصالح آن شامل ماسه، نخودی و بادامی می‌باشد و منحنی دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌گردد.

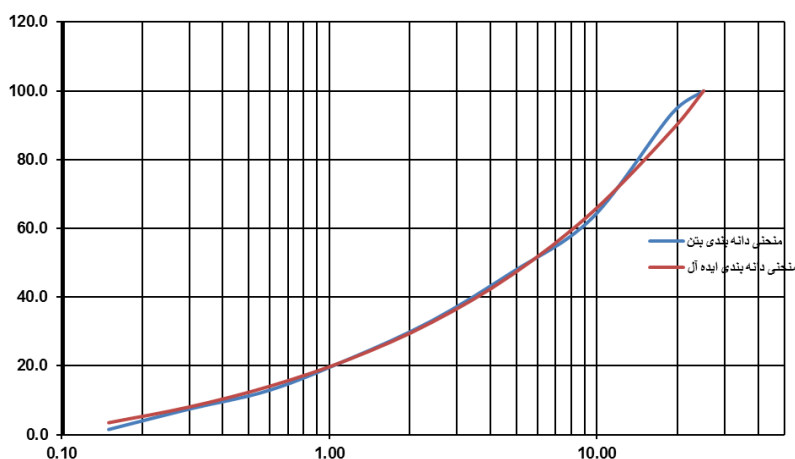


شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح موجود

همان طوری که گفته شد در حال حاضر نسبت اختلاط مصالح با آزمون خطا طوری تعیین می شود که فقط در یک محدوده از منحنی ایدئال قرار گیرد به عنوان مثال در طرح اختلاط مذکور ضریب فولر ایدئال برای کارایی مورد انتظار از این بتن، ۰,۴ می باشد و نسبت های اختلاط این گونه بوده است که منحنی دانه بندی آن بین دو منحنی با ضریب فولر ۰,۳۵ (به عنوان حد بالایی منحنی)، و ضریب فولر ۰,۴۵ (به عنوان حد پایینی منحنی) قرار گیرد در حالی که پرواضح است از این روش بهینه ترین و بهترین نسبت ها به دست نمی آید به عبارت دیگر نزدیک ترین منحنی به منحنی دانه بندی ایدئال حاصل نمی شود لذا در این مقاله با استفاده از نرم افزار لینگو نسبت هایی انتخاب می شود که نزدیک ترین منحنی ممکن به منحنی ایدئال (یعنی منحنی با ضریب فولر ۰,۴) باشد. به این منظور در این مقاله از نسخه شماره ۱۱ نرم افزار لینگو استفاده می شود. همچنین لازم به ذکر است که کد نوشته شده برای این طرح اختلاط، که در شکل ۳ دیده می شود برای هر طرح اختلاطی و در هر کارخانه بتن دیگری هم قابل استفاده می باشد، به طوری که باید درصد های عبوری از الک های استاندارد را برای ماسه، نخودی، بادامی و دانه بندی ایدئال یعنی به ترتیب ماتریس های  $A_1, A_2, A_3$  و  $E$  مطابق با مصالح مورد نظر تغییر یابد و سپس با ران مجدد نرم افزار، مشابه همین مثال بهترین درصد های اختلاط به دست می آید



شکل ۳- الف) کد نوشته شده برای نرم افزار لینگو (ب) نتیجه و خروجی نرم افزار بعد از بهینه سازی



شکل ۴- مقایسه منحنی دانه بندی ایدئال با منحنی دانه بندی واقعی پس از اختلاط

همان طوری که در شکل ۳ دیده می شود پس از بهینه سازی توسط نرم افزار، نسبت های اختلاط (ماتریس K) ماسه، نخودی و بادامی به ترتیب مقادیر ۵۰,۵ درصد، ۱۷ درصد و ۳۲,۵ درصد حاصل شده است که منحنی دانه بندی این بتن بر اساس این نسبت ها در شکل ۴ دیده می شود و مشاهده می گردد که به منحنی ایدئال بسیار نزدیک می باشد

#### ۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بتن یکی از مهم‌ترین عوامل در کیفیت بتن می‌باشد به همین علت در طرح اختلاط باید نسبت‌های اختلاط طوری تعیین شود که دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بعد از اختلاط مصالح (معمولاً ماسه، نخودی و بادامی) نزدیک به منحنی ایدئال باشد. در منحنی دانه‌بندی ایدئال مطابق رابطه فولر تامسون، سنگ‌دانه‌های ریزتر فضای خالی بین درشت‌ترها را پر می‌کند و تخلخل مابین آن‌ها را به حداقل می‌رساند و این باعث قفل‌وبست شدن بین سنگ‌دانه‌ها و ارتقای کیفیت بتن می‌شود این در حالی است که اکنون در تعیین نسبت‌های اختلاط مصالح در طرح اختلاط با آزمون خطا طوری تعیین می‌شود که فقط در یک محدوده از منحنی ایدئال قرار گیرد و یعنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نزدیک‌ترین منحنی به دانه‌بندی ایدئال نیست بلکه صرفاً منحنی آن بین دو منحنی با ضریب فولر کوچک‌تر از ضریب فولر ایدئال (به‌عنوان حد بالایی منحنی)، و منحنی دیگر با ضریب فولر بزرگ‌تر از مقدار ایدئال (به‌عنوان حد پایینی منحنی) قرار گیرد بنابراین در این روش بهینه‌ترین و بهترین نسبت‌ها به حاصل نمی‌شود. در این مقاله برای رفع این مشکل، به بهینه‌سازی این نسبت‌ها پرداخته شده است که به موارد زیر به عنوان دستاوردهای اصلی این مقاله اشاره می‌شود:

- ۱) مطابق روش بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله، یک تابع که مقدار آن اختلاف بین منحنی دانه‌بندی طرح و منحنی دانه‌بندی ایدئال است، نوشته می‌شود و سپس نسبت‌های اختلاط هرکدام از مصالح با استفاده از نرم‌افزار لینگو طوری تعیین می‌شود که مقدار آن تابع مینیمم باشد. بنابراین با مینیمم شدن این تابع بهترین و نزدیک‌ترین منحنی دانه‌بندی به حالت ایدئال آن حاصل می‌شود در این روش برای وارد کردن اطلاعات خام به این نرم‌افزار نیز، اطلاعاتی مانند منحنی دانه‌بندی طرح، منحنی دانه‌بندی ایدئال و ... به ماتریس تبدیل می‌شود.
- ۲) در ادامه این مقاله به منظور آزمون و صحت‌سنجی این روش بهینه‌سازی، یک نمونه طرح اختلاط که قبلاً در یک کارخانه بتن مطابق با روش طرح ملی مخلوط بتن تهیه شده بود، بهینه‌سازی شده است و با مقایسه منحنی دانه‌بندی آن مشاهده می‌شود که دانه‌بندی مصالح بتن بعد از بهینه‌سازی، نزدیک‌ترین منحنی را به دانه‌بندی ایدئال دارد.
- ۳) برنامه نوشته‌شده برای نرم‌افزار لینگو در این مقاله می‌تواند به عنوان یک نرم‌افزار مستقل و عمومی برای تهیه طرح اختلاط در هر کارخانه تولید بتن استفاده شود و فقط کافی است آزمایش دانه‌بندی روی مصالح (بادامی، نخودی و ماسه) آن کارخانه انجام شود و نتیجه آن به شکل ماتریس در قسمت ماتریس دانه‌بندی مصالح وارد نرم‌افزار شود و سپس با راه‌اندازی نرم‌افزار (حل مسئله)، بهترین نسبت‌های اختلاط مصالح از خروجی نرم‌افزار حاصل می‌شود.

#### ۵. مراجع

- [۱] حبیبی، ع.، صفاری، ه. (۱۳۹۰). "طرح اختلاط بتن با استفاده از اصول بهینه‌سازی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی". مجله تحقیقات بتن، سال ۴، شماره ۲.
- [۲] کمیته تخصصی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. (۱۳۹۴). "روش ملی طرح مخلوط بتن". ویرایش سوم، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [3] Marcia, J Simon. Eric. S Lagergren. Kenneth, A Snyder. (1997). "Concrete Mixture Optimization using statistical mixture design methods". International Symposium on High Performance Concrete.
- [4] Shakhmenko, G., Birsh, J. (1998). "Concrete Mix Design And Optimization". 2nd Int PHD Symposium in Civil Engineering.