ucivil.ir
پرتال جامع مهندسی عمران

پرتال جامع مهندسی عمران به پشتوانه تیمی مجرب از دانشجویان تحصیلات تکمیلی مهندسی عمران دانشگاه شیراز جهت ارائه خدمات به دانشجویان و مهندسین محترم عمران با ایده هایی نو و رویکردی متفاوت راه اندازی شده است.

جهت ورود به بخش های مختلف وب سایت بر روی عنوان مورد نظر خود کلیک نمایید

دانلود نرم افزار، آیین نامه و مقاله

آموزش نرم افزارهای تخصصی

منابع و فایل های آزمون های زبان

منابع و فایل های مقطع کارشناسی

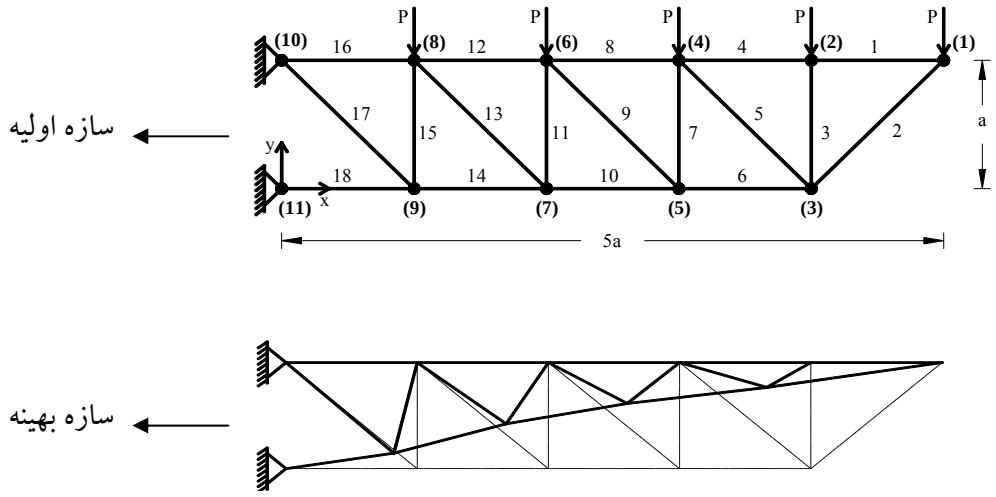
منابع و فایل های مقطع کارشناسی ارشد

منابع و فایل های مقطع دکتری

دانشکده فنی مهندسی عمران

مهندسی سیستم‌ها

در مهندسی عمران و محیط‌زیست



مدرس: دکتر مهدی ضرغامی

نیمسال اول ۹۲-۹۱

بسمه تعالی

مهندسی سیستم‌ها

دانشکده مهندسی عمران، نیمسال اول ۹۲-۹۱

مدرس: دکتر مهدی ضرغامی

نحوه تماس برای تعیین وقت ملاقات و رفع اشکال:

تلفن ۳۳۹۲۵٤۹- ساختمان ۹، طبقه بالای آز هیدرولیک zarghaami@gmail.com

---

محتوی درس

هدف این درس آشنایی دانشجو با دیدگاه مهندسی سیستم برای بهینه سازی و شبیه سازی سیستمهای مهندسی عمران می باشد. در واقع تلاش بر این است که چگونه می توان از منابع محدود برای بیشینه سازی منفعت اقتصادی و رفاه اجتماعی برای همه در عین رعایت ظرفیت زیست محیط بهره برد. در غیر این صورت توسعه عمرانی پایدار نبوده و تبعات ناگواری خواهد داشت. تاکید عمده در حل مثالهای عددی روی مسایل مربوط به مهندسی عمران و محیط زیست خواهد بود.

نحوه ارزیابی: توجه شود که دریافت نمره تنها از فعالیت های زیر می باشد. به هر گونه مراجعه در آخر ترم برای درخواست نمره (مشروطی، معدل بالاتر، اخراج و...) ترتیب اثر داده نشده و حتی باعث کسر نمره خواهد شد.

۱. میان‌ترم- ۷ نمره
۲. پایان‌ترم- ۸ نمره
۳. تمرین- ۲ نمره (توجه: تمرینهایی که کپی باشند هم برای نویسنده تمرین و هم افراد خاطی صفر منظور خواهند شد. در صورت تکرار، به کل نمره تمرین علیرغم ارایه چند تمرین درست امتیازی داده نخواهد شد. نکته مهم دیگر اینکه بعد از حل تمرین در کلاس توسط مدرس، ارایه حل آن تمرین توسط دانشجو دیگر نمره ای ندارد.)
٤. مشارکت در کلاس-۱ نمره، شامل شرکت در کلاس، سوال و جواب، ارایه مطلب در کلاس، توجه نمایید که غیبت بیش از سه جلسه (به هر دلیل) باعث حذف درس خواهد شد.

۵. تحقیق و موردپژوهی- ۲ نمره، این تحقیق در گروههای ۲ نفری انجام شده و موضوع آن در کلاس درس توضیح داده خواهد شد. در صورت کیفیت بهتر تا ۱ نمره تشویقی.

منابع درسی:

الف- منبع مورد استفاده مستمر: جزوه کلاس که از انتشارات ساختمان ۷ قابل تهیه است.

ب- منابع کمکی

1. Loucks, D. P. and E. van Beek. Water Resources Systems Planning and Management - an introduction to methods, models and applications, 2005, UNESCO/ Delft Hydraulics,.
2. Ossenbruggen, P.J. (1984). Systems Analysis for Civil Engineers, John Wiley & Sons, New York.
3. Zarghami M., Szidarovszky F., (2011). Multicriteria Analysis: Applications to Water and Environment Management, Springer, Berlin.

۱. آذر، عادل، تحقیق در عملیات، موسسه نشر علوم نوین، ۱۳۸۳.

۲. اردکانیان، رضا و مهدی ضرغامی، مدیریت طرحهای توسعه منابع آب، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۹، تهران.

۳. اصغرپور، محمد جواد، تصمیم گیری و تحقیق عملیات در مدیریت، دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.

٤. برادلی، استیفن و همکاران، برنامه ریزی ریاضی کاربردی، ترجمه دکتر هدایت ذکایی آشتیانی، حسین تقی زاده کاخکی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.

۵. حمدی طه، آشنایی با تحقیق عملیات، ترجمه بازرگان، محمد باقر، نشر دانشگاهی، ۱۳۸٤.

٦. زهرایی بنفشه و سید موسی حسینی، الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی مهندسی، انتشارات گوتنبرگ، ۱۳۸۸.

۷. کارآموز، محمد؛ آزاده احمدی و مهدیس فلاحی، مهندسی سیستم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵. تلفن مرکز پخش ۰۲۱٦٦٤۹۸۸٦۸

۸. منابع بسیار متعدد دیگر در اینترنت و کتابخانه دانشگاه به خصوص سایتهای زیر:

www.sciencedirect.com
www.springerlink.com
www.civilica.com

موفق باشید

نسخه ۱۳۹۱.

هر نوع استفاده از محتوای این نوشتار لطفا با ارایه مرجع و نیز اطلاع تهیه‌کننده صورت بگیرد. از دانشجویان محترم دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز که در تهیه این جزوه همکاری نموده‌اند تقدیر بعمل می‌آید.

فهرست

فصل	عنوان	صفحه
۱	مقدمه و تعاریف	۵
۲	مدلسازی سیستم‌ها در مهندسی عمران	۹
۳	مدلهای بهینه‌سازی خطی	۱۸
٤	مدلهای بهینه‌سازی غیرخطی	۳٤
۵	برنامه‌ریزی پویا	٤۱
٦	تصمیم‌گیری چند معیاره	٤۳
۷	تصمیم‌گیری گروهی به روش انتخاب اجتماعی	٦۵
۸	بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت	٦۹
۹	شبیه سازی	۷۲
۱۰	معرفی چند نرم افزار برای مهندسی سیستم‌ها	۷۹
	مراجع	۸۲

فصل ۱- مقدمه و تعاریف

اعضای مستقل از هم که برای رسیدن به هدفی در کنار هم قرار گرفته‌اند سیستم نامیده می‌شود و منظور از مهندسی یک سیستم استفاده از ابزارهای تصمیم‌گیری برای بهبود عملکرد آن است. در واقع سوال اساسی در این نوشتار آن است که چگونه از منابع موجود به نحو احسن استفاده نماییم. برای مهندسی سیستم یکی از کارهای مهم ساخت مدل مسئله مورد بررسی است. به عبارت دیگر تعریف تابع هدف و محدودیتها از مهمترین وظایف ما بوده که یک دید سیستمی برای شناخت مساله می دهد. تهیه یک مدل ریاضی به صورت کلی ٤ مرحله دارد:

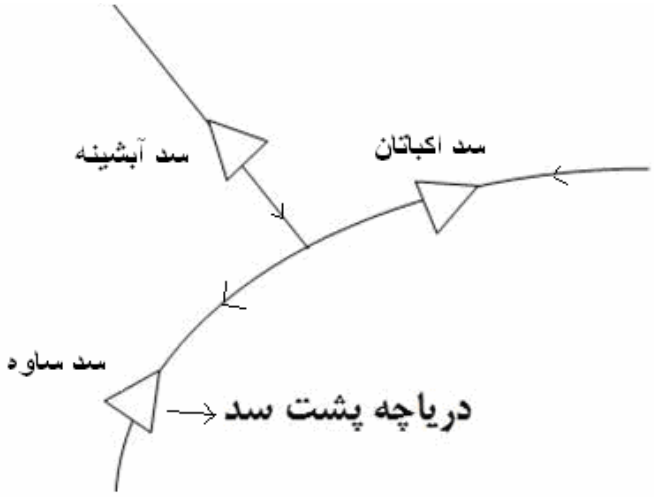
۱- تعریف تصمیم گیر[1]

۲- اهداف تصمیم گیری[2]

۳- متغیرهای تصمیم[3]

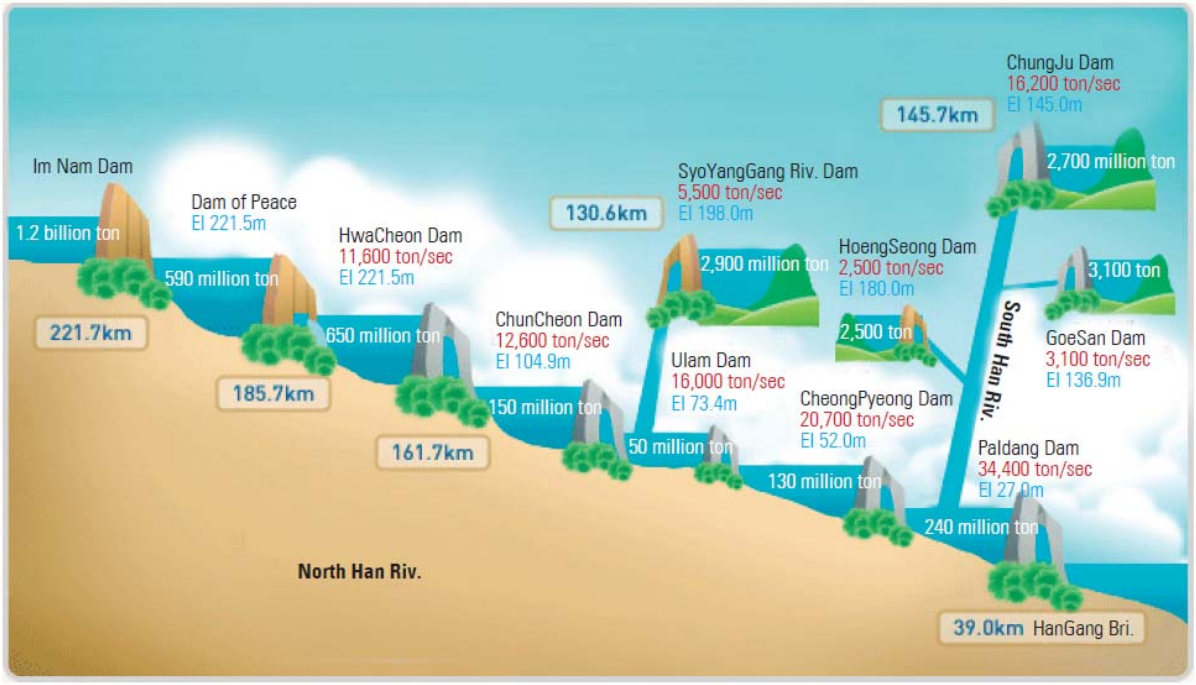
٤- محدودیتها[4]

مثال ۱-۱: اگر از سدهای نمایش داده شده در شکلهای ۱-۱ و ۱-۲ به صورت جدا از هم بهره‌برداری نماییم نتیجه و عملکرد ضعیف‌تری خواهیم داشت تا اینکه به طور همزمان عملکرد آنها را بهینه کنیم. این مساله ریاضی یکی از سوالات جالب در مهندسی سیستم‌ها می‌باشد.



شکل ۱-۱ بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی

[1] Decision Maker
[2] Objectives
[3] Decision Variables
[4] Constraints



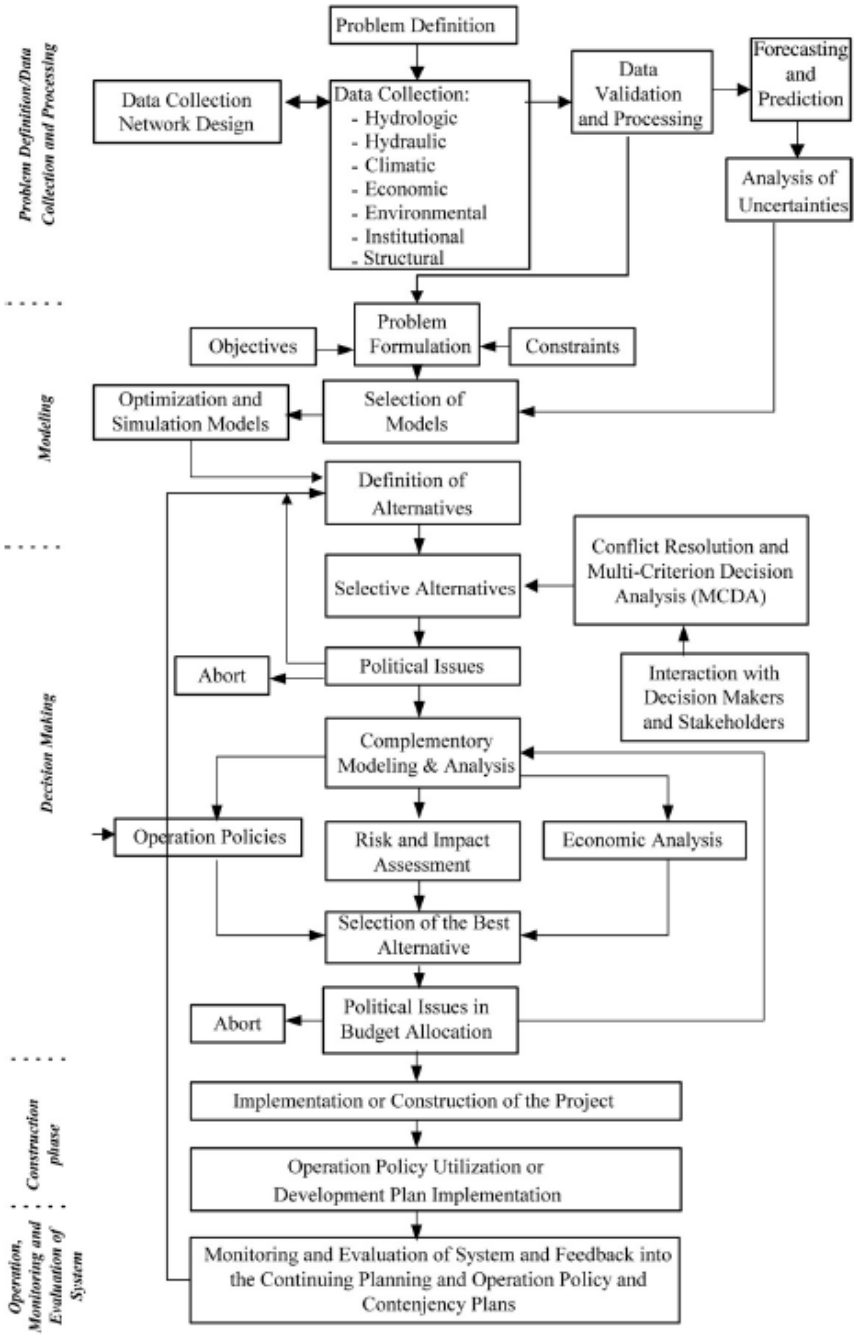
شکل ۱-۲ سیستم چند مخزنی و چند هدفه رودخانه هان کره جنوبی (Korea Institute of Construction Technology, 2009)

مراحل ساخت و مهندسی یک طرح عمرانی بایستی با توجه به همه عوامل سیستم باشد زیرا توجه خاص تنها به یک مولفه باعث خرابی کل سیستم می‌شود. به عنوان مثال در طراحی، اجرا و بهره برداری از سدهای بزرگ عوامل مثبت و منفی متعددی وجود دارد که بایستی در یک طراحی صحیح به همه آنها توجه کرد. در شکل ۱-۳ برخی از این عوامل ذکر شده است.

شکل ۱-۳ نتایج مثبت و منفی ساخت یک سد بزرگ (Loucks and van Beek, 2005)

اهمیت بحث مهندسی سیستم

یک مساله مهم در کشور ما وجود منابع سرشار از یک طرف و عدم مدیریت صحیح این منابع از طرف دیگر است. بطور مثال مصرف انرژی سرانه هر ایرانی چند برابر متوسط جهانی است به این ترتیب هزینه بیشتری برای حمل ونقل و سایر فعالیتها صرف می‌شود که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. با کمک علم مهندسی سیستم می‌توان این نوع مسایل پیچیده را حل کرد. در شکل ۱-٤ فرآیند کلی مدیریت و برنامه‌ریزی طرحهای عمرانی ارایه شده که در بخش‌های مهمی از آن ابزارهای مطرح مهندسی سیستمها برای حل مسایل به کار گرفته می‌شود.



شکل ۱-٤ فرآیند مدیریت اجرای طرحهای عمرانی مبتنی بر مهندسی سیستمها (Karamouz et al. 2003)

فصل ۲- مدلسازی سیستم‌ها در مهندسی عمران

برای حل و بررسی مدلهای ریاضی دو نوع رویکرد متفاوت وجود دارد. رویکرد شبیه‌سازی و رویکرد بهینه‌سازی. در این فصل و دو فصل بعدی رویکرد بهینه‌سازی را تشریح می‌نماییم. رویکرد شبیه‌سازی موضوع فصل ۹ می‌باشد.

یکی از ابزارهای مهندسی سیستم برنامه‌ریزی ریاضی یا تحقیق در عملیات[1] می‌باشد. علت نامگذاری این مبحث به عنوان تحقیق در عملیات استفاده مکرر از این علم در طول جنگ جهانی دوم است. به عنوان مثال مکانهای استقرار پدافند هوایی برای دفاع از شهر لندن در مقابل عملیات حملات هوایی آلمان به صورت یک مساله بهینه‌سازی تعریف شد. مثال دیگر در زمینه اقتصاد کشاورزی افزایش درآمد حاصل از کشاورزی با لحاظ محدودیتهای آب، خاک، کود و نیروی انسانی می‌باشد. در بعضی موارد هدف کمینه کردن است مانند کاهش ترافیک در یک شهر. مثال روزمره دیگر دانشجویی است که می‌خواهد بیشترین معدل را کسب کند (تابع هدف) ولی در یادگیری و زمان درس خواندن و... محدودیت هایی دارد. بنابراین شکل کلی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی در حالت بهینه‌سازی به صورت زیر است:

Maximize $f(x)$

Subject to (S.t) – (مقید به)

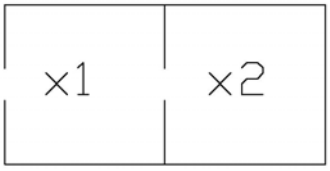
$g_i(x) \le b_i$

$x \ge 0$

برای حل مسائل بهینه‌سازی دو دیدگاه مهم باید در نظر گرفته شود. اگر هدف کسب سود بیشتر باشد باید تابع هدف $f(x)$ بیشینه شود و یا چنانچه سیستم هزینه‌بر باشد باید این تابع کمینه گردد. در مسائل مقدماتی مهندسی سیستم برای بهینه کردن تابع $f(x)$ از آن مشتق گرفته و با مساوی صفر قرار دادن تابع مشتق و استخراج مقداری برای x و قرار دادن آن در رابطه اصلی مقدار بهینه را می‌یافتیم. در مسائل واقعی تعداد توابع هدف بیش از یک مورد بوده و محدودیت ها نیز زیاد است، لذا بایستی از روشهای دیگری استفاده کرد.

مثال ۲-۱: فضای اداری (شکل ۲-۱) توسط یک دیوار حایل به دوقسمت تقسیم می‌شود به گونه‌ای که درآمد حاصل از فروش آنها بیشینه شود. ارزش هر واحد مربع در اتاق اول ۵۰ واحد و در اتاق دوم ٦۰ واحد پولی است. حداکثر مساحت مجاز برای اتاق اولی ۵۰ متر مربع و برای دومی ۳۰ متر مربع است و کل مساحت مجاز هم ٦۰ متر مربع است.

[1] Operation Research, OR



شکل ۲-۱ طراحی بهینه فضای اداری با دو اتاق

حل- ابتدا تابع هدف را می‌نویسیم:

Maximize $R = 50x_1+60x_2$

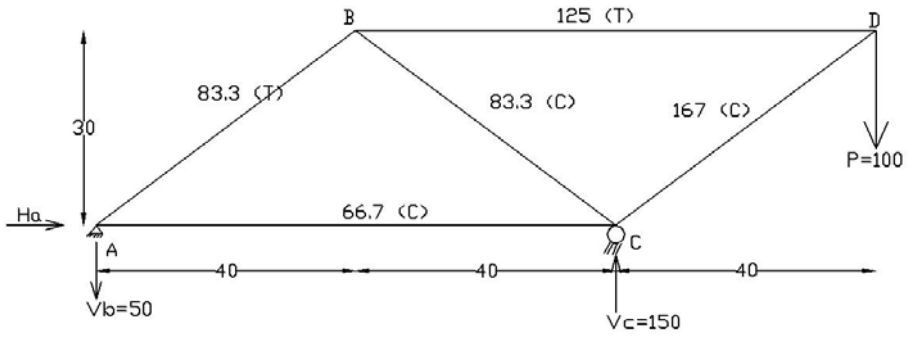
حال باید محدودیت‌ها را بنویسیم.

$$S.t.$$
$$x_1 + x_2 \le 60$$
$$x_1 \le 50$$
$$x_2 \le 30$$
$$x_1 \ge 0 \quad x_2 \ge 0$$

دو محدودیت آخر چون از جنس مساحت است، و برای مساحت هم عدد منفی معنایی نخواهد داشت بنابراین باید مقادیر متغیرهای تصمیم بزرگتر از صفر باشند.

توجه: در مسائلی نظیر سیستم‌های حمل و نقل یا منابع آب ممکن است تا ۱ میلیون متغیر تصمیم داشته باشیم و در این صورت معادلات بایستی به صورت اندیس دار نوشته شود.

مثال۲-۲: برای خرپای شکل ۲-۲ هدف کمینه کردن وزن آن است. اگر چگالی قطعات آهنی ثابت (۳/٤ واحد) فرض و مقدار مجاز تنش فشاری ۱۰ واحد و برای تنش کششی ۲۰ واحد باشد مدل بهینه‌سازی را بنویسید (Ossenbruggen, 1984).



شکل ۲-۲ بهینه‌سازی خرپای ۵ عضوی

حل- ابتدا دو متغیر تصمیم A_1 و A_2 را به ترتیب برای میزان مساحت اعضای کششی و فشاری تعریف می‌نماییم. علت اینکار هم آنست که یک تنش مجاز کششی و یک تنش مجاز فشاری برای اعضای خرپا داریم. توجه شود که نیر.های خرپا تعیین شده و مقادیر آنها به صورت فشاری یا کششی روی اعضاء نشان داده شده است. حال چون رفتار در کشش و فشار یکسان نیست بایستی آنرا در ساختن تابع هدف اعمال نمائیم:

$$Min \quad W = 3.4[V_{AB} + V_{AC} + V_{BC} + V_{BD} + V_{CD}]$$
$$= 3.4[50A_2 + 80A_1 + 50A_1 + 80A_2 + 50A_1]$$
$$= 612A_1 + 442A_2$$

V_{AB} : حجم آهن مقطع AB

A_1 : مقطع کنترلی برای فشار

A_2: مقطع کنترلی برای کشش

اکنون شروع به تعریف محدودیت‌ها برای اعضا می‌کنیم:

s.t.

$$AB \quad \rightarrow \frac{83.3}{A_2} \le 20$$

$$AC \quad \rightarrow \frac{66.7}{A_1} \le 10$$

$$BC \quad \rightarrow \frac{83.3}{A_1} \le 10$$

$$BD \quad \rightarrow \frac{125}{A_2} \le 20$$

$$CD \quad \rightarrow \frac{167}{A_1} \le 10$$

مثال ۲-۳: برای آبرسانی به شهری ۹۰۰ متر لوله لازم است. دو کارخانه لوله‌هایی با مشخصات جدول ۲-۱ تولید می‌کنند. مدل ریاضی نحوه خرید از هر کارخانه تا اینکه هزینه کمتری برای شرکت داشته باشد را بنویسید.

جدول ۲-۱ خصوصیات تولیدات یک کارخانه لوله سازی

نوع لوله	هزینه هر واحد طول (ده هزار ریال)	میزان عرضه
۱	۱۰۰	۱۰۰ متر
۲	۱۲۵	غیر محدود

حل- متغیرهای کنترلی x_1 و x_2 هستند، که میزان خرید از هر نوع لوله را نشان می‌دهند. مدل ریاضی عبارت خواهد بود از:

$$Min.C = 100x_1 + 125x_2$$
$$s.t.$$
$$x_1 + x_2 \geq 900$$
$$x_1 \leq 100$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

مثال ۲-٤: یک شهر نیازمند ٤ میلیون متر مکعب آب در روز است؛ که می‌توان آن را از یک سازمان آب (۱۰۰۰ ریال برای هر متر مکعب) یا از یک رودخانه (۵۰۰ ریال برای هر واحد) تامین نمود. سازمان آب امکان ارائه ۱۰ میلیون متر مکعب و رودخانه امکان تامین تنها ۲ میلیون متر مکعب در روز را دارد. حد مجاز BOD آب تامین شده بایستی کمتر از ۱۰۰ میلی گرم در لیتر باشد. توجه نمائید که آلودگی آب تهیه شده از سازمان ۵۰ میلی گرم در لیتر و آلودگی آب رودخانه ۲۰۰ میلی گرم در لیتر است. حال برای کاهش هزینه تامین آب مدل بهینه‌سازی را تعریف نمایید.

حل:

$$Min.C = 1000x_1 + 500x_2$$

$$s.t.$$
$$x_1 \leq 10$$
$$x_1 + x_2 \geq 4$$
$$x_2 \leq 2$$
$$\frac{50x_1 + 200x_2}{x_1 + x_2} \leq 100 \rightarrow -50x_1 + 100x_2 \leq 0$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

مثال ۲-۵: تیر گیردار A با اتصال صلب به ستون B مطابق شکل۲-۳ برای تحمل بار معینی بایستی به نحوی طراحی شود که هزینه ساخت آن کمینه باشد. متغیرهای تصمیم عبارتند از اندازه‌های x_1, x_2, x_3 , x_4 البته این طراحی بایستی محدودیت های زیر را رعایت کند تا طراحی قابل قبول باشد: کنترل تنشهای برشی و خمشی، کنترل لاغری و جابجایی حداکثر در انتهای تیر. در مثال عددی تعریف شده توسط (Ragsdell & Phillips. 1976) مدل بهینه‌سازی به صورت زیر است:

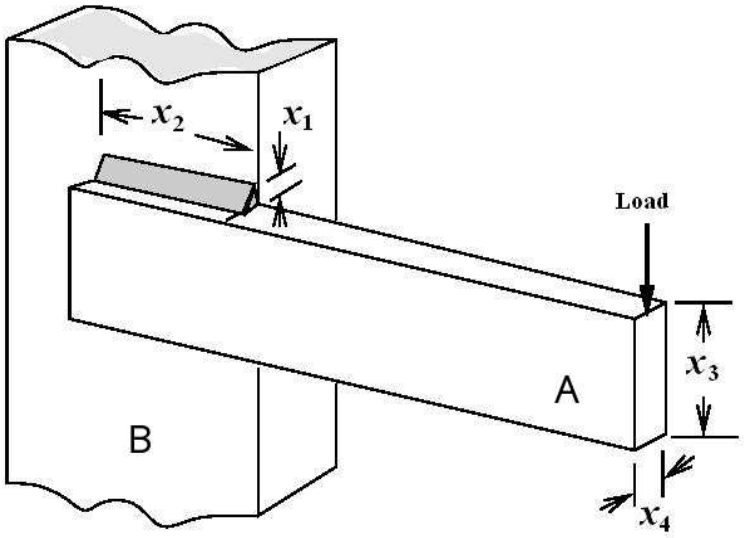
Minimize: $f(\vec{x}) = 1.10471{x_1}^2 x_2 + 0.04811 x_3 x_4 (14.0 + x_2)$
subject to:

$$g_1(\vec{x}) = \tau(\vec{x}) - 13,600 \leq 0$$
$$g_2(\vec{x}) = \sigma(\vec{x}) - 30,000 \leq 0$$
$$g_3(\vec{x}) = x_1 - x_4 \leq 0$$
$$g_4(\vec{x}) = 0.10471({x_1}^2) + 0.04811 x_3 x_4 (14 + x_2) - 5.0 \leq 0$$
$$g_5(\vec{x}) = 0.125 - x_1 \leq 0$$
$$g_6(\vec{x}) = \delta(\vec{x}) - 0.25 \leq 0$$
$$g_7(\vec{x}) = 6,000 - Pc(\vec{x}) \leq 0$$

with:

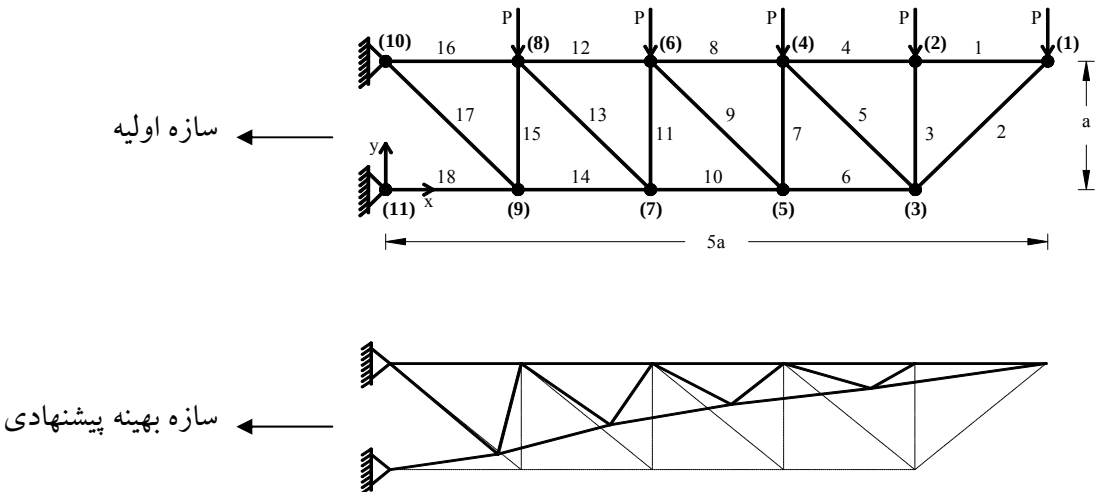
$$\tau(\vec{x}) = \sqrt{(\tau')^2 + (2\tau'\tau'')\frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2}$$
$$\tau' = \frac{6,000}{\sqrt{2} x_1 x_2}$$
$$\tau'' = \frac{MR}{J}$$
$$M = 6,000\left(14 + \frac{x_2}{2}\right)$$
$$R = \sqrt{\frac{{x_2}^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2}$$
$$J = 2\left\{x_1 x_2 \sqrt{2}\left[\frac{{x_2}^2}{12} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2\right]\right\}$$
$$\sigma(\vec{x}) = \frac{504,000}{x_4 {x_3}^2}$$
$$\delta(\vec{x}) = \frac{65,856,000}{(30 \times 10^6) x_4 {x_3}^3}$$
$$Pc(\vec{x}) = \frac{4.013(30 \times 10^6)\sqrt{\frac{{x_3}^2 {x_4}^6}{36}}}{196}\left(1 - \frac{x_3\sqrt{\frac{30 \times 10^6}{4(12 \times 10^6)}}}{28}\right)$$

with $0.1 \leq x_1, x_4 \leq 2.0$, and $0.1 \leq x_2, x_3 \leq 10.0$.
Best solution: $x^* = (0.205730, 3.470489, 9.036624, 0.205729)$ where $f(x^*) = 1.724852$.



شکل ۲-۳- طراحی تیر طره به صورت بهینه

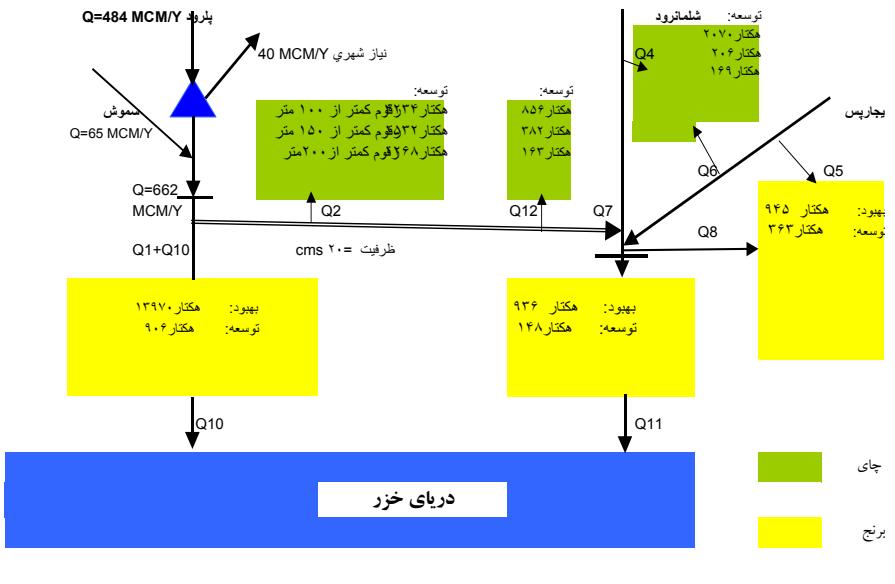
مثال ۲-٦ : در شکل ۲-٤ طراحی اولیه یک خرپا و نیز شکل بهینه سازی شده آن برای تحمل بار طراحی شده نمایش داده شده است. شکل بیانگر کاهش وزن و نیز حجم مورد اشغال توسط خرپاست.



شکل۲-٤- بهینه‌سازی حجم و وزن یک خرپا

مطالعه موردی۲-۱: برنامه‌ریزی حوضه آبریز پلرود، گیلان

پلرود، نام رودخانه‌ای در مجاورت شهرستانهای لنگرود و املش می‌باشد. با توجه به نیاز روزافزون به چـای و برنج، علیرغم استعداد منطقه، کمبود شدید آب در تیرماه از کمیت و کیفیت محصول مـی‌کاهـد. در شـکل شماتیک۲-۵ مساله بهینه‌سازی به صورت زیر معرفی می‌شود (Zarghami, 2006).



شکل۲-۵- بهینه‌سازی سطح مزارع چای و برنج در منطقه پلرود

اهداف مهم مدیریتی در این طرح عبارتند از

الف – **افزایش سود**: سود کل منطقه، از جمع منافع خالص بدست خواهد آمد:

$$\text{Max. } R = \sum_{i=1}^{m=4} \sum_{j=1}^{n=6} A_{ij} \left[B_i - C_i \right] \qquad (۱)$$

A_{ij} سطح زمین مورد کشت از نوع i و در منطقه j و i شاخص مربوط به نوع محصول و j شاخص مربوط به منطقه و C_i هزینه آماده سازی یک هکتار زمین از نوع i در منطقه j. در جدول ۱ این هزینه‌ها منعکس شده است.

Bi سود ناشی از هر هکتار زمین از نوع i و در منطقه j این سود ناشی از دو عامل قیمت واحد محصول و میزان محصول در هر هکتار است. این میزان محصول بسته به میزان تامین آب برای هر هکتار است. با تامین آب کافی برای هر هکتار، در فصل رشد محصول، به خصوص شالی، سود حاصله از آن هکتار بیشتر خواهد شد.

در محاسبات شبیه‌سازی با فرض کمبودهای معین، حداکثر زمین قابل کشت مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در برنامه‌ریزی با مدل بهینه‌سازی، میزان قطعی کمبود و نیز سطح کشت مطلوب به صورت متغیرهای تصمیم جستجو می‌شود. بنابراین متغیرهای تصمیم مدل X_{ij} و A_{ij} می‌باشد.

ب – معیار افزایش سطح زیر کشت: در مناطق شمالی ایران با توجه به مشکل بیکاری و حفظ درآمد حداقل برای همه کشاورزان لازم می‌نماید که با افزایش سطح زیر کشت و تحمل سود کمتر، از تنش‌های اجتماعی بکاهیم. لذا داریم

$$\text{Max. } A = 1.08(A_{11} + A_{15} + A_{16} + A_{21} + A_{25} + A_{26}) + (A_{32} + A_{33} + A_{34} + A_{42} + A_{43} + A_{44}) \qquad (۲)$$

ج – افزایش اطمینان: براساس دو معیار R و A برنامه بهینه، دستور کشت معینی را ارائه خواهد داد. ولی عدم تامین آب تضمین شده بعد از کشت و آماده سازی زمین، در فصل رشد (تیر ماه) ضرر فراوانی ایجاد می‌کند. لذا بعنوان یک متغیر تصمیم دیگر، سطح اطمینان را تعیین نکرده به عهده مدل قرار می‌دهیم. در این مطالعه درصدی از میانگین بده رودها در آمار ۳۵ ساله، بعنوان عامل اطمینان در نظر گرفته شده است. بعنوان مثال آب موجود در تیر ماه بعد از احداث سد، ۵۷/۷ میلیون متر مکعب در محل بند انحرافی پلرود می‌باشد. برای کاهش خطر اگر درصدی از میانگین بهره را به عنوان آب مطمئن در نظر بگیریم ریسک کمتر خواهد شد و داریم :

$$\text{Min. } Risk \qquad (۳)$$

محدودیت های مطرح در این مطالعه به صورت زیر هستند:

– برای آب برداشتی در محل بند انحرافی پلرود داریم:

$$Q_1 + Q_2 + Q_7 + Q_{10} + Q_{12} \le 57.7 * Risk \qquad (٤)$$

– در محل بند انحرافی شلمانرود:

$$Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 - Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{11} \le (6.4 + 3.7) * Risk \qquad (۵)$$

– در طول رود شلمانرود:

$$Q_4 + Q_3 \le 6.4 * Risk \qquad (٦)$$

– در طول رود بیجارپس:

$$Q_6 + Q_7 \le 3.7 * Risk \qquad (٧)$$

–یکی از مهمترین قیود رابطه میزان سطح کشت و میزان آب دهی به هر هکتار با میزان کل آب دهی به آن منطقه است (معادلات تخصیص). بعنوان نمونه داریم:

$$Q_1 = A_{11}X_{11} + A_{21}X_{21} \qquad (٨)$$

البته چون X برحسب متر مکعب در هر هکتار بوده و A نیز برحسب هکتار است، لذا برای اینکه Q برحسب میلیون متر مکعب باشد، عدد حاصل بر میلیون تقسیم میشود.

– برای زمینی که تحت کشت می‌رود، حداقل آب باید تامین شود. لذا، برای متغیرهای تصمیم X_{ij} یک حداقلی قایل شده‌ایم. حد بالایی نیز برای میزان آب کافی برای هر هکتار است:

$$X_{\min,i} \le X_{ij} \le X_{\max,i} \qquad (٩)$$

– حفظ حداقل مساحت کشت سنتی شالی و محدودیت توسعه اراضی در یک منطقه در قیود زیر اعمال شده است:

$$A_{\min,ij} \le A_{ij} \le A_{\max,ij} \qquad (١٠)$$

د– حداقل‌های زیست محیطی لازم می‌دارد که میزان آب عبوری در تیر ماه در محل دهانه پلرود و شلمانرود به دریای خزر از ٤/٦ میلیون مترمکعب کمتر نباشد:

$$Q_{10} \ge 4.6 \qquad (١١)$$

$$Q_{11} \ge 4.6 \qquad (١٢)$$

– برای مقادیر A ، R و $Risk$ یک حدود حداقل و حداکثر، بایستی برقرار شد.

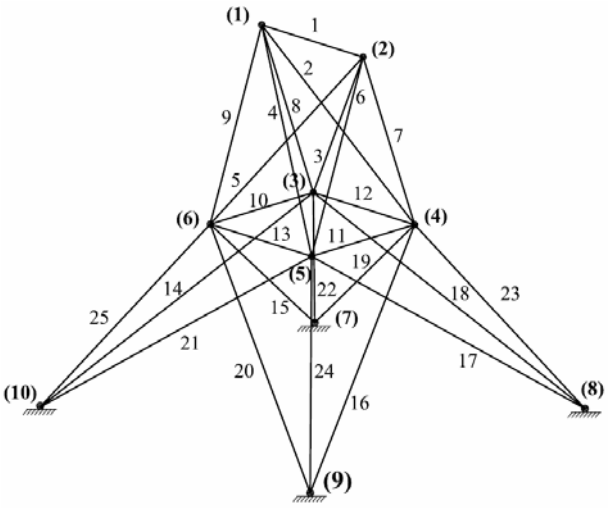
– آب برداشتی از کانال از ظرفیت کانال تجاوز نکند. کل حجم قابل انتقال در تیر ماه ٥٣/٦ میلیون متر مکعب است:

$$Q_2 + Q_7 + Q_{12} \le 53.6 \qquad (١٣)$$

تمرین۲–۱: بهینه‌سازی اعضای یک خرپای ۲۵ عضوی به شکل ۲–٦ به کمک روشهای مختلف بهینه‌سازی (عادی و تکاملی) توسط افراد مختلف حل شده و بررسی گردیده است. با بررسی در سایتهای زیر گزارشی از مدل و نتایج حل آن را ارایه نمایید.

www.sciencedirect.com

www.civilica.com



شکل ۲-٦ خرپای ۲۵ عضوی

تمـرین ۲-۲: شـرکت هـوایی یونیورسـال تاسـیس یـک شـرکت حمـل و نقـل تجـاری بـا هواپیماهـای کوچـک را در دسـت بررسـی دارد. بـا سـرمایه ی موجـود ٤ میلیـون دلار بـرای خریـد هواپیماهـای دوموتوره ی بـاربری، ایـن شـرکت سـه نـوع هواپیمـا را بـرای خریـد در نظـر گرفتـه اسـت. هواپیماهـای نـوع A قیمتـی برابـر ۸۰۰۰۰ دلار دارد و مـی توانـد ۱۰ تـن بـار را بـا سـرعت متوسـط ۳۵۰ گـره حمـل کند. اما هواپیماهای نوع B مـی توانـد ۲۰ تـن بـار را بـا سـرعت متوسـط ۳۰۰ گـره حمـل کنـد و قیمـت آن ۱۳۰۰۰۰ دلار اسـت. هواپیمـای نـوع سـوم، نـوع دیگـری از هواپیمـای نـوع B بـا جـا بـرای کمـک خلبـان اسـت کـه سـرعت آن ۳۰۰ گـره و ظرفیـت آن ۱۸ تـن و قیمـت آن ۱۵۰۰۰۰ دلار اسـت. هواپیمای نوع A یک خلبان می خواهد و اگـر در سـه نوبـت بـه کـار گرفتـه شـود بـه طـور متوسـط مـی توانـد ۱۸ سـاعت در روز پـرواز کنـد. هواپیمـای B هـم کـارکرد مـشابهی دارد. هواپیماهـای B وC بـه دو خدمه ی پرواز احتیـاج دارد و هواپیمـای نـوع C بـه دلیـل داشـتن وسـایل پیـشرفته تـر بـارگیری مـی تواند به طور متوسـط ۲۱ سـاعت در روز در سـه نوبـت پـرواز کنـد. بخـش عملیـات پـرواز ایـن شـرکت برآورد کرده است که هم اکنون در هر روز برای ۱۵۰ نوبت پرواز برای یک خلبان خواهد داشت.

قیـد تاسیـسات نگهـداری، امکـان خریـد بـیش از ۳۰ هواپیمـا را نمـی دهـد. سـود هواپیماهـای A و B وC به ترتیـب ۱ و ۸ و ۱۲۰ دلار بـرای هـر تـن- مایـل مـی باشـد. روزانـه بـاری معـادل ۳۵۰۰۰۰۰ تـن- مایل باید حمل شود اما بارهایی را کـه توسـط هواپیماهـای شـرکت تحویـل نـشود مـی تـوان بـه شـرکت دیگـری بـا سـود ۰/۲ دلار بـرای هـر تـن- مایـل محـول کـرد. اگـر شـرکت بخواهـد سـود روزانـه‌اش را بیـشینه کنـد، چـه ترکیبـی از انـواع هواپیماهـا را بایـد خریـداری کنـد؟ (هـر گـره معـادل یـک مایـل در ساعت است) (برادلی و همکاران، ۱۹۷۷).

فصل ۳- بهینه‌سازی خطی

اگر تابع هدف و قیود یک مساله برنامه‌ریزی ریاضی تنها دارای توابع خطی باشند مدل بهینه‌سازی خطی[1] محسوب می‌شود. فرم استاندارد این مدلها عبارتند از:

$$\begin{aligned} &\text{Max } C'X \\ &AX=B \\ &X\geq 0 \end{aligned}$$

$$C=\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ : \\ : \\ c_n \end{bmatrix}_{n\times 1} \qquad X=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ : \\ : \\ x_n \end{bmatrix}_{n\times 1} \qquad A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & .. & .. & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & .. & .. & a_{2n} \\ : & : & & & : \\ : & : & & & : \\ a_{m1} & a_{m2} & .. & .. & a_{mn} \end{bmatrix}_{m\times n}, \quad B=\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ : \\ : \\ b_n \end{bmatrix}_{n\times 1}$$

برای آنکه بتوانیم ماتریس C' را در ماتریس X ضرب نمائیم آنرا ترانهاده می‌کنیم:

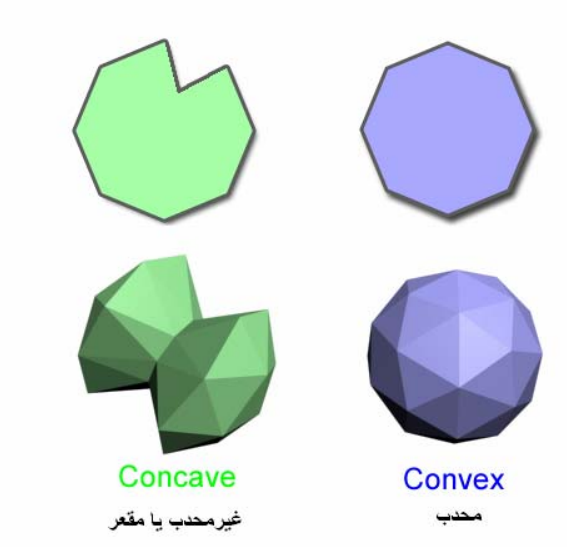
$$C'X=\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & .. & .. & c_n \end{bmatrix}X$$

$$=c_1x_1+c_2x_2+\ldots+c_nx_n$$

$$A\cdot X=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & .. & .. & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & .. & .. & a_{2n} \\ : & : & & & : \\ : & : & & & : \\ a_{m1} & a_{m2} & .. & .. & a_{mn} \end{bmatrix}_{m\times n}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ : \\ : \\ x_n \end{bmatrix}_{n\times 1}=\begin{bmatrix} a_{11}x_1+a_{22}x_2+\ldots+a_{1m}x_n \\ a_{21}x_1+a_{22}x_2+\ldots+a_{2m}x_n \\ : \\ : \\ a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\ldots+a_{mn}x_n \end{bmatrix}_{m\times 1}=\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ : \\ : \\ b_m \end{bmatrix}$$

از جمله خصوصیات مدل برنامه‌ریزی خطی آن است که فضای امکان پذیر محدب[2] می‌شود. فضای امکانپذیر محدب و غیر محدب در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.

[1] Linear Programming: LP
[2] Convex



شکل ۳-۱ فضای محدب و نامحدب (مقعر)

همچنین برای برنامه‌ریزی خطی ثابت شده که نقطه بهینه همواره در یکی از راس های فضای امکان پذیر خواهد بود.

انواع جوابها برای مساله بهینه‌سازی خطی:

۱- جواب یگانه

۲- بی‌نهایت جواب

۳- بدون جواب بهینه؛ این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که فضای امکان‌پذیر وجود نداشته باشد.

چنانچه فضای امکان‌پذیر محدب نباشد تعداد جوابها دو یا بیشتر خواهد بود که با معادلات خطی قابل حل نیست.

تمرین ۱: یک فضای غیرمحدب را رسم کرده و نشان دهید که با یک تابع هدف خطی می‌توان به دو یا چند جواب رسید.

شرایط بهینگی: برای تعریف شرایط بهینگی یک تقسیم بندی به صورت زیر داریم:

۱- مدلهای یکنوا[1]: تابعی که در آن با افزایش متغیر کنترلی، تابع هدف هم افزایش یابد.

۲- مدلهای غیر یکنوا[2]

مثال ۱: در تابع هدف z هرچه مقادیر x_i اضافه شود مقدار تابع هدف نیز اضافه می‌شود یا به عبارت دیگر

[1] Monotone
[2] non-Monotone

$$z = x_1 x_2$$
$$x_i \uparrow \Rightarrow z \uparrow$$

مدل غیر یکنوا : تابعی که در آن با افزایش متغیر کنترلی تابع هدف ممکن است کاهش یابد تابع غیر یکنوا می‌نامیم.

مثال ۳-۲: تابع هدف زیر یک مدل غیر یکنوا است، چون با کاهش میزان x_1 ممکن است z افزایش یابد:

$$z = (x_1 - 3)^2 + (x_2 - 4)^2$$

به عنوان مثال با جایگذاری نقاط زیر و نتیجه آن توجه نمائید:

$$\begin{cases} x_1 = 2 \\ x_2 = 4 \end{cases} \rightarrow z = 1$$

$$\begin{cases} x_1 = 1 \\ x_2 = 4 \end{cases} \rightarrow z = 4$$

در مدلهای یکنوا نقطه بهینه (یا نقاط بهینه) در مرزها قرار دارند. ولی در مدلهای غیر یکنوا، نقطه (نقاط) بهینه لزوما در مرزها قرار ندارند. البته مدلهای یکنوا خطی هستند به شرط آنکه اولا تابع هدف و محدودیت ها توابع جبری خطی باشند و ثانیا متغیر ها اعداد طبیعی مثبت باشند.

علاوه بر مدلهای بهینه‌سازی خطی، مدلهای دیگری همچون مدل با اعداد صحیح[1] و مدلهای غیرخطی وجود دارند که حل آنها مشکل‌تر است. بطور مثال می‌خواهیم تعداد بهینه نیروی کار را ارایه دهیم، باید بگوئیم چند نفر از فلان گروه لازم است و نمی‌توان تعداد افراد را اعشاری گفت. چنانچه معادلات زیاد باشند، حل این نوع مسائل سخت خواهد شد.

حل مسایل بهینه‌سازی خطی

برای حل مسایل بهینه‌سازی خطی در این نوشتار از دو روش ترسیمی و سیمپلکس بهره می‌بریم.

۳-۱ حل ترسیمی‌مساله بهینه‌سازی خطی

حل ترسیمی اغلب برای حالتی که دو متغیر و تنها یک هدف دایم ممکن است. برای این روش حل بایستی گامهای زیر را طی کنیم:

۱. رسم فضای امکانپذیر[2]: منظور فضایی است که همه محدودیت های مدل در آن ارضاء می‌شوند (فضایی که توسط محدودیتها ساخته می‌شود)

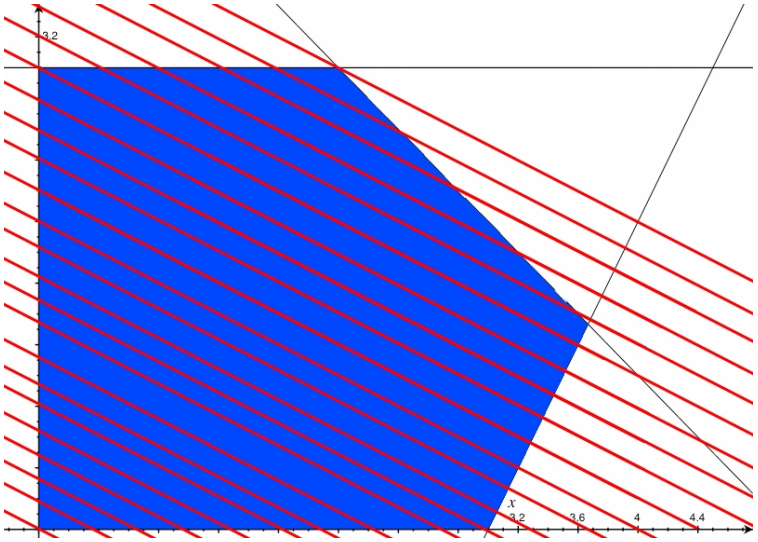
[1] Mixed Integer Programming
[2] Feasible space

۲. رسم خطی با شیب تابع هدف

۳. جابجا کردن خط نماینده تابع هدف با همان شیب در جهت بهینه

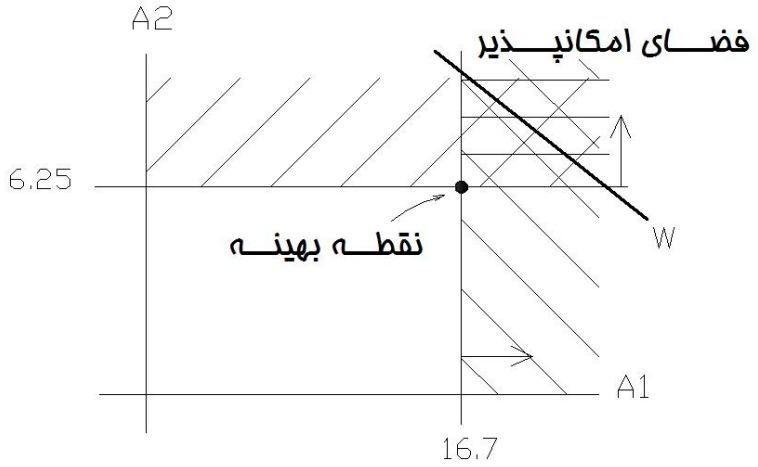
٤. معرفی نقطه یا نقاط بهینه[1] در صورت وجود.

این مراحل در شکل ۳-۲ به صورت کلی نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲ فضای امکانپذیر و خطوط موازی با تابع هدف برای تعیین راس بهینه

مثال ۳-۳: در مثال ۲-۲ (خرپا) مساله بهینه‌سازی خطی به صورت زیر حل می‌شود. ابتدا فضای امکان‌پذیر نظیر شکل ۳-۳ رسم می‌شود.



شکل ۳-۳ فضای امکان‌پذیر مثال خرپا

در هر نقطه از صفحه A_1OA_2 خط W مقداری را بدست می‌آورد: $W = 612A_1 + 442A_2$

[1] Optimal solution

با حرکت دادن این خط در فضای امکان پذیر و رسیدن تابع به نقطه گوشه نقطه بهینه بدست خواهد آمد. پس نقطه بهینه عبارت خواهد بود از:

$A_1 = 16.7$
$A_2 = 6.25$

اما برای آنکه سایز مناسب را خریداری نمائیم؛ با توجه با سایزهای موجود اعداد مشخص شده را خریداری خواهیم نمود:

17	16.5	16
7	6.5	6

مثال ۳-٤: جواب مساله بهینه‌سازی مثال ۲-۳ به صورت ترسیمی برابر است با:

$100x_1 + 125x_2 = 0$

$x_2 = -\frac{100}{125}x_1$ شیب تابع هدف

$\left.\begin{matrix} x_1 = 100 \\ x_2 = 800 \end{matrix}\right\} \rightarrow z = (100\times100) + (125\times800) = 110000.$

تمرین۳-۲: مساله بهینه‌سازی خطی مثال۲-٤ (تامین آب یک شهر) را به صورت ترسیمی‌حل نمایید.

۳-۲ حل به روش سیمپلکس[1]

یکی از روشهای اصلی برای حل مسائل LP روش سیمپلکس است. این روش مبتنی بر این اصل است که در یک مدل یکنوای خطی جوابهای بهینه در رئوس فضای امکان پذیر قرار می‌گیرند. در این روش جستجو از یکی از رئوس فضای امکان پذیر شروع شده و به ترتیب رئوس مختلف را بررسی می کند تا به راس بهینه برسد. در هندسه برنامه‌ریزی خطی می‌توان اثبات کرد که الگوریتم روش سیمپلکس قادر است از هر نقطه اولیه حرکت کرده و به نقطه بهینه برسد. ویژگیهای روش سیمپلکس عبارتند از

۱- هر مسئله خطی را حل می‌کند.
۲- محدودیت های زائد را تشخیص می‌دهد.
۳- نا محدود بودن تعداد جوابهای مسئله را تشخیص می‌دهد.
٤- تهی بودن مجموعه جواب را تشخیص می‌دهد.
۵- جواب اولیه خود را تولید می‌کند.

[1] Simplex

قبل از حل مدلهای خطی به روش سیمپلکس ابتدا بایستی آنرا به فرم استاندارد (متعارف) در بیاوریم. برای این منظور موارد زیر بایستی در فرم متعارف رعایت شود:

۱- تابع هدف بایستی به صورت بیشینه‌سازی باشد، و گرنه آنرا در (۱-) ضرب کرده، و مسئله را تبدیل به حالت بیشینه می‌کنیم.

مثال ۳-۵: در صورتی که تابع هدف به صورت زیر باشد:

$$\text{Min} \quad (x_1-2x_2)$$

معادل بیشینه سازی آن عبارت خواهد بود از:

$$\text{Max } (-x_1+2x_2)$$

۲- تابع هدف و محدودیت ها به فرم خطی باشند یعنی روابط غیر خطی آنها را در صورت وجود بایستی خطی سازی کنیم یا معادل قطعی آنها را بگذاریم.

۳- متغیرهای تصمیم (کنترل) غیرمنفی باشند. اگر متغیرهای کنترل منفی باشند آنها را در ۱- ضرب کرده، متغیر جدیدی تعریف می‌کنیم. در مثال زیر x_6 را نماینده x_5 می‌گیریم زیرا:

$$x_5 \leq 0$$
$$\rightarrow x_6 = -x_5 \, , \, x_6 \geq 0$$

٤- مقادیر سمت راست غیر منفی و تنها عدد ثابت باشند.

مثال ۳-٦: در نامعادله زیر متغیرها را در یک طرف تساوی جمع می‌کنیم:

$$x_1 + 2x_2 \leq 3x_3 + 4$$
$$\rightarrow x_1 + 2x_2 - 3x_3 \leq 4$$

۵- محدودیت ها به فرم تساوی باشند. پس معادلات از حالت $\geq$ یا $\leq$ به حالت = تبدیل می‌شوند. برای اینکار از متغیرهای جدید استفاده می‌کنیم،

مثال ۳-۷: در مثال زیر متغیر x_3 وجود ندارد، با اضافه کردن این متغیر رابطه به تساوی تبدیل می‌شود. نام این متغیر را متغیر کمبود[1] می‌گذاریم.

$$x_1 + 2x_2 \leq 4$$
$$\rightarrow x_1 + 2x_2 + x_3 = 4$$

در مثال زیر نیز با اضافه کردن متغیر x_4 رابطه را به تساوی تبدیل می‌کنیم. نام این متغیر را نیز متغیر مازاد[1] می‌گذاریم.

[1] Slack Variable

$$2x_1 - x_2 \geq 6$$
$$\rightarrow 2x_1 - x_2 - x_4 = 6$$

٦- در هر محدودیت یک متغیر پایه وجود داشته باشد. متغیر پایه متغیری است که تنها در یکی از محدودیتها ظاهر شده و در تابع هدف ظاهر نشود.

مثال ۳-۸: در مساله متغیرهای x_1 و x_2 متغیرهای پایه هستند.

$$\text{Max } Z = -3x_3 + x_4$$

S.t.

$$x_1 - 3x_3 + 3x_4 = 6$$
$$x_2 - 8x_3 + 4x_4 = 4$$
$$x_i \geq 0$$

ابتدا برای حل مساله بایستی جدول سیمپلکس رسم گردد. برای این منظور متغیرهای پایه در ستون اول از سمت چپ قرار می‌گیرند. برای نمایش جدول سیمپلکس به حل مساله مثال ۳-۸ می پردازیم که در حالت متعارف بوده و هدف بیشینه کردن آن است. جدول در زیر نمایش داده شده است.

x_B	x_1	x_2	x_3	x_4	b	b/a
x_1	1	0	-3	3	6	6/3=2
x_2	0	1	-8	4	4	4/4=1
Z	0	0	-3	+1	0	-

حال بایستی جدول بعدی سیمپلکس ترسیم گردد. در جدول بعدی متغیرهای غیرپایه برتر وارد پایه شده و متغیر ضعیف از پایه خارج می‌شود. در واقع این فرآیند آنقدر ادامه می یابد که به جواب بهینه نهایی برسیم. جواب بهینه نهایی وقتی حاصل می‌شود که ضرایب متغیرهای غیرپایه تابع هدف منفی شوند. برای رسم هر مرحله از جدول سیمپلکس عمل چرخش لولا باید صورت بگیرد. از جهت هندسه روش سیمپلکس با انجام عمل چرخش لولا ما از یک راس فضای امکانپذیر به راس دیگر که وضعیت بهتری دارد حرکت می کنیم. در عمل چرخش لولا چون هدف ما بیشینه کردن تابع هدف است، متغیر غیرپایه‌ای که دارای بیشترین ضریب مثبت است ($\text{Max } C_i$) جایگزین متغیر پایه‌ای خواهد شد که کمترین نسبت مقادیر سمت راست به ضریب متغیری که دارای ضریب مثبت است را داشته باشد ($\text{Min } b_j/a_{ij}$). C_i ضریب متغیر غیرپایه i در تابع هدف است. a_{ij} ضریب متغیر x_i در قید jام و b_j مقدار سمت راست در سطر و یا قید jام است. دلیل توجیهی برای این کار در زیر توضیح داده شده است:

[1] Surplus Variable

- در فوتبال مربی تصمیم می‌گیرد که بازیکن با منفعت بیشتر برای اهداف تیم را وارد کادر کرده و بازیکن با هزینه بیشتر را خارج نماید.
- مدیر یک شرکت کسی را که هزینه بیشتری صرف می‌کند را بیرون کرده و کسی را به مجموعه وارد می‌کند که از منابع شرکت کمتر بهره برده و منفعت بیشتری را عاید مجموعه نماید.

حال در مثال فوق x_2 باید از متغیرهای پایه خارج شود و همچنین x_4 بایستی به متغیرهای پایه اضافه شود، چرا که به کمینه‌کردن کمک خواهد کرد. پس جدول یکبار حول محور متغیر ٤ چرخانده شد که داریم

x_B	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	-0.75	3	0	3
x_4	0	1	-8	4	4
Z	0	-0.25	-1	0	-1

بهتر است که ردیف مربوط به متغیر x_4 تقسیم بر چهار شود تا ضریب x_4 عدد یک باشد. البته این کار تاثیری در حل مساله ندارد.

شرط بهینگی در روش سیمپلکس

- در حالت بیشینه کردن ضرائب متغیرها در تابلوی نهائی باید همگی منفی گردند. اگر به این حالت برسیم عمل چرخش لولا را ادامه نمی‌دهیم.
- در حالتی که $C_i \geq 0$ باشد و ضرائب a_{ij} در آن محدودیت برای آن متغیر منفی باشند، بی نهایت جواب داریم.

پس در تابلو دوم مسأله روبرو بدست می‌آید:

$$MaxZ = -0.25X_2 - X_3 + 1$$
$$X_1 - 0.75X_2 + 3X_3 = 3$$
$$X_2 - 8X_3 + 4X_4 = 4$$
$$X_1, X_2, X_3, X_4 \geq 0$$

حال در این شکل مساله به جواب نهایی رسیده‌ایم. برای اینکه تابع هدف بیشینه باشد بایستی

$$x_3 = 0 \text{ و } x_2 = 0$$

پس در فرم نهایی جدول سیمپلکس متغیرهای غیر پایه را برابر صفر قرار داده و جواب بهینه را از روی مقدار متغیرهای پایه نهایی حساب می‌کنیم. توجه نمایید که در فرم اولیه مساله با یک نگاه قابل حل کردن نبود.

مثال ۳-۹: شکل اولیه یک مساله بهینه‌سازی به صورت زیر است. آن را به روش سیمپلکس حل نمایید.

Max Z= 3 x_1+ x_2
s.t.

x_1-2 x_2 ≤10
2 x_1+ x_2≤24
x_1- x_2≤5
x_1, x_2≥0

ابتدا شکل متعارف آن را می نویسیم:

Max Z=+3 x_1+ x_2

x_1-2 x_2+ x_3=10
2 x_1+ x_2+ x_4=24
x_1- x_2+ x_5=5
x_i ≥0

جدول سیمپلکس و حل متوالی آن به صورت زیر است:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	b/a
x_3	1	-2	1	0	0	10	10/1
x_4	2	1	0	1	0	24	24/2
x_5	1	-1	0	0	1	5	5/1
Z	+3	+1	0	0	0		
x_3	0	-1	1	0	-1	5	-
x_4	0	3	0	1	-2	14	14/3
x_1	+1	-1	0	0	+1	5	-
Z	0	+4	0	0	−3	-15	
x_3	0	0	1	1/3	-5/3	29/3	
x_2	0	1	0	1/3	-2/3	14/3	
x_1	1	0	0	1/3	1/3	29/3	
Z	0	0	0	-4/3	-1/3	-101/3	

در سطر نهایی همه ضرایب منفی شدند، پس شکل نهایی مساله منتج از جدول نهایی سیمپلکس عبارت خواهد بود از:

$$\text{Max } Z = -\frac{4}{3}x_4 - \frac{1}{3}x_5 + \frac{101}{3}$$

s.t.

$$x_3 + \frac{1}{3}x_4 - \frac{5}{3}x_5 = \frac{29}{3}$$

$$x_2 + \frac{1}{3}x_4 - \frac{2}{3}x_5 = \frac{14}{3}$$

$$x_1 + \frac{1}{3}x_4 + \frac{1}{3}x_5 = \frac{29}{3}$$

چون هدف بیشینه کردن تابع هدف است پس داریم:

$$x_4 = x_5 = 0$$
$$x_2 = \frac{14}{3}$$
$$x_1 = x_3 = \frac{29}{3}$$

مثال۳-۱۰: مساله بهینه‌سازی زیر به روش سیمپلکس حل شده است.

$$\text{Max} \quad 11x_1 - 4x_2$$

$$s.t. \quad 3x_1 + 5x_2 \le 15$$
$$5x_1 + 2x_2 \le 10$$
$$x_1, x_2 \ge 0$$

$$\text{Max} \quad 11x_1 - 4x_2$$
$$\text{s.t.} \quad 3x_1 + 5x_2 + x_3 = 15$$
$$5x_1 + 2x_2 + x_4 = 10$$
$$x_1, ..., x_4 \ge 0$$

توجه شود که یک جواب اولیه مساله (۱۰ و ۱۵ و ۰ و ۰) می‌باشد.

	x_1	x_2	x_3	x_4	b	b/a
x_3	3	5	1	0	15	5
x_4	5	2	0	1	10	2
Z	+11	-4	0	0	0	
x_3	0	19/5	1	-3/5	9	
x_1	1	2/5	0	1/5	2	
Z	0	-42/5	0	-11/5	-22	

پس از تهیه جدول فوق چنانچه تابع هدف را بنویسیم داریم:

$$\text{Max} \quad -8.4x_2 - 2.2x_4 + 22 \quad \Rightarrow x_2 = x_4 = 0$$
$$3.8x_2 + x_3 - 0.6x_4 = 9$$
$$\rightarrow \quad x_3 = 9$$
$$x_1 + 0.4x_2 + 0.2x_4 = 2$$
$$\rightarrow x_1 = 2$$

اگر در ارایه فرم متعارف یک محدودیت دارای متغیر پایه نباشد بایستی از متغیر مصنوعی یا مجازی[1] استفاده کرد. این نیاز به تعریف متغیر مصنوعی با یک مثال ارایه می‌شود:

[1] Artificial Variable

$$\begin{cases} \text{Max} & 11x_1 + 4x_2 \\ s.t. & 3x_1 + 5x_2 \le 15 \\ & 5x_1 + 2x_2 \ge 10 \\ & x_1, x_2 \ge 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Max} & Z = 11x_1 + 4x_2 \\ s.t. & 3x_1 + 5x_2 + x_3 = 15 \\ & 5x_1 + 2x_2 - x_4 + x_5 = 10 \end{cases}$$

x_5: متغیر مصنوعی است و بایستی توجه کرد که در حل مدل اولیه بایستی ارزش این متغیر به نحوی صفر شود و گرنه با مشکل مواجه خواهیم شد. حل مسائل بهینه‌سازی خطی درصورت وجود متغیر مصنوعی دو راه حل متداول دارد:

۱- روش M بزرگ (روش جریمه): منظور از این روش اضافه کردن هزینه خیلی زیاد (M) به متغیر مصنوعی در تابع هدف است. با این کار خود بخود متغیر مصنوعی حذف خواهد شد و مسأله بهینه بدست می‌آید.

۲- روش دو فاز (روش دو مرحله ای)

الف) روش M بزرگ:

در این روش ضریب بزرگ M- به متغیر مصنوعی ضرب می‌شود تا هزینه استفاده از آن بسیار زیاد شود.

$$\text{Max } Z = 11\,x_1 + 4\,x_2 - M\,x_5$$

البته برای رفع مشکل تکرار متغیر اصلی و پایه در تابع هدف، x_5 را از معادلات بدست آورده و معادل آن را جایگذاری خواهیم کرد. داریم:

$$x_5 = 10 + x_4 - 2\,x_2 - 5\,x_1$$

پس برای تابع هدف خواهیم داشت:

$$\text{Max } Z = +11\,x_1 + 4\,x_2 - M(10 + x_4 - 2\,x_2 - 5\,x_1)$$

در عمل روش دو فاز بیشتر مورد استفاده خواهد بود؛ چون تعیین مقدار مناسب برای M اغلب مسئله ساز است.

ب) روش دو فاز: در این روش ابتدا همان مساله بهینه سازی را با یک تابع هدف جدید حل می کنیم. تابع هدف جدید جمع جبری تمام متغیرهای مصنوعی است که هدف کمینه سازی آن است. با این کار مقدار متغیرهای مصنوعی صفر شده و می توان آنها را حذف کرد. در فاز دوم به همان مساله اولیه بر می گردیم ولی در شکل جدید معادلات متغیرهای مصنوعی حذف شده اند. لازم به ذکر است که اگر نتوان در یک

مساله متغیرهای مصنوعی را حذف کرد آن مساله جواب بهینه ندارد. حال به کمک مثال زیر روش دو فاز را توضیح می‌دهیم:

مثال ۳-۱۱:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & Z = x_2 \\ \text{s.t.} \quad & 3x_1 + 4x_2 \geq 9 \\ & 5x_1 + 2x_2 \leq 8 \\ & 3x_1 - x_2 \leq 0 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & Z = x_2 \\ \text{s.t.} \quad & 3x_1 + 4x_2 - x_3 + x_6 = 9 \\ & 5x_1 + 2x_2 + x_4 = 8 \\ & 3x_1 - x_2 + x_5 = 0 \end{aligned}$$

فاز یک)

در فاز یک هدف کمینه کردن جمع متغیرهای مصنوعی است.

$$\text{Min } W = x_6$$

تابع هدف جدیدی تعریف می‌کنیم، که برابر مجموع متغیرهای مصنوعی تعریف شده است. برای حل این مسأله بهینه‌سازی، محدودیت‌های ما همان محدودیت‌های قبلی هستند، به اضافه تابع هدف قبلی (Z). چون متغیرهای مصنوعی پایه هم هستند، بایستی سطر نماینده آنها را از تابع هدف جدید (W) کم کنیم تا متغیرهای مصنوعی از تابع هدف حذف شوند. بعد از حل فاز یک اگر مقدار W برابر صفر شد، فاز دو را شروع می‌کنیم. اگر مقدار W در پایان فاز یک برابر صفر نشد، مسأله بهینه‌سازی اولیه جواب امکانپذیر ندارد.

$$\text{Min } W = x_6 = 9 - 3x_1 - 4x_2 + x_3$$

توجه شود که در فاز یک $Z = x_2$ به محدودیت تبدیل شده است. جدول سیمپلکس فاز یک به صورت زیر است.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	b	b/a
x_6	3	4	-1	0	0	1	9	9/4
x_4	5	2	0	1	0	0	8	8/2
x_5	3	-1	0	0	1	0	0	-
Z	0	1	0	0	0	0	0	
$-W$	+3	+4	-1	0	0	0	+9	

x_2	3/4	1	-1/4	0	0	1/4	9/4	
x_4	7/2	0	1/2	1	0	-1/2	7/2	
x_5	15/4	0	-1/4	0	1	1/4	9/4	
Z	- 3/4	0	1/4	0	0	-1/4	- 9/4	
W	0	0	0	0	0	-1	0	

در این مرحله به پایان فاز یک می‌رسیم. چون $W=0$ پس مساله بهینه‌سازی قابل حل بوده و چون $x_6 = 0$ آن را از تابع هدف فاز دو حذف می‌نماییم. حال مسئله فاز دو به فرم متعارفی رسیده که دیگر نیاز به متغیر مصنوعی ندارد. پس سراغ حل فاز دوم می‌رویم که در آن x_6 حذف شده و داریم:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	b/a
x_2	3/4	1	-1/4	0	0	9/4	ناممکن
x_4	7/2	0	1/2	1	0	7/2	7
x_5	15/4	0	-1/4	0	1	9/4	ناممکن
Z	-3/4	0	**1/4**	0	0	-9/4	

x_2	10/4	1	0	1/2	0	4
x_3	7	0	1	2	0	7
x_5	22/4	0	0	1/2	1	4
Z	-10/4	0	0	-1/4	0	-25/8

پس به جدول نهایی می رسیم و بنابراین جواب حل مساله عبارتست از: x=(0, 4, 7, 0, 4)

تمرین ۳-۱: مساله بهینه‌سازی خطی زیر را به روش دو فاز حل نمائید.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & Z = 2x_1 + x_2 \\ & 2x_1 + 3x_2 \geq 6 \\ & 2x_1 + x_2 \leq 6 \\ & x_2 \geq x_1 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

تعریف تبهگنی[1]: اگر در جدول سیمپلکس برای خارج کردن یک متغیر پایه دو گزینه برای انتخاب داشته باشیم به اختیار یکی از گزینه‌ها را انتخاب کرده و حل مساله را ادامه می‌دهیم. این حالت را تبهنگی می‌نامیم که دلیل ایجاد آن زاید بودن یکی از محدودیت‌ها بوده که در واقع نیازی به آن محدودیت نیست. اشاره به این نکته ضروری است که انتخاب اختیاری متغیر پایه تاثیری در جواب نهایی نخواهد داشت.

[1] Degeneracy

تحلیل حساسیت[1]: اگر تابع هدف وابسته به چند متغیر بصورت $y = Z(x_1,x_2, \ldots)$ باشد تحلیل حساسیت، ارزش هر یک از متغیرها را در تغییر ارزش تابع هدف بیان می‌کند. میزان حساسیت تابع هدف y در مقابل x_1 برابر است با:

$$S = \frac{\partial Z}{\partial x_1}$$

یک کاربرد تحلیل حساسیت به صورت فوق در استخراج شبه قیمت متغیرها است که بعداً اشاره می‌شود.

عدم قطعیت[2]: عدم قطعیت به دلیل نبود اطلاعات کافی از سیستم به خصوص از رفتار آن در آینده می‌باشد و به همین دلیل از بحث تحلیل حساسیت می‌توان استفاده کرد تا اثرات این عدم قطعیت را در تصمیم‌گیری کاهش دهیم. مدل های بهینه‌سازی غیر قطعی در فصل ۸ بررسی خواهند شد. یک روش ساده برای حل مدلهای غیر قطعی این است که با عددهی به ضرایب غیرقطعی، مسئله را چندین بار حل کنیم بطور مثال اگر در رابطه زیر C_1 را در اختیار نداشته باشیم بسته به دقتی که برای جواب نیاز داریم به C_1 چندین بار عدد داده و مدل را حل می‌کنیم. سپس جواب نهایی را به کمک تحلیل آماری استخراج می‌کنیم.

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \ldots + C_nX_n$$
$$s.t.$$
$$AX \geq 0$$
$$X \geq 0$$

مدل همزاد[3]

یکی از کاربردهای مدل همزاد این است که اگر مدل اولیه[4] دارای سطر زیاد و تعداد متغیرهای کم باشد؛ با حل مدل همزاد آن تعداد سطرهای سیمپلکس کم شده و تعداد متغیرها بیشتر خواهد شد. مدل همزاد یک مدل به صورت زیر تهیه می‌شود:

$$\begin{array}{lll} Max & z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j & \\ s.t & \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i & \Rightarrow \\ & x_j \geq 0 & \end{array} \qquad \begin{array}{lll} Min & v = \sum_{i=1}^{m} b_i y_i & \\ s.t & \sum_{i=1}^{m} a_{ji} y_i \geq c_j & \\ & y_i \geq 0 & \end{array}$$

[1] Sensitivity Analysis
[2] Uncertainty
[3] Dual Model
[4] Primal Model

$i= 1,2, \ldots, m \ ; j=1,2,\ldots,n.$

همچنین با حل مدل همزاد، مقادیر شبه قیمت (y) برای هر یک از محدودیت های مدل اولیه بدست می‌آید.

$$x_1 + x_2 + 3x_3 \le b \rightarrow y$$

شبه قیمت هر منبع سمت راست برابر است با میزان افزایش تابع هدف به ازای افزایش یک واحد به منبع سمت راست آن محدودیت.

$$\text{شبه قیمت محددویت } i \text{ ام} = \frac{\Delta Z}{\Delta b_i} = y_i$$

برای توضیح نحوه نوشتن مدل همزاد از مثالهای زیر استفاده می‌کنیم.

مثال۳-۱۲: ماسه مورد نیاز را می‌توان از دو منبع تامین کرد که خصوصیات این دو محل قرضه به صورت زیر است. ترکیب بهینه استفاده از این دو منبع را پیدا نمائید به صورتی که در روز حداقل ۱۰۰ واحد ماسه به کارگاه تحویل داده شود.

جدول۱- خصوصیات دو محل قرضه مصالح

	منبع ۱	منبع ۲
در صد ماسه	60%	40%
هزینه هر متر مکعب	4.8$	4$

پس مدل اولیه به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} Min \quad & Z = 4.8X_1 + 4X_2 \\ & 0.6X_1 + 0.4X_2 \ge 100 \\ & X_1, X_2 \ge 0 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} Z^* = 800\$ \\ X_1 = 167 \\ X_2 = 0 \end{cases}$$

مدل همزاد به قرار زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Max \quad & D = 100Y \\ & 0.6Y \le 4.8 \\ & 0.4Y \le 4 \\ & Y \ge 0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} Y = 8\frac{\$}{m^3} \\ D^* = 800 \end{cases}$$

جواب

توجه نمائید که مقدار D و Z در نقطه بهینه با هم برابر هستند.

مثال۳- ۱۳: بعنوان مثال دیگر داریم:

$$\begin{cases} Max & 3X_1 + 4X_2 \\ & X_1 + X_2 \le 2 \\ & X_1 + 5X_2 \le 1 \\ & X_1, X_2 \ge 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Min & 2Y_1 + 1Y_2 \\ & Y_1 + Y_2 \ge 3 \\ & Y_1 + 5Y_2 \ge 4 \\ & Y_1, Y_2 \ge 0 \end{cases}$$

فصل ٤- بهینه‌سازی غیرخطی

در دنیای واقعی کمتر با مدلهای خطی روبه‌رو می‌شویم و در واقع مدلهای واقعی معمولا غیرخطی[1] هستند. بنابراین مدلسازی و سپس حل این نوع از مدلها برای حل مسائل مهم ضروری و لازم به نظر می‌رسد.

مثال ٤-١: تابع هدف و قیود مدل بهینه‌سازی زیر دارای خصوصیت غیرخطی هست:

$$\begin{aligned} Min \quad & Z = 5x_1^2 + x_2 \\ s.t. \quad & x_1 . \ln x_2 = 500 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

مثال ٤-٢: طراحی یک مخزن استوانه‌ای برای تصفیه یک فاضلاب مدنظر است. اگر ضخامت ورق ثابت باشد؛ ابعاد مخزن را طوری طراحی نمائید که هزینه ساخت آن مینیمم باشد. r شعاع استوانه و l طول آن است. فاضلاب با دبی ۲ متر مکعب بر ثانیه وارد مخزن می‌شود و حداقل بایستی ۱۵ دقیقه در آن بماند.

$$\begin{aligned} Min \quad & A = \pi r^2 + 2\pi rl \\ s.t. \quad & \pi r^2 l \geq 1800 \\ & r, l \geq 0 \end{aligned}$$

جواب نهایی به نوعی در شکل ٤-١ ارایه شده است.

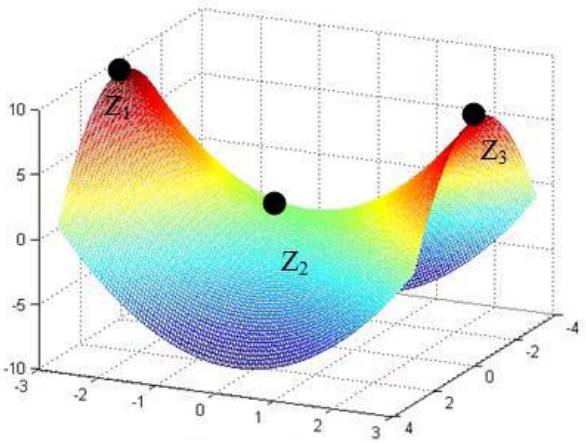
شکل ٤-١ شکل طراحی شده تعدادی مخازن نفت در یک پالایشگاه

[1] Non-Linear Programming: NLP

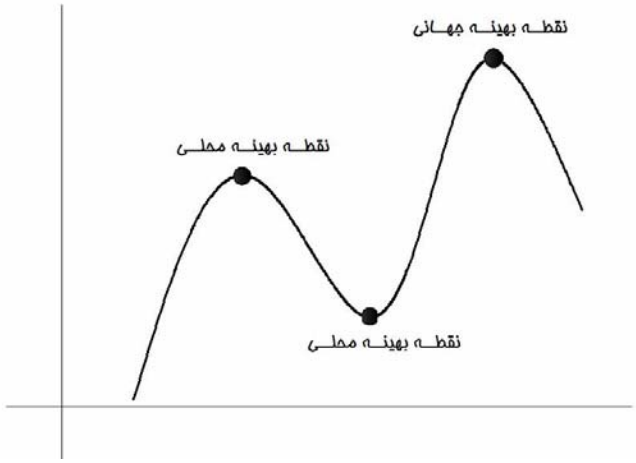
در حل این مسائل اغلب دو نوع جواب بهینه داریم:

- نقطه بهینه جهانی[1]
- نقطه بهینه محلی[2]

در شکلهای ٤-٢ و ٤-٣ این دو نوع جواب به صورت ترسیمی معرفی شده‌اند.



شکل ٤-٢ نقاط بهینه محلی و جهانی در یک مساله سه بعدی (رویه زین اسبی)



شکل ٤-٣ نقاط بهینه محلی و جهانی در یک مساله دوبعدی

حل مسائل بهینه‌سازی بصورت خطی یا غیرخطی که بدون محدودیت هستند ساده و راحت می‌باشد. ولی در سیستمهای غیرخطی با وجود محدودیتهای چندگانه، بایستی محدودیت‌ها را در تعیین نقاط بهینه نیز در نظر بگیریم. تا دو دهه پیش مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با روشهای متداول مبتنی بر مشتق‌گیری حل می‌شد.

[1] Global Optimum
[2] Local Optimum

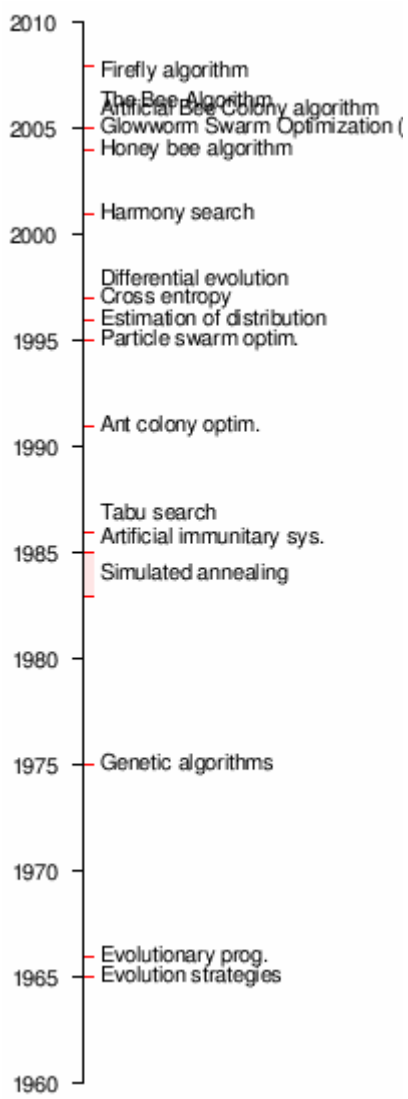
امروزه روشهای جدیدی مشهور به تکاملی[1] ابداع شده‌اند که از طبیعت الهام گرفته‌اند. چند روش مهم بهینه‌سازی تکاملی گرفته شده اند:

۱- روش الگوریتم ژنتیک نیز از نحوه تلفیق ژن و کروموزومها اقتباس شده است.

۲- روش بهینه سازی مورچه ها که از نحوه حرکت مورچه‌ها و بهینه یابی فاصله بین غذا تا لانه ابداع شده است.

۳- روش زنبور که از نحوه تولید مثل زنبور عسل برگرفته شده است.

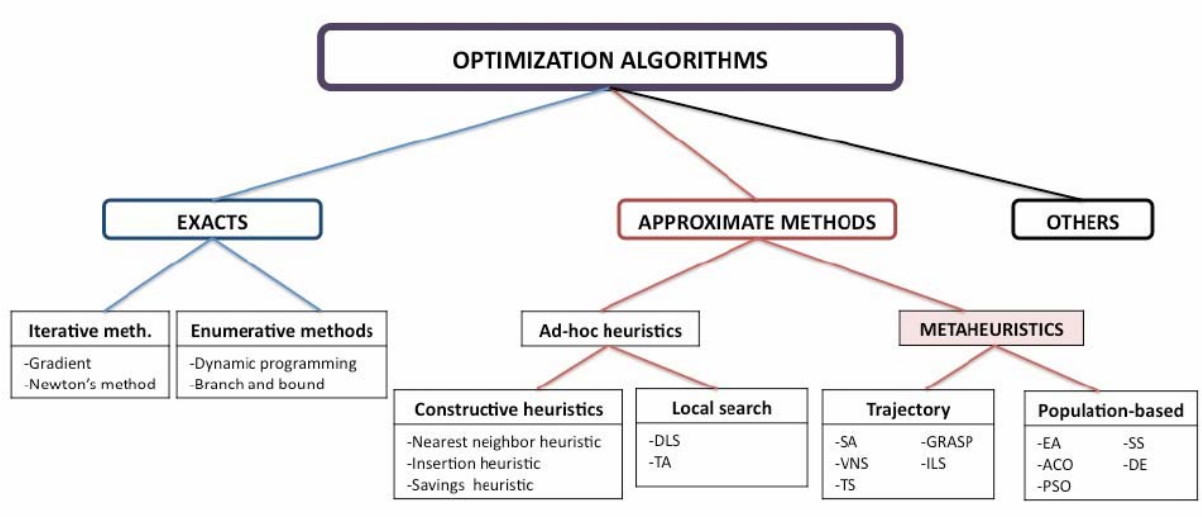
شکل ٤-٤ نحوه تکامل این علم را درسالهای اخیر معرفی می نماید (Wikipedia, 2009).



شکل ٤-٤ تاریخچه مختصر روشهای بهینه‌سازی تکاملی

[1] Metaheuristic

لازم به ذکر است که روشهای جبری مبتنی بر مشتق‌گیری و دیفرانسیل در یافتن نقاط بهینه سراسری یا جهانی اغلب با مشکل مواجه می‌شوند. در حالی‌که روشهای تکاملی در نقاط بهینه محلی کمتر متوقف شده به جواب بهینه سراسری می‌رسند. در عوض ایراد روشهای تکاملی این است که نقطه یا نقاط دقیق بهینه را به کندی و به صورت غیر دقیق پیدا می‌کنند ولی در مسایل پیچیده حدود جواب را به نسبت قابل قبولی می‌یابند. در شکل ٤-٥ طبقه بندی روشها ارایه شده است.



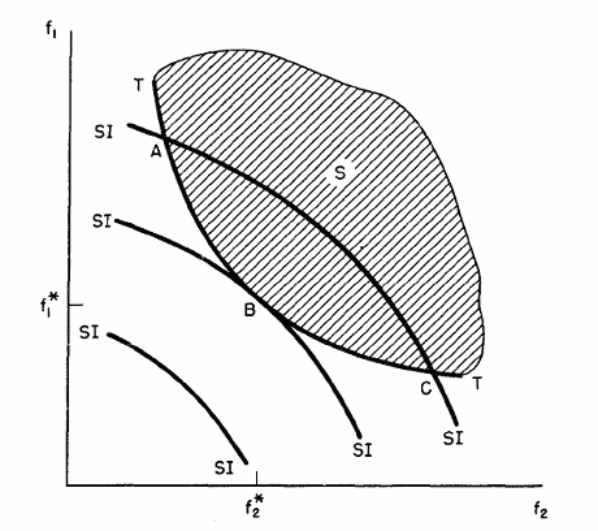
شکل ٤-٥ طبقه بندی روشهای حل مسایل برنامه ریزی ریاضی[1]

در این فصل حل مسایل بهینه‌سازی به روشهای حل دقیق شامل روش ترسیمی و ضرایب لاگرانژ توضیح داده می‌شود و برای اطلاع مقدماتی از روشهای تکاملی به کارآموز و همکاران (۱۳۸۵) و نیز زهرایی و حسینی (۱۳۸۸) مراجعه شود.

حل ترسیمی

یک روش حل مسایل غیر خطی با دو متغیر تصمیم و با قیود کم به صورت ترسیمی می‌باشد. این نوع روش حل مساله در بخش بهینه‌سازی خطی توضیح داده شد با این تفاوت که در این قسمت تابع هدف یا فضای امکانپذیر از توابع خطی تهیه نشده است. به عنوان مثال در شکل ٤-٦ نقطه بهینه B از فضای امکانپذیر S انتخاب شده است.

[1] *neo.lcc.uma.es/staff/jamal/downloads/vanet-chapters/Chapter-3.pdf*



شکل ٤-٦ حل ترسیمی مساله بهینه‌سازی غیرخطی

تمرین ٤-١: مساله غیر خطی روبرو را به صورت ترسیمی‌حل نمائید:

$$Max\ Z = X_1 X_2$$
$$s.t.$$
$$X_1 = 2X_2$$
$$0 \le X_1 \le 10$$
$$0 \le X_2 \le 20$$

روش ضرایب لاگرانژ[1]

یکی از روشهای مطرح برای حل مسائل بهینه‌سازی غیر خطی روش ضرایب لاگرانژ است. برای این منظور ابتدا بایستی متغیر L را به صورت زیر تشکیل بدهیم:

$$Min \quad Z = f(x)$$
$$g_i(x) = b_i$$
$$\rightarrow \text{Min } L = f(x) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left(b_i - g_i(x)\right)$$

تشکیل عبارت فوق الذکر تغییری در تابع هدف ایجاد نمی‌کند ولی با انجام این کار محدودیتها نیز وارد تابع اصلی می‌شوند و به این ترتیب می‌توان مسئله بهینه‌سازی بدون محدودیت را به سادگی حل کرد پس طبق شرایط بهینه سازی کان-تاکر داریم:

[1] Lagrange Multipliers

$$\frac{\partial L}{\partial x}=0$$
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i}=0$$

مثال ٤-٣: اداره حمل و نقل یک شهری دارای دو مسیر اتوبوسرانی مطابق جدول ٤-١ است که مسیر ٢ دارای تراکم بیشتری از مسافر نسبت به مسیر ١ است. قیمت متوسط بلیط هم ١/٢ دلار است. تابع هدف مدیر شرکت آن است که واریانس میزان قیمت نسبت به جمعیت استفاده کننده کم باشد. پس این اداره می‌خواهد به جای قیمت ثابت برای هر مسافر قیمت متغیری به ازای مسافت طی شده برای هر مسافر اعلام نماید. سوال این است که در هر یک از مسیرهای ١ و ٢ قیمت بلیط چه مقدار باشد؟ (Ossenbruggen, 1984)

جدول ٤-١ خصوصیات دو مسیر مختلف حمل و نقل در مثال ٣

	طول مسیر (کیلومتر)	تعداد متوسط مسافر
مسیر ١	١٠	٦٠٠
مسیر ٢	١٥	١٤٠٠

$$\text{Min}\quad V=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{2}x_i(r_i-\bar{r})^2$$
$$=\frac{600}{2000}(10P_1-1.2)^2+\frac{1400}{2000}(15P_2-1.2)^2$$
$$R=C\rightarrow P_1(n_1L_1)+P_2(n_2L_2)=\bar{r}N\rightarrow P_1(600\times 10)+P_2(1400\times 15)=1.2\times 2000$$

و به صورت خلاصه:

$$s.t.$$
$$6P_1+21P_2=2.4$$
$$P_1,P_2\geq 0$$

حال این مساله را به کمک روش لاگرانژ به صورت زیر حل می‌نماییم:

$$\text{Min}\quad L=0.3(10P_1-1.2)^2+0.7(15P_2-1.2)^2+\lambda(2.4-6P_1-21P_2)$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial L}{\partial P_1}=0\\ \dfrac{\partial L}{\partial P_2}=0\\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda}=0\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}P_1=\dfrac{1.2+\lambda}{10}=0.12\\ P_2=\dfrac{1.2+\lambda}{15}=0.08\\ \lambda=0\end{cases}$$

تمرین ٤-٢: مثال ٢ را با فرض تساوی در قید به روش لاگرانژ حل نمایید.

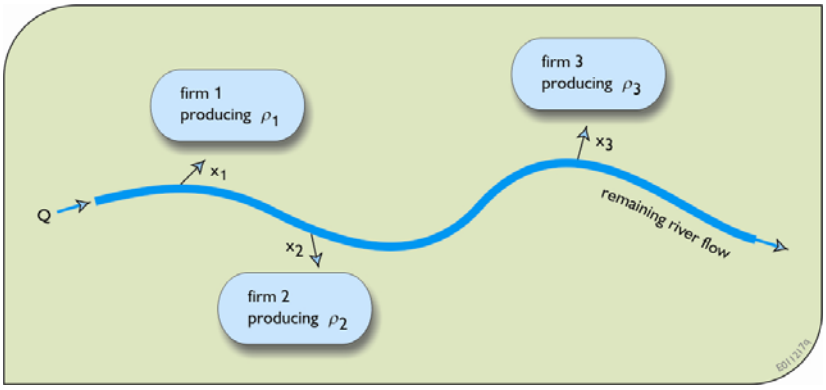
تمرین ٤-٣: بعضی از نرم‌افزارهای تخصصی برای حل مسایل بهینه‌سازی غیرخطی را نام ببرید. برای اینکار می‌توانید از اینترنت راهنمایی بگیرید.

تحقیق ٤-١: روش الگوریتم ژنتیک را یاد گرفته و یک نرم‌افزار از بین انواع متعـدد آن در اینترنـت اسـتفاده نمایید. به عنوان نمونه از نرم‌افزار GANLC یا ابزار موجود در برنامـه MATLAB مـی‌تـوان اسـتفاده نمـود. سپس یک مساله بهینه‌سازی مربوط به مهندسی عمران را طراحی نموده و با نرم‌افزار حل نمایید.

فصل ۵- برنامه‌ریزی پویا

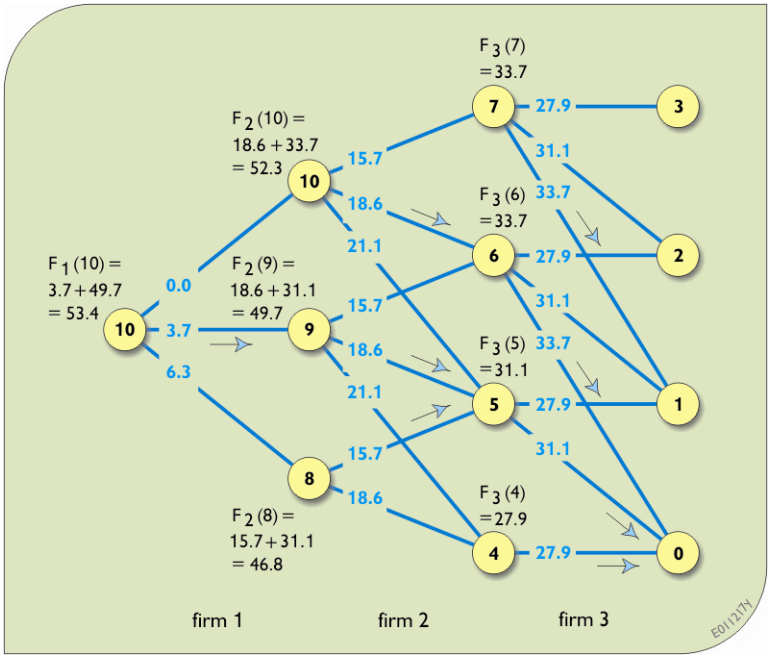
برنامه‌ریزی پویا یک روش حل مسایل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی است. این روش در مسایل با ابعاد کم (از جهت متغیرها) از روشهای متداول غیرخطی می‌تواند سریع‌تر به جواب برسد. مساله مهم دیگر در مورد این روش دیدگاه جالب آن برای حل مساله است که از اصل بهینگی بلمن استفاده می‌کند. در این روش حل مساله به چند مرحله تقسیم می‌شود و تاکید دارد که در هر مرحله از بهینه‌سازی، فقط تا آن مرحله بدون توجه به مراحل جلوتر (در حالت پیشرو[1]) طراحی گردد. در حالت پسرو[2] کافی است که مجموعه را از آخر تا آن مرحله در نظر گرفت و نگران مراحل اولیه نبود. کاربرد عمده این روش در تخصیص منابع مالی و طبیعی می‌باشد. برای اطلاع از جزئیات این روش می‌توان به منابع مختلف از جمله به (Loucks and van Beek, 2005) مراجعه نمود. مثال ۵-۱ نحوه حل یک مساله را نشان می‌دهد.

مثال ۵-۱: در رودخانه‌ای ۱۰ واحد آب را در هر بازه زمانی می‌توان به سه کارخانه که در مسیر رود قرار دارند تخصیص داد. تابع سود هر کارخانه متفاوت بوده و مساله این است که به هر بنگاه اقتصادی چقدر آب تخصیص داده شود تا در کل منافع حاصله از مجموع سود سه کارخانه بیشینه باشد؟ شکلهای ۵-۱ و ۵-۲ زیر مراحل حل مساله را ارایه می‌دهند.



شکل ۵-۱ تخصیص آب به سه کارخانه در مسیر یک رودخانه

[1] Foreward
[2] Backward



شکل۵-۲ حل مساله بهینه‌سازی مثال ۵-۱ به روش برنامه‌ریزی پویا به روش پسرو

مقادیر روی پیکانها هم مقادیر کل مطلوبیت در هر شاخه ممکن را نشان می دهند ولی مقادیر روی هر گره میزان مطلوبیت بهینه را برای مدیر نشان می‌دهند. مقادیر داخل گرهها میزان آب باقی مانده در رودخانه را تا آن مرحله نشان می‌دهند. جواب نهایی برابر است با:

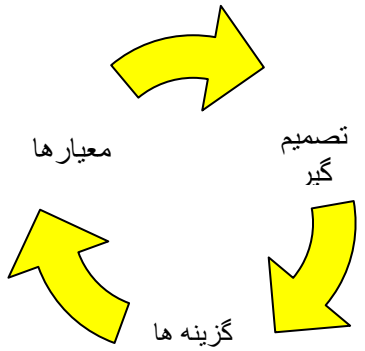
$X_1=1 \quad , X_2=4 \quad , X_3=5$

تمرین۵-۱: مساله فوق را به صورت پیشرو حل نمایید. آیا جواب بهینه فرق کرده یا همان است؟

فصل ٦- تصمیم‌گیری چندمعیاره

Multi Criteria Decision Making, MCDM

تصمیم‌گیری بخشی از زندگی روزانه انسان است. تقریبا" همه تصمیم‌های ما شامل چند معیار (بعضا" متضاد) می‌باشد. در هر مساله تصمیم گیری سه رکن اساسی داریم: تصمیم‌گیر، گزینه‌ها و معیارهای مطرح برای ارزیابی (شکل ٦-١).



شکل ٦-١ سه عامل اساسی در تصمیم‌گیری

مثال ٦-١: شهرداری برای ارتباط دو ساحل یک رود شهری در حال تصمیم‌گیری برای ساخت پل است. دو گزینه برای انتخاب وجود دارد. برای انتخاب بین آن دو گزینه دو هدف زیر مطرح است: حداقل کردن هزینه ساخت پل و حداکثر کردن رفاه اجتماعی مردم اطراف پل. برای این تصمیم‌گیری محدودیتهایی نظیر عبور پل از نقاط کم عمق رود، عدم عبور از مناطق مسکونی و حمل و نقل دریایی نیز می‌تواند وجود داشته باشند (مثال فرودگاه هنگ کنگ و توسعه آن).

مثال ٦-٢: در مساله انتخاب نوع سازه یک سد از بین گزینه های سد خاکی، سد بتنی و سنگریزه‌ای اهداف زیر مد نظر است:

- ✓ طول مسیر رفت و آمد برای انتقال مصالح
- ✓ نوع مصالح
- ✓ تنوع ساختگاه سد
- ✓ قابلیت اعتماد به سازه
- ✓ حجم مخزن و هدف از احداث سد

تمرین- یک مقاله علمی پژوهشی پیدا کنید که در آن کاربرد دیدگاه تصمیم گیری چند معیاره را در مهندسی عمران نشان دهد (تنها ارایه صفحه اول مقاله کافی است).

دسته‌بندی روشهای حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره

روشهای حل مسایل تصمیم گیری چندمعیاره از دید نوع گزینه‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. حالت پیوسته که در آن گزینه بهینه در حین حل مساله تعیین و طراحی خواهد شد. این نوع مسایل به تصمیم‌گیری چندهدفه[1] مشهورند.

مثال ٦-٣: برای مسائل پیوسته یک مثال مهم تعیین تراز بهینه تاج سد است.

حالت دوم حالت گسسته است که در آن گزینه ها از قبل طراحی شده و مستقل از یکدیگر بوده و تنها انتخاب یا اولویت‌بندی آنها مهم است. این نوع مسایل به تصمیم‌گیری چندشاخصه[2] معروفند.

مثال٦-٤: برای مسائل گسسته ساختن سد یا نساختن آن؛ انتخاب بهترین پروژه بین سه پروژه عمرانی؛ انتخاب بین چهار پیمانکار مثالهایی از این قبیل هستند.

٦-١ روشهای حل مسائل تصمیم گیری چند معیاره (گسسته):

در این قسمت روش‌های مطرح در تصمیم‌گیری چندشاخصه با یک تصمیم‌گیر، ذکر شده و سپس توضیح داده می‌شود. مطالعات بسیاری برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندشاخصه صورت گرفته است. البته وقتی که این مسائل با چند تصمیم‌گیر روبرو شوند پیچیدگی بیشتری خواهند داشت. مساله تصمیم‌گیری چندشاخصه به صورت یک ماتریس بیان می‌شود که در آن هر مولفه ماتریس بیانگر عملکرد گزینه iام از دید معیار jام است.

مثال ٦-٥: در جدول ٦-١ ماتریس اطلاعات برای مساله تصمیم‌گیری چندشاخصه برای انتخاب بین سه سد ارائه شده است. اگر تعداد معیارهای ارزیابی زیاد باشد بایستی آنها را در یک درخت سلسله مراتبی قرار داد.

[1] Multi-Objective Decision Making
[2] Multi-Attribute Decision Making

جدول ٦-١ ماتریس اطلاعات برای مساله تصمیم‌گیری چندشاخصه روی سه سد مخزنی

نام معیار	اثرات منفی زیست‌محیطی	نسبت سود به هزینه	مشارکت عمومی	پیشرفت طرح	اولویت مصرف
وزن معیار	نسبتا کم	متوسط	کم	زیاد	خیلی زیاد
نوع داده معیار	بیانی	فازی مثلثی	بیانی	قطعی	بیانی
سد ۱	کم	(۰/۱، ۰/۱، ۱/۵)	نسبتا زیاد	۲ (فاز ۲)	نسبتا زیاد
سد ۲	نسبتا زیاد	(۰/۳، ۰/۳، ۱/٤)	متوسط	٤ (بهره‌برداری)	خیلی زیاد
سد ۳	نسبتا زیاد	(۰/۳، ۰/۳، ۱/۳)	خیلی زیاد	۳ (اجرا)	زیاد

برای حل این مسئله روشهای مختلفی وجود دارد.

۱- روش غلبه[1]

تصمیم‌گیری چندمعیاره وقتی تبدیل به یک مسأله ریاضی می‌شود که هیچ یک از گزینه‌ها غلبه مطلق نداشته باشند. اگر گزینه‌ای از دید تمام معیارها برتری داشته باشد در واقع گزینه برتر مشخص گردیده است. بعد از کنار گذاشتن گزینه برتر، با همان ایده فوق انتخاب گزینه برتر دوم بررسی می‌شود. این برتری می‌تواند از دید یک معیار یا معیارهای متعدّد باشد. روش غلبه به ندرت در دنیای واقعی رخ می‌دهد.

۲- روش بیشینه - کمینه[2]

این روش برای پرهیز از انتخاب بدترین گزینه، رویکرد محافظه‌کارانه‌ای را اتخاذ می‌کند. ابتدا به هر گزینه یک امتیاز از روی مقدار کمینه عملکرد گزینه از دید هر یک از معیارها داده می‌شود. بعد در بین گزینه‌ها آنکه امتیاز بیشینه‌ای دارد انتخاب می‌شود. محدودیت این روش آن است که بایستی در آن معیارهای مختلف قابل مقایسه با هم باشند که این مسأله محدودیت عمده‌ای برای این روش می‌باشد.

اگر a_{ij} ارزیابی گزینه i ام از دید معیار j ام باشد، گزینه‌ای که بیشترین امتیاز را مطابق رابطه زیر دارد انتخاب می‌گردد:

$$F= \max_i \min_j [a_{ij}]$$

لازم به ذکر است که a_{ij} در تمام مولفه‌های ماتریس تصمیم‌گیری بایستی نرمال شده باشد. این نرمال‌سازی بایستی معیارهای منفی را درنظر بگیرد تا تنها افزایش مقدار آنها مطلوب باشد.

[1] Dominance
[2] Maximin

مثال ٦-٦: با لحاظ دو معیار بین سه گزینه مطرح در جدول ٦-٢ یکی را انتخاب نمائید.

جدول ٦-٢ مثالی برای روش بیشنه-کمینه

	C_1	C_2	Min
A_1	٣	٥	٣
A_2	٢	١	١
A_3	٥	٤	٤ (بیشینه)

با لحاظ عدد بیشینه در ستون کمینه ها A_3 گزینه برتر است. حال می‌توانیم ایرادها را با توجه به جدول ٦-٣ درک کنیم:

جدول ٦-٣ تغییر در ارایه ها

	C_1	C_2	Min
A_1	٣	٨	٣
A_2	٢	١	١
A_3	٥	٤	٤

چنانچه در سطر دوم ستون سوم از چپ عدد ٥ به ٨ تبدیل شود، تفاوتی در حل مسئله ایجاد نخواهد کرد. در واقع انعطاف پذیری بین معیارها کم است.

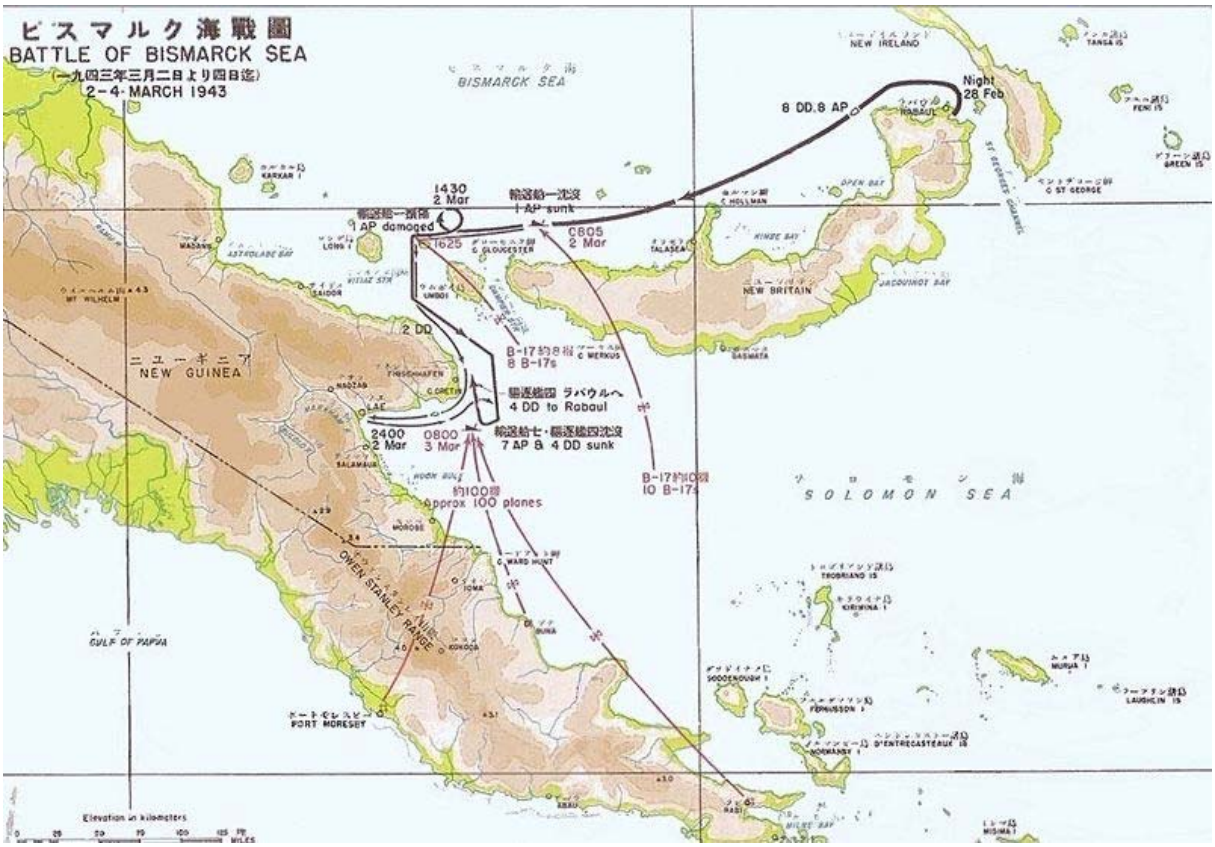
مثال ٦-٧: در جنگ جهانی دوم فرمانده چند ناو ژاپنی تصمیم داشت تا از دریای بیسمارک عبور کرده و صدهزار نیرو را به گینه نو برساند. نیروی هوایی متفقین نیز مترصد ناوها بودند تا به آنها حمله کنند[1].

هدف ژاپنی ها: آسیب کمتر به ناوها.

هدف دشمن: تخریب بیشتر از ناوهای دشمن.

از آنجا که دو مسیر شمالی (کوتاه‌تر) و جنوبی (طولانی‌تر) برای عبور مطرح بود به نظر شما کدام گزینه برای ناوگان ژاپنی بهتر است تا در بدترین حمله محتمل دشمن کمترین خسارت را داشته باشد (شکل ٦-٢). جدول تصمیم گیری ٦-٤ بیانگر خسارت به ناوگان که معادل منفعت نیروی هوایی است:

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Battle_of_the_Bismarck_Sea



شکل ٦-٢ مسیر دوگانه برای حرکت ناوگان

جدول ٦-٤ ماتریس تصمیم‌گیری برای یک نبرد

		ناوگان ژاپن	
		شمال	جنوب
نیروی هوایی دشمن	شمال	۲	۲
	جنوب	۱	۳

لازم به ذکر است که در این مساله به خاطر تصمیم اشتباه فرمانده ژاپنی، ۲۲ ناو غرق شده و ۱۵۰۰۰ نیروی آنها کشته شدند.

۳- روش‌های جمع وزنی ساده

میانگین امتیاز هر گزینه در روش جمع وزنی ساده بصورت معادله زیر بیان می‌شود که در آن هر گزینه i از دید معیار j ارزیابی به‌اندازه a_{ij} دارد و n تعداد معیارها است. از طرف دیگر هر معیار j یک وزن نسبی به‌اندازه u_j دارد.

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_j a_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} w_j}$$

مطالعه موردی ٦-١: سرانه آب هر ایرانی در زاگرس غربی، چهار برابر زاگرس شرقی است. لذا برای بهبود وضعیت آب در مرکز ایران اقداماتی جهت ساخت طرح های انتقال آب مطابق جدول ٦-٥ صورت پذیرفته است. در این مطالعه چهار طرح با هم مقایسه میشوند. به کمک روش جمع وزنی ساده ارزش هر طرح انتقال آب را برآورد کرده و گزینه ها را اولویت‌بندی نمایید:

جدول ٦-٥ مطالعه موردی انتقال آب از زاگرس غربی به زاینده‌رود

معیارها	سازگاری با سیاست ها	جابجایی مردم - منفی	مشارکت مردمی	سود - هزینه	تنوع منابع مالی	اولویت مصرف	اثرات منفی زیست محیطی
وزن معیارها	**زیاد**	**نسبتا زیاد**	**کم**	**متوسط**	**متوسط**	**خیلی زیاد**	**نسبتا کم**
گوکان	**زیاد**	**1**	**نسبتا زیاد**	**1.4**	**5%**	**نسبتا زیاد**	**کم**
چشمه لنگان	**خیلی زیاد**	**1**	**متوسط**	**1.3**	**0%**	**زیاد**	**متوسط**
بهشت آباد	**خیلی زیاد**	**200**	**زیاد**	**1**	**3%**	**زیاد**	**نسبتا کم**
کوهرنگ ٣	**زیاد**	**4000**	**خیلی زیاد**	**1.5**	**4%**	**زیاد**	**نسبتا زیاد**
Max	**7**	**4000**	**7**	**1.5**	**5%**	**6**	**5**
Min	**6**	**1**	**4**	**1.0**	**0%**	**5**	**2**

گام اول) ابتدا عبارتهای کیفی را تبدیل به عدد می‌کنیم. برای این کار می‌توان از جدول ٦-٦ استفاده کرد.

جدول ٦-٦ معادل عددی عبارات بیانی

متغیر بیانی	متغیر عددی معادل
خیلی کم	١
کم	٢
نسبتا کم	٣
متوسط	٤
نسبتا زیاد	٥
زیاد	٦
خیلی زیاد	٧

گام دوم) نرمال سازی- برای نرمال سازی روشهای مختلفی ذکر گردیده که در زیر یکی از آنها را به کار می‌بندیم:

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} \dfrac{X_{ij}}{\underset{j}{Max}\, X_{ij}} & for \quad positive \quad criteria \\ \dfrac{\underset{j}{Min}\, X_{ij}}{X_{ij}} & for \quad negative \quad criteria \end{cases}$$

$$F_1 = \frac{\sum w_j \bar{x}_{ij}}{\sum w_j}$$

$$F_1 = \frac{6\times\frac{6}{7}+5\times\frac{1}{1}+2\times\frac{5}{7}+4\times\frac{1.4}{1.5}+4\times\frac{5}{5}+7\times\frac{5}{6}+3\times\frac{2}{2}}{6+5+2+4+4+7+3} = 0.908$$

$$F_2 = \frac{6\times\frac{7}{7}+5\times\frac{1}{1}+2\times\frac{4}{7}+4\times\frac{1.3}{1.5}+4\times\frac{0}{5}+7\times\frac{6}{6}+3\times\frac{2}{4}}{6+5+2+4+4+7+3} = 0.778$$

$$F_3 = \frac{6\times\frac{7}{7}+5\times\frac{1}{200}+2\times\frac{6}{7}+4\times\frac{1}{1.5}+4\times\frac{3}{5}+7\times\frac{6}{6}+3\times\frac{2}{3}}{6+5+2+4+4+7+3} = 0.703$$

$$F_4 = \frac{6\times\frac{6}{7}+5\times\frac{1}{4000}+2\times\frac{7}{7}+4\times\frac{1.5}{1.5}+4\times\frac{4}{5}+7\times\frac{6}{6}+3\times\frac{2}{5}}{6+5+2+4+4+7+3} = 0.727$$

بنابراین رتبه‌بندی نهایی طرحها را به صورت زیر داریم:

$$A_1 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_3$$

٤- برنامه‌ریزی سازشی

مبتنی براین روش گزینه‌ای که کمترین مقدار فاصله از آرمان را دارد گزینه برتر خواهد بود. حالت دیگری برای روش برنامه‌ریزی سازشی وجود دارد که در آن فاصله از یک نقطه نامطلوب محاسبه می‌شود. در آن حالت هرچه مقدار فاصله بیشتر باشد آن گزینه امتیاز بیشتری دارد. ساختار کلی این روش عبارت است از:

فرض کنیم چند تابع هدف، f_jداریم. یک نقطه آرمانی (نهایت هدف ما رسیدن به این نقطه است) و یک نقطه نا مطلوب (نهایت هدف ما دور شدن از این نقطه است)، تعریف می‌کنیم. فاصله هر گزینه را تا نقطه آرمانی یافته و آنها را L می‌نامیم. حال هر گزینه که امتیاز آن بیشتر (فاصله L کوتاهتر تا آرمان) داشت آنرا انتخاب می‌کنیم.

$$L = \left[\sum_{j=1}^{n} \left(w_j \frac{f_j^* - f_j}{f_j^* - f_{wj}} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

L: فاصله هر گزینه از نقطه آرمانی است.

f_j^*: مقدار آرمانی (مقدار بهینه از دید معیار jام)

f_j: عملکرد گزینه از دید معیار jام

f_{wj}: مقدار نامطلوب از دید معیار jام

w_j: وزن نسبی معیار jام

p: پارامتری که اهمیت فاصله را می‌رساند

n : تعداد معیارها است.

مبتنی براین روش، گزینه‌ای که کمترین مقدار فاصله، L از آرمان را دارد گزینه برتر خواهد بود. همانطور که ذکر شد حالت دیگری برای روش برنامه‌ریزی سازشی وجود دارد که در آن فاصله از یک نقطه نامطلوب محاسبه می‌شود. در آن حالت هرچه مقدار L بیشتر باشد آن گزینه امتیاز بیشتری دارد.

p عاملی است که حساسیّت تصمیم‌گیر به فاصله از نقطه آرمانی را، از دید هر یک از معیارها، بیان می‌دارد. با $p = ۱$ همه فاصله‌ها به‌اندازه وزن خود در نظر گرفته می‌شود و بر اساس $p = ۲$، فاصله بزرگتر اثر بزرگتر دارد. برای $p=\infty$ بزرگترین اختلاف مدنظر بوده و تنها آن مقدار اختلاف بزرگتر کمینه می‌شود. یکی از ایرادهای روش برنامه‌ریزی سازشی این است که راهکار مناسبی برای انتخاب عدد p ارایه نشده است.

مزایای مدل برنامه‌ریزی سازشی

۱- نرمال سازی را در داخل خود مدل دارد.

۲- فاصله از آرمان را در محاسبه گزینه برتر لحاظ می‌کند.

۳- وزن معیارها را لحاظ می‌کند.

٤- برای مقدار و بزرگی فاصله هر معیار از نقطه آرمانی اهمیت قائل می‌شود (لحاظ p).

۵- به عنوان یک ویژگی مهم تابع هدف روش برنامه‌ریزی سازشی را می‌توانیم در حالت تصمیم‌گیری با فضای پیوسته نیز استفاده نماییم.

۵- روش TOPSIS

این روش مبتنی براندازه‌گیری فاصله یک گزینه از مقدار آرمانی و نامطلوب می‌باشد. اگر مقدار عملکرد گزینه‌ها از دید معیارها با ماتریس $D=[x_{ij}]$ نشان داده شود. در این روش ابتدا مقادیر ماتریس عملکرد به روش زیر بی‌بعد می‌شود:

$$a_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}$$

سپس بردار وزن معیارها از تصمیم‌گیر دریافت شده در ماتریس a_{ij} ضرب می‌گردد:

$$v = [w_j \cdot a_{ij}],\ (i=1,2,...,m;\ j=1,2,...,n).$$

در گام بعدی فاصله کلی هر گزینه از راه حل آرمانی v_j^* و مقدار نامطلوب v_j^- به صورت زیر محاسبه میشود:

$$S_{i*} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^*)^2},\quad S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

اولویّت‌بندی نزولی گزینه‌ها بر اساس مقدار F_i (مقدار نزدیکی گزینه A_i به آرمان A^*) صورت می‌گیرد:

$$F_i = S_{i-} / (S_{i*} + S_{i-}), \quad 0 < F_i < 1$$

مزایای روش TOPSIS نسبت به روش CP

۱- مقدار p مشخص بوده و برابر ۲ است.

۲- هم فاصله از آرمان لحاظ می‌شود و هم فاصله از نقطه نا مطلوب.

مثال ٦-٨: در مطالعه Awasthi and Chauhan (2012) معیارهای جدول ٦-٧ برای انتخاب گزینه مناسب جهت حمل و نقل پایدار در یک شهر مطر بوده است.

جدول ٦-٧ معیارهای مطرح برای تصمیم گیری روی چند گزینه حمل و نقل شهری

Selected criteria for evaluating city logistics initiatives.

Id	Category/ criteria	Sub-criteria	Definition	Category
C1	Technical	Logistical efficiency	Delivery targets successfully met by the logistical organizations	B(↑)
C2	Social	Mobility	Facilitation of passenger travel and goods movement conditions inside cities	B(↑)
C3	Social	Accessibility	Ease of accessing delivery depots and customer locations	B(↑)
C4	Technical	Service quality	Measured in terms of customer satisfaction with the delivery service performed	B(↑)
C5	Technical	Loading factor	Capacity utilization of delivery vehicles	B(↑)
C6	Technical	Customer coverage	Number of customers served by the delivery service within given geographical region	B(↑)
C7	Social	Freeing of public space	Number of parking spaces freed from the delivery service	B(↑)
C8	Environmental	Energy conservation	Reduction in consumption of fossil fuel by transportation resources	B(↑)
C9	Technical	Trip effectiveness	Measured by reduction in number of trips, distance between trips, trip travel time, reliability of trips, etc.	B(↑)
C10	Economic	Revenues	Revenues generated from the delivery service	B(↑)
C11	Technical	Volume of freight handled	Amount of freight handled by the delivery service	B(↑)
C12	Social	Accidents	Accidents caused due to the delivery service	C(↓)
C14	Economic	Costs	Costs involved in delivery of goods to customers	C(↓)
C14	Environmental	Congestion	Traffic congestion generated due to freight/goods delivery vehicles and material handling activities	C(↓)
C15	Environmental	Air pollution	Air pollution (CO_2, NO_x, particulates) generated from delivery activities	C(↓)
C16	Environmental	Noise	Noise generated from urban goods vehicle movement	C(↓)

*Benefit (The higher the better).
Cost (The lower the better).

مقادیر ارزیابی چهار گزینه مطرح بر اساس این معیارها را می توان در مقاله مزبور مطالعه کرد. حال به کمک روش تاپسیس که محاسبات آن در جدول ٦-٨ آمده گزینه برتر A4>A2>A1>A3 انتخاب شده است.

جدول ٦-٨ محاسبات تاپسیس برای مساله حمل و نقل

	A1	**A2**	**A3**	**A4**
S_{i-}	0.494	0.513	0.489	0.532
S_{i*}	0.596	0.599	0.599	0.581
F_i	0.453	0.461	0.449	0.477

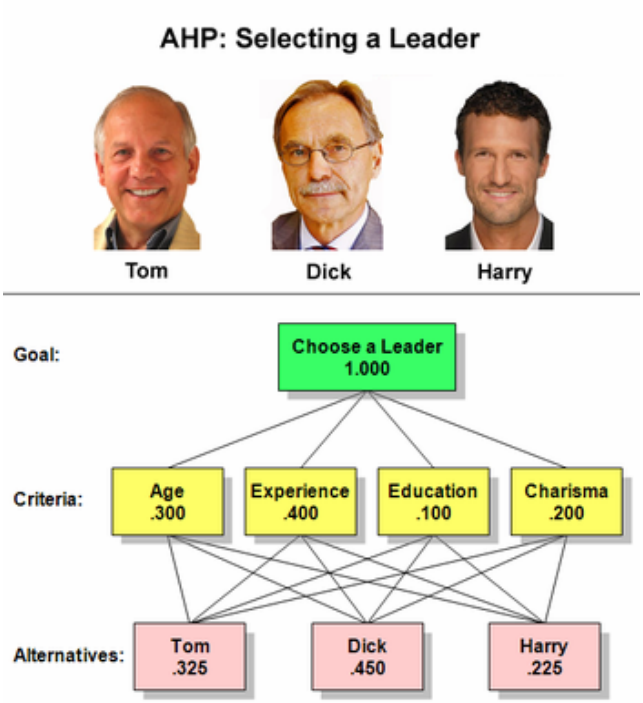
٦- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[1]

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی توسط Saaty در سال ۱۹۸۰ ارایه شده است. این روش دربردانده سه اصل مجزا است: ۱) اصل ساخت سلسله مراتب، ۲) اصل ایجاد ترجیحات و ۳) اصل سازگاری منطقی.

گام ۱- ساخت سلسله مراتب: از آنجایی که فکر انسان قادر به درک همزمان تمام عوامل تأثیرگذار و ارتباطات بین آنها نیست، بایستی سیستمهای پیچیده به ساختارهای ساده‌تر تجزیه شوند. در این روش، ساده‌سازی بوسیله یک فرآیند منطقی که در واقع ساخت سلسله مراتب است، انجام می‌شود. ساده‌ترین مدل سلسله مراتبی از سه سطح تشکیل شده است: اهداف اصلی، معیارها و گزینه‌های مسأله تصمیم‌گیری. در هر مسأله‌ای این امکان وجود دارد که ساختار سلسله مراتب پیچیده‌تر (سطوح بیشتر) شود.

برای ترسیم درخت سلسله مراتبی ابتدا تابع هدف را نوشته در سطر پایین آن معیارها و در سطر نهایی گزینه ها را رسم می نماییم. برای نمونه به دو مثال زیر توجه نمایید.

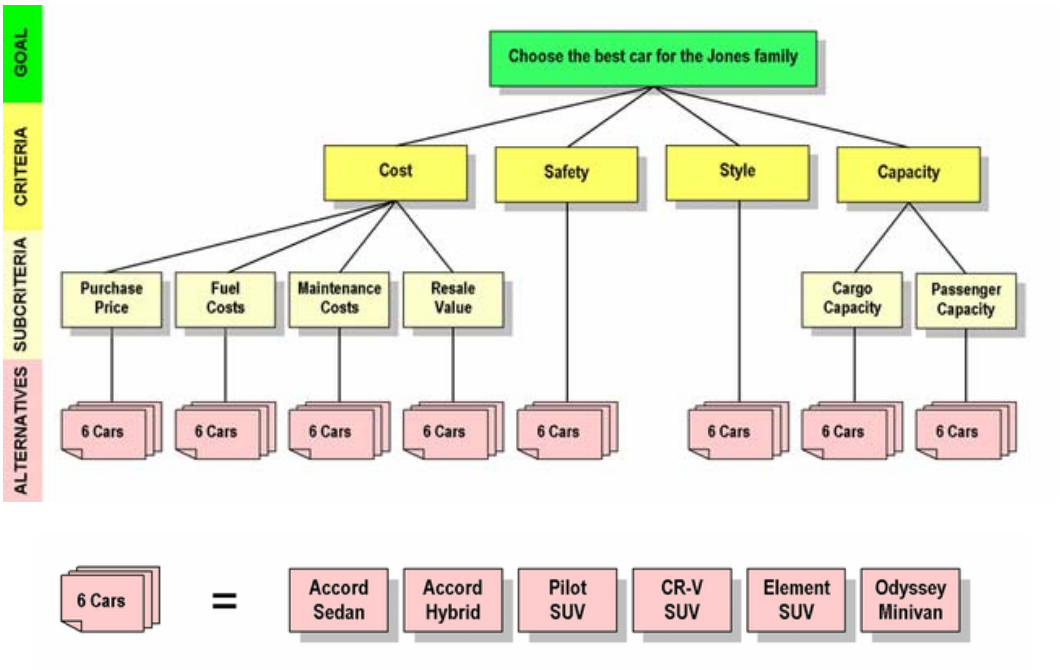
مثال ٦-۹: در شکل ٦-۳ یک نمونه از این درخت رسم شده است که مساله مورد بررسی در این مثال انتخاب یک مدیر مناسب برای یک طرح بوده است (Wikipedia, 2009).



شکل ٦- ۳ یک نمونه درخت سلسله مراتبی برای انتخاب مدیر طرح

[1]Analytic Hierarchy Process – AHP

مثال ٦-١٠: در شکل ٦-٤ درخت سلسله مراتبی برای انتخاب یک وسیله نقلیه مناسب برای خانواده مطـرح شده است:



شکل ٦- ٤ درخت سلسله مراتبی برای انتخاب وسیله نقلیه مناسب برای خانواده

گام ۲- ایجاد ترجیحات: در این روش عناصر همان سطح سلسله مراتب به صورت دودویی و با توجه به عناصر مربوطه در سطح بالاتر خود مقایسه می‌شوند تا ماتریسهای مقایسه‌های دودویی را تشکیل دهند. برای نشان دادن اهمیت نسبی یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، مقیاس مقایسه‌های دودویی معرفی شده است. این مقیاس ارزشهای ۱ تا ۹ را برای قضاوت در مورد هر جفت از عناصر مقایسه شده، تعریف می‌کند. برای هر معیار، یک ماتریس A با ابعاد $n\times n$، از مقایسه‌های دودویی تشکیل می‌شود. برای محاسبه اولویّت نسبی در بین n عنصر ماتریس A، بردار ویژه اصلی این ماتریس محاسبه و سپس مجذور آن برای بدست آوردن بردار اولویّت‌ها که بیان کننده ترجیحات در بین عناصر همان زیرگروه می‌باشد، نرمال می‌شود. برای بدست آوردن ترجیحات کلی در بین گزینه‌ها نیاز است که تمام ترجیحات محلی با یکدیگر جمع شوند. با این ایده امکان اولویّت‌بندی گزینه‌های گسسته و جدا از هم وجود دارد. نمونه یک ماتریس مقایسات زوجی در جدول ٦-٩ ارایه شده است.

جدول ٦-٩ نمونه یک مقایسه زوجی بین چند معیار از دید هدف

	Location	Salary	MS	Long
Location	1	1/5	1/3	1/2
Salary	5	1	2	4
MS	3	1/2	1	3
Long	2	1/4	1/3	1

گام ۳- بررسی سازگاری منطقی: در مقایسه زوجی عناصر بوسیله اطلاعات کمی‌و کیفی، ممکن است که تناقضی رخ دهد. در این روش، بردار ویژه اصلی یا λ_{max} در هر ماتریس مقایسات زوجی برای کنترل درجه تناقض و عدم همسانی محاسبه می‌شود. اگر تناقض بسیار بالا باشد نیاز به اصلاح مجدد مقایسه‌های زوجی وجود دارد.

با استفاده از نرم افزارExpertChoice که در سایت http://www.expertchoice.com موجود است تمام این مراحل به راحتی و به صورت کابردوست انجام می‌گیرد.

تمرین ٦-١: کدام گزینه سدسازی ارایه شده در جدول ٦-١٠ بهتر است؟ (به روش SAW و TOPSIS). برای کمّی‌سازی متغیرهای کیفی از جدول ٦-٦ استفاده نمائید.

جدول ٦-١٠ ماتریس تصمیم‌گیری تمرین ٦-٣

معیار	اثرات منفی محیط زیستی	نسبت سود به هزینه	مشارکت عمومی	پیشرفت طرح	اولویت مصرف
گزینه/ وزن معیار	نسبتا کم	متوسط	کم	زیاد	خیلی زیاد
سد ۱	کم	1.5	نسبتا زیاد	2	نسبتا زیاد
سد ۲	نسبتا زیاد	1.4	متوسط	4	خیلی زیاد
سد ۳	نسبتا زیاد	1.3	خیلی زیاد	3	زیاد

تمرین ٦-٢: یک مساله تصمیم‌گیری در زمینه مهندسی عمران مطرح کرده و درخت سلسه مراتبی را برای آن رسم نمایید.

تحقیق ٦-١: یک مساله تصمیم‌گیری در زمینه مهندسی عمران را با نرم‌افزار ExpertChoice مدل کرده و گزارش آن را ارایه نمایید.

٦-١ روشهای حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه

در مسائل تصمیم‌گیری پیوسته (چندهدفه)، تصمیم‌گیر بین چند گزینه انتخاب نمی‌کند، بلکه می‌خواهد گزینه‌ای با بیشترین مطلوبیت را طراحی کند. در این بخش به چند روش مطرح برای حل مساله می‌پردازیم.

حل مسئله بروش محدودیت‌دهی

توابع هدف مختلفی برای مساله در اختیار داریم که می‌خواهیم مقدار آنها را بیشینه کنیم. تعداد محدودیتها را m و تعداد توابع را n در نظر می‌گیریم.

$$\begin{aligned} &Max \quad Z_k(X),\ \ k=1,2,...,n \\ &s.t. \quad g_i(X) \le b_i,\ \ i=1,2,...,m \end{aligned}$$

حال از بین n تابع هدف، یکی را انتخاب کرده، و بقیه $(n\text{-}1)$ را تبدیل به محدودیت می‌کنیم. مقدار هر محدودیتی باید در حالت بیشینه‌سازی از یک حد آستانه‌ای بیشتر (یا در حالت کمینه‌سازی کمتر) باشد. این حد آستانه را تصمیم گیر تعریف می‌کند.

مثال ٦-١١: مدل بهینه‌سازی دو معیاره زیر را به روش محدودیت دهی حل نمایید. مقدار آستانه برای تابع هدف دوم حداقل ٤ باشد.

$$\begin{cases} \text{Max } f_1 = 3X_1 + 2X_2 \\ \text{and} \\ \text{Max } f_2 = 3X_1 + 5X_2 \\ s.t. \\ \quad X_1 + X_2 = 5 \\ \quad X_1 \le 4 \\ \quad X_2 \le 3 \\ \quad X_1, X_2 \ge 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Max } f_1 = 3X_1 + 2X_2 \\ \\ s.t. \\ \quad X_1 + X_2 = 5 \\ \quad X_1 \le 4 \\ \quad X_2 \le 3 \\ \quad 3X_1 + 5X_2 \ge 4 \\ \quad X_1, X_2 \ge 0 \end{cases}$$

حال مدل جدید یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه شده و حل آن به روش ترسیمی یا سیمپلکس ممکن است.

حل مساله به روش جمع وزنی ساده[1]

در این روش تابع های مختلف را در وزن و اهمیت نسبی آنها ضرب کرده سپس با هم جمع می‌کنیم تا یک تابع هدف داشته باشیم. ایراد روش جمع وزنی ساده این است که تنها معیارهای هم بعد را می‌پذیرد. توجه نمائید که $\sum w = 1$:

$$\begin{aligned} &Max \quad \sum_{j=1}^{n} w_j Z_j \\ &s.t. \\ &g_i(X) \le b_i \end{aligned}$$

مثال ٦-١٢: مساله بهینه‌سازی مثال ٦-١١ را به روش جمع وزنی ساده حل نمایید.

حل – در مثال ٦-١١ که دو هدف مطرح بود با لحاظ وزنهای زیر داریم:

$w_1 = 0.7$

[1] Simple Additive Weighting – SAW

$w_2 = 0.3$

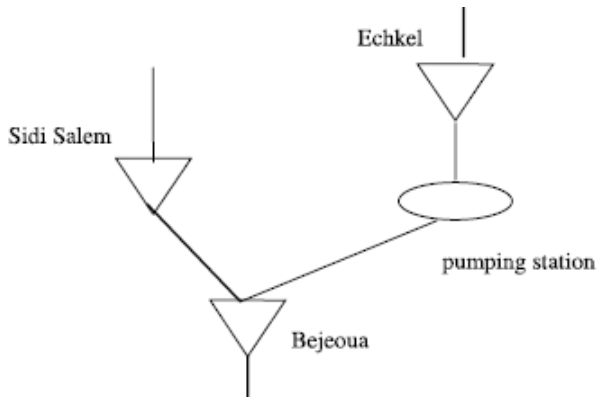
$$Max \quad 0.7(3X_1 + 2X_2) + 0.3(5X_1 + 3X_2)$$
$$s.t$$
$$X_1 + X_2 \geq 5$$
$$X_1 \leq 4$$
$$X_2 \leq 3$$
$$X_1, X_2 \geq 0$$

برنامه‌ریزی آرمانی[1]

این روش یکی از ابزارهای توانمند برای مدلسازی مسایل برنامه‌ریزی چندهدفه با دیدگاه فاصله از آرمان می‌باشد. در این روش ابتدا برای هر تابع هدف یک مقدار آرمانی، T_j را با سوال از تصمیم‌گیر یا مدیر تعریف می‌نماییم. سپس تابع هدف را با نوشتن رابطه تساوی به کمک مقادیر کمبود، D_j یا مازاد، E_j به محدودیت تبدیل می‌نماییم. بعد مجموع مقادیر کمبود یا مازاد توابع هدف از مقدار آرمانی آنها را کمینه می‌نماییم. بنابراین مدل ریاضی به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{minimize} \sum_j v_j D_j + w_j E_j$$
$$\text{subject to:}$$
$$g_i(X) = b_i \qquad i = 1, 2, \ldots, m$$
$$Z_j(X) = T_j^* - D_j + E_j$$

مقادیر v_j و w_j ضرایب اهمیت متغیرهای کمبود یا مازاد هستند. یک مطالعه موردی جالب در کاربرد این روش برای مهندسی عمران در شکل ٦-٥ ارایه است (Ben Abdelaziz and Sameh, 2001). در این مطالعه مساله بهره‌برداری همزمان سه مخزن با سه هدف عمده زیر مد نظر بوده است: کاهش اختلاف بین عرضه و تقاضای آب، کاهش شوری آب تامین شده و کاهش هزینه برق برای پمپاژ آب با لحاظ محدودیت های دارای عدم قطعیت.



شکل ٦-٥ مدیریت سه سد به صورت چندهدفه در کشور تونس

[1] Goal Programming

محدودیت این روش در تعیین مقادیر آرمانی و نیز اهمیت نسبی مقادیر کمبود و مازاد می‌باشد. البته لازم به ذکر است که مقادیر کمبود و مازاد اهداف مختلف بایستی قبل از افزودن به هم نرمال شوند تا مشکل ابعادی پیش نیاید.

برنامه‌ریزی سازشی[1]

ایده اولیه این روش توسط Zeleny در سال ۱۹۷۳ ارایه شده است. این روش با کم‌کردن فاصله بین عملکرد یک گزینه تا عملکرد یک نقطه آرمانی از دید معیارهای مختلف، باعث بهبود مطلوبیت تصمیم‌گیر می‌شود. حسن عمده این روش ساده بودن درک آن است. مطالعات زیادی در ادبیّات این روش را توسعه داده یا به کار بسته‌اند و فرمول آن در بخش برنامه ریزی گسسته توضیح داده شد.

مطالعه موردی ٦-۲: برنامه‌ریزی آب شهر زاهدان

موقعیت جغرافیایی و مرکزیت اداری و سیاسی شهر زاهدان باعث شده تا در مدت زمان کوتاهی، توسعه زیادی داشته‌باشد. به علاوه، تغییر اوضاع و شرایط سیاسی درکشور افغانستان باعث مهاجرت سیل عظیمی از افاغنه جویای کار به این شهر شده و جمعیت شهر به طور ناگهانی افزایش یافته است. چالشهای اساسی مدیریت آب شهر زاهدان عبارتند از:

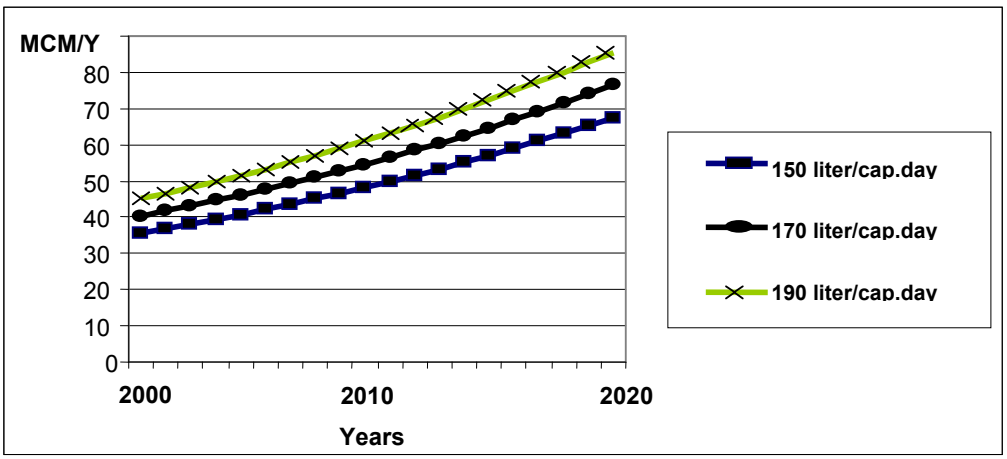
۱-کیفیت آب: در مورد کیفیت آب نگرانی‌های زیادی وجود دارد. به علت برداشت بی رویه از سفره، EC آب زیر زمینی به حدود ٤۰۰۰ میکروزیمنس و حتی بیشتر رسیده است. آزمایشی که در مورد آب سفره صورت گرفته حاکی است که غلظت فسفر در آب زیرزمینی سفره زاهدان از متوسط ۰/۰۲ به ۰/۱ میلیگرم در لیتر رسیده است. غلظت نیترات به حدود ۳۰۰ میلیگرم در لیتر در بعضی نقاط رسیده است. نتایج حاصل در مورد میزان آمونیوم و نیتریت دلالت بر تازه بودن آلودگی توسط فاضلاب خانگی دارد. به علت رعایت نکردن حریم چاهها و عدم بهسازی و حفاظت بهداشتی چاهها، ۳۳ درصد نمونه‌ها از نظرکلیفرم مجموع مثبت بوده و ۱۱ درصد نمونه‌ها دراین آزمایش دارای کلیفرم مدفوعی هستند.

۲-تغییرات شدید جمعیتی و افزایش نیاز به آب: شهر زاهدان بخاطر موقعیت خاص جغرافیایی، اجتماعی و اقتصادی دچار تغییرات شدید جمعیتی است که مسئله پیش‌بینی جمعیت این شهر را مشکل می سازد. علل این مسئله وجود متغیرهای غیر قطعی زیر است:

- نرخ رشد طبیعی جمعیت شهر بالاتر از نرخ رشد طبیعی کشور بوده و نحوه کاهش آن در آینده معلوم نمی‌باشد.
- پتانسیل مهاجرت داخلی به این شهر نامعلوم می‌باشد.
- علل مهاجرت خارجی به این شهر برونزا بوده و اغلب نامعلوم می‌باشد.
- مهاجرین خارجی با مشکل هویت رسمی مواجه بوده اند که کار سرشماری را با مشکل مواجه می کند.

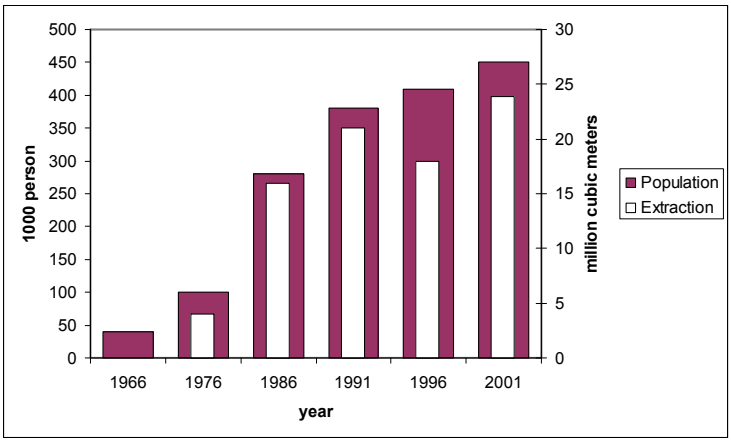
با مطالعه روندگذشته ورود مهاجرین از شهرهای اطراف به شهر زاهدان، می‌توان به ساختار برآوردی روند مهاجرت دست یافت. پیش بینی جمعیت مهاجرین نیازمند درک و شناخت علل مهاجرت میباشد. در شکل ٦-٦ پیش بینی نیاز آب شهر در سه سناریوی تقاضا آمده است.

[1] Compromise Programming



شکل ٦-٦ برآورد کل نیاز آب شهری در زاهدان بر حسب میلیون متر مکعب در ۲۰ سال آینده

علیرغم محدودیت برداشت از آب سفره زاهدان، استحصال از سفره و میزان جمعیت شهر زاهدان روند رو به فزونی داشته است. در شکل ٦-٧ شکاف بین این دو مشاهده می شود.



شکل ٦-٧ محدودیت برداشت از سفره زاهدان، و رشد فزاینده جمعیت شهر

۳-محدودیت منابع آبی: منطقه زاهدان از لحاظ منابع آبی از تنوع زیادی برخوردار نیست. میانگین بارندگی سی ساله در این شهر ۸۰ میلی متر است. به طور کلی منابع آب موجود و قابل دسترس در محدوده شهر زاهدان را به دو گروه بالفعل و بالقوه می توان تقسیم کرد. منابع آبی بالفعل آنهایی هستند که در حال حاضر بهره برداری از آنها در حال انجام است. این منابع عبارت اند از: سفره آب زیرزمینی دشت زاهدان، منابع آب چاه‌نیمه‌ها که درحال حاضر خط انتقال آب از چاه‌نیمه‌ها به زاهدان در حال بهره برداری است. چاههای آب شیرین در منطقه میرجاوه (لادیز) که انتقال آب شیرین از آنها برای مصارف شرب توسط تانکر صورت می گیرد، و روانابهای سطحی ناشی از سیلاب که از جنوب و جنوب غرب شهر زاهدان وارد آن می شوند (برای مهار این آبها یک مجموعه تأسیسات سیل بند و سفرههای تغذیه مصنوعی احداث شده که بزودی به بهره برداری خواهند رسید). منابع آبی بالقوه آنهایی هستند که در حال حاضر تحت بهره برداری سیستماتیک قرار ندارند ولیکن می توان آنها را به عنوان منابع آب شهر در آینده مورد مطالعه قرار داد. این منابع عبارتند از: سفره آب زیرزمینی دشت لادیز، پساب تصفیه شده شهر زاهدان و آب حاصل از صرفه‌جویی در مصرف. در واقع مدیریت تقاضا در این شهر می تواند منبع آب بالقوه ای در نظر گرفته شود. کاهش نشت آب از شبکه فرسوده نیز راهکار دیگری است.

٤-وضعیت نامناسب شبکه آب رسانی شهری: بیش از ٤٧٪ شبکه آب رسانی شهری، عمری بیش از ۳۰ سال دارد.

مدل تصمیم‌گیری چندهدفه در مدیریت آب شهری زاهدان

ابتدا لازم است که معیارهای مهم مدیریت آب شهری تعریف گردد. مبتنی بر دو فرم نظرخواهی، که برای ارزیابی نظرات تصمیم‌گیرندگان مسایل آب شهری زاهدان توزیع گردید، معیارها عبارت‌اند از: کاستن هزینه‌ها، تامین حداقل سرانه آب مصرفی, افزایش عرضه و کاستن نارضایتی مردم. هر کدام از این معیارها وابسته به یک سری زیرمعیارها هستند که می‌بایستی در داخل این معیارها ملاحظه گردد. نتایج بررسی فرم‌های نظرسنجی نشان می‌دهد که درمورد مسائل آب این شهر، تأمین آب کافی و مطمئن در دوره طرح، اولین معیار بوده و کمینه کردن مخاطرات اجتماعی و کیفی از معیار هزینه مهم تر است. نیز با عنایت به شدت توجه به تامین حداقل آب به این نتیجه میرسیم که تابع مطلوبیت پیوسته‌ای برای ساختار مطلوبیت نمی‌توان بدست آورد. زیرا تصمیم‌گیرندگان و مردم نسبت به مسأله تأمین آب حداقلی، حالت لغت نامه‌ای داشته و در واقع نمی‌توان یک تابع مطلوبیت پیوسته بین این سه معیار درست کرد. برای رفع این مشکل در معیار تامین آب، دو بخش مجزا در نظر گرفته شده است. برای اطلاع از جزییات این مطالعه به ضرغامی و ابریشم‌چی (۱۳۸۳) مراجعه شود.

۱- معیار هزینه: یکی از اهداف مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره آب شهری زاهدان, کاستن هزینه سالیانه تامین آب شهر از روشهای فوق‌الذکر است و به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min. } C = (1200G) + \left(\frac{60590}{Z+0.001} + 229.8\right)Z + \left(\frac{7860}{L+0.001} + 185\right)L + 600D + 366.6M + 526R \quad (۱)$$

C هزینه تامین آب شهر در هر سال بر حسب میلیون ریال

G حجم آب برداشتنی از سفره زیر زمینی زاهدان براساس میلیون متر مکعب در سال

Z حجم آب انتقالی از چاه‌نیمه (زابل)

L حجم آب انتقالی از لادیز

D جم آب صرفه‌جویی شده از بازسازی و نشت‌یابی

M حجم آب صرفه‌جویی شده بخاطر متره کردن

R حجم آب صرفه‌جویی شده بخاطر نصب وسایل کاهنده مصرف

۲-معیار عرضه آب بیشتر: این مساله یکی از اهداف شرکت آب و فاضلاب برای تامین رضایت عموم و افزایش درآمد در می‌باشد. کل این آب برای مصرف خانگی, عمومی و فضای سبز اختصاص می‌یابد و از رابطه (۲) بدست می آید:

$$\text{Max. } Q = (0.7 * [G + Z + L] + D + M + R) / POP \quad (۲)$$

ضرب ۰/۷ بخاطر فرض تلفات ۳۰٪ در شبکه فعلی است. البته مقدار Q باید از یک حداقلی برای هر نفر در سال بیشتر باشد.

۳- معیار مسایل اجتماعی: هر یک از روش‌های تهیه آب بر روی رضایت مردمی تأثیری مثبت یا منفی دارد. زیرمعیارهای این معیار عبارتند از:

- **کیفیت آب:** کیفیت آب انتقالی اهمیت ویژه ای در نوع استفاده و میزان رضایت مردم دارند. آب سفره زاهدان کیفیت پایئن‌تری نسبت به آبهای انتقالی دارد بنابراین از این جهت امتیاز کمتری دارد. سه کمیت عمده برای مقایسه کیفیت آبهای مختلف عبارتند از TDS و EC و تعداد کلیفرم در هر ۱۰۰ میلی لیتر. در

این تحقیق TDS معیار بوده است و واحد آن میلی گرم در لیتر است که در جدول ٦-١١ این مقادیر آورده شده است.

جدول ٦-١١ شوری آب منابع عرضه و آب صرفه‌جویی شده از مدیریت تقاضا

روش تامین آب	G	Z	L	D	M	R
شوری آب (میلی گرم در لیتر)	۳۵۰۰	۵۳۰	۱۰۸۱	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰

- **نارضایتی مردمی در مبدأ آبهای انتقالی:** بر اساس حجم آب انتقالی، نارضایتی‌هایی ایجاد می شود. در مورد لادیز این نارضایتی عامل عمده‌ای می‌باشد و جزو موانع اجرای طرح است. البته در صورت اجرای بند ذخیره سیلاب‌ها و آبخیزداری در لادیز این مشکل حل می‌گردد. در مورد چاه‌نیمه بخاطر نسبت ناچیز برداشت (۳۰ میلیون متر مکعب در سال) به کل حجم مرده و زنده چاه‌نیمه‌ها (در حدود ۷۰۰ میلیون متر مکعب) این نارضایتی اعمال نگردیده است.
- **حفظ منابع آبی برای نسل بعد:** هر چه یک روش مبتنی بر صرفه‌جویی‌باشد از این نظر امتیاز بیشتری دارد . انتقال آب از سایر حوضه‌ها مطلوبیت کمتری از این نظر دارد، زیرا با توجه به وضعیت منابع آب این منطقه، انتقال آب در آینده، هزینه‌های سنگین‌تری برای نسل بعد خواهد داشت. در این مطالعه برای دو خط انتقال مورد بررسی عدد (۱) داده شده است.
- **تخریب کمتر معابر:** برای نشت‌یابی و بازسازی نیاز به کانال‌کنی و بازسازی لوله یا نصب لوله جدید می‌باشد. این عامل علاوه بر اتلاف وقت برای تردد مردم، باعث نارضایتی‌های دیگری هم می شود. عدد ۱ در صورت وجود و عدد صفر در صورت عدم وجود نارضایتی در نظر گرفته می‌شود.

روش تعیین میزان کمی نارضایتی مردمی: برای این منظور ماتریسی مبتنی بر ایده ماتریس ارزیابی اثرات زیست‌محیطی را تشکیل می‌دهیم. برای رسیدن به وزن زیرمعیارهای H بعد از توزیع فرم نتایج جدول ٦-١٢ حاصل شده است. از آنجا که شرکت آب و فاضلاب تصمیم‌گیر بوده، لذا در اعمال مقادیر وزنهای زیرمعیارها، نظر این نهاد اعمال شده است.

جدول ٦-١٢ ماتریس ارزیابی اثرات نارضایتی مردمی از آب حاصله از روشهای مختلف بر حسب هر واحد آب

	G	Z	L	D	M	R	وزن زیرمعیار
شوری نسبی	۱/۰	۰/۰	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۰
نارضایتی نسل آینده	-	۱	۱	-	-	-	۱۰
نارضایتی در مبدأ	-	-	۱	-	-	-	۹
تخریب معابر	-	-	-	۱	-	-	۷
جمع اثرات وزین شده	h_1=۱۰	h_2 =۱۰	h_3=۲۱	h_4 =۱۰/۳	h_5=۳/۳	h_6=۳/۳	

بر مبنای سهم آب تأمینی از روشهای مختلف هر ۱ میلیون متر مکعب آب تهیه شده از هر روش به اندازه h_i نارضایتی اجتماعی در مدیریت آب این شهر دارد. مسلماً کمینه کردن H مطلوب است:

$$\text{Minimize } H = 10^* G + 10^* Z + 21^* L + 10.3^* D + 3.3^* M + 3.3^* R \quad (۳)$$

تعریف محدودیت‌ها و قیود مدل

آب قابل انتقال از چاه‌نیمه، حداکثر ۸۷۰ لیتر در ثانیه یا ۲۸ میلیون متر مکعب در سال است بنابراین:

$$0 \le Z \le 28 \quad (٤)$$

حداکثر آب قابل انتقال از لادیز ۳۰۰ لیتر در ثانیه که در حدود ۱۰ میلیون متر مکعب در سال است .مطالعات این طرح انجام شده و در صورت انجام آبخیزداری در مبدأ و تامین مالی قابل اجراست:

$$0 \le L \le 10 \quad (٥)$$

آب صرفه‌جویی شده ناشی از نشت‌یابی و بازسازی در یک برنامه کوتاه مدت نشت‌یابی و بازسازی شبکه، حداکثر به اندازه ۱۵٪ آب عرضه شده به شبکه می‌باشد. پس :

$$0 \le D \le 0.15^* (G + Z + L) \quad (٦)$$

با توجه به فصل مدیریت تقاضا ۱۹٪ خانوارها در شهرزاهدان انشعاب ندارند و در صورت نصب کنتور،۱۵٪ کاهش در مصرف مشترک ایجاد می شود. ضریب اعتماد پذیری ۵۰ ٪ برای قابلیت انجام متره دقیق روی کل عرضه (به علاوه آب بازیافتی بر اثر بازسازی و نشت‌یابی) فرض میشود:

$$0 \le M \le 0.15^*0.19^*0.5^*[0.7^*(G + Z + L) + D] \quad (۷)$$

نصب وسایل کاهنده مصرف طبق مطالعات فوق، ۱۰ ٪ در کاهش مصرف موثر خواهد بود. چون از میزان قابلیت نصب ونوع مصارفی که مورد کاهش قرار خواهد گرفت، اطلاع دقیقی نداریم, لذایک ضریب اعتماد پذیری,۵۰٪, که انجام تحلیل حساسیت در مورد آن لازم است, بکار برده میشود:

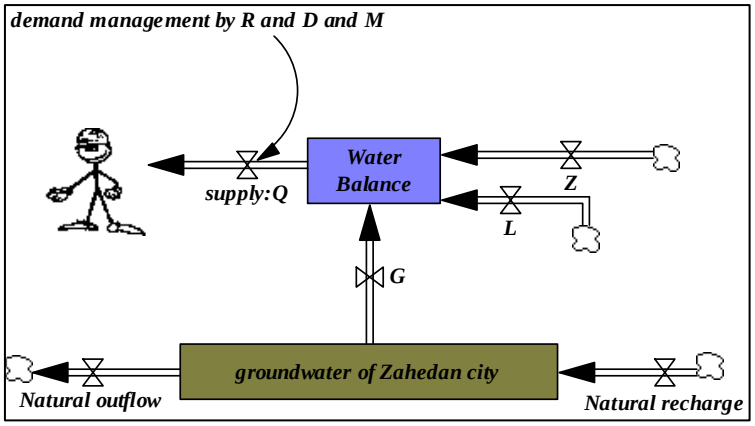
$$0 \le R \le 0.1^*0.5^*[0.7^*(G + Z + L) + D] \quad (۸)$$

میزان جمعیت شهر, در سال مورد بررسی می‌باشد.این مقدار برحسب میلیون نفر می‌باشد.

مطالعه بیلان آب سفره زاهدان برای برآورد برداشت از سفره

به طور متوسط به اندازه ۱۱/۵ میلیون متر مکعب در سال از طریق سیلابهای بالا دست, سفره تغذیه می شود. از طرف دیگر به اندازه ۳ میلیون متر مکعب در سال، از پایین دست سفره خارج می شود و توصیه می گردد که برای حفظ کیفیت آب سفره, این حجم خروجی, بخاطر برداشت بی رویه, کم نگردد. به میزان ۳ میلیون متر مکعب در سال, از طریق سیل بنداحداث شده شهر, سفره تغذیه مصنوعی می گردد(بطور میانگین). فرض میشود که ٦۰٪ از آب مصرفی شهر به صورت فاضلاب وارد سفره شود (با فرض ۳۰٪ $PL=$ نشت در شرایط فعلی شبکه و رسیدن ۳۰٪$GL=$ از این آب به سفره). در شکل ٦–۸ اجزای بیلان در سفره زاهدان رسم شده است. بنابراین قید محدودیت ناشی از بیلان بر روی G عبارتست از:

$$11.5+3-3+0.6^* [(1-PL)^*(G + Z + L) + D] \ge G - 0.3^* [PL^*(G + Z + L) - D] \quad (۹)$$



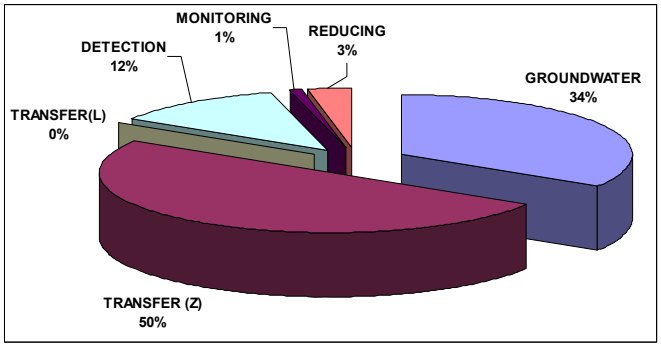
شکل ٦-٨ اجزای بیلان آب در شهر زاهدان

نتایج اجرای مدل و تحلیل آن

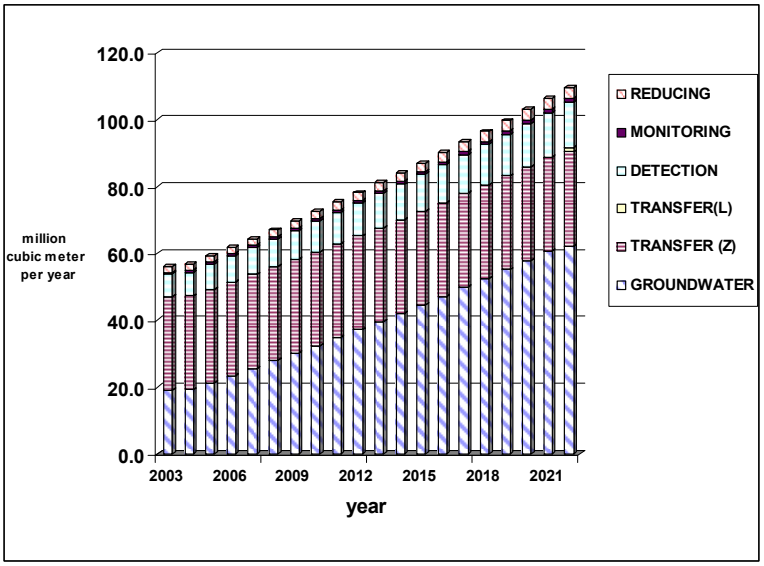
مدل تصمیم‌گیری در مدیریت آب شهر زاهدان درنرم افزار GAMS درحالت غیر خطی به روش Minos حل شده است. از آنجا که پارامترهای مختلفی جهت تحلیل حساسیت مورد بررسی قرارگرفته است, لذا برای تحلیل نتایج در ادامه، با ذکر سناریوهای مختلف نتایج حاصله, مورد بررسی قرار می گیرد. دستور بهینه در شکل ٦-٩ مربوط به سال پایه طرح (١٣٨٠) بوده، درشکل ٦-١٠ این دستور بهینه در طول دوره طرح (١٣٨٠ تا ١٤٠٠) بدست آمده است. نتایج مهم زیراز شکلهای مزبور، استنتاج میشوند:

١- متغیر D که بیانگر میزان صرفه‌جویی به خاطر اصلاح شبکه است, می‌تواند سهم قابل توجهی از تقاضا را برآورد کند.

٢- متغیرهای M و R (متره دقیق مصارف ونصب وسایل کاهنده مصرف) در طول دوره طرح و در شرایط مختلف اقتصادی بوده و درحد امکان فنی، سهم داشته اند.



شکل ٦-٩ برنامه بهینه برای میزان تامین آب از منابع مختلف در سال پایه طرح (١٣٨٠)



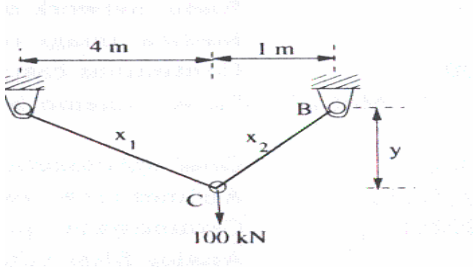
شکل ٦-١٠ برنامه بهینه برای میزان تامین آب از منابع مختلف در طول دوره طرح (١٣٨٠ الی ١٤٠٠)

٣- با توجه به سهم متغیر Z (انتقال از چاه‌نیمه) و L (انتقال از لادیز) در حالتهای مختلف، مشاهده می گردد که از دیدگاه شرکت آب و فاضلاب، اجرای طرح چاه‌نیمه، گزینه غالب ومقدم بوده و مطلوبیت بیشتری دارد. بنابراین به خاطر اجرای طرح چاه‌نیمه، در حال حاضر تصمیم درستی گرفته شده است.

٤- اگر سه روش D (بازسازی و اصلاح شبکه) و R (نصب وسائل کاهنده مصرف) و M (متره کردن) دراین شهر مورد توجه قرار نگیرند و روند موجود ادامه یابد, علاوه بر تبعات جانبی مانند شدیدتر شدن میزان نشت (افزایش پارامتر GL) اجرای زودتر طرح لادیز را باعث خواهد شد. مثلا"عدم اصلاح شبکه, اجرای طرح لادیز هشت سال, زودتر لازم خواهد بود .

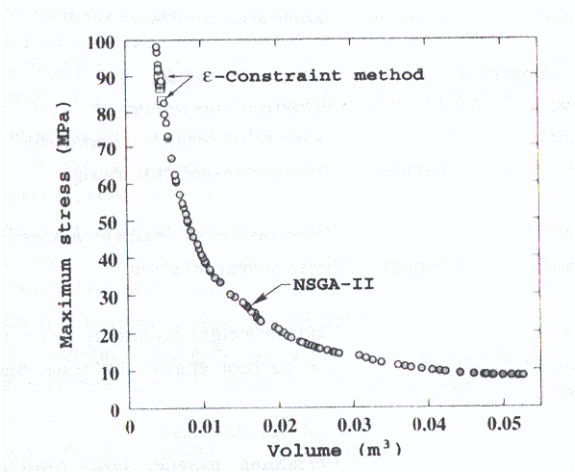
٥- متغیر GL، که میزان نفوذ آب نشتی از لوله به سفره آب زیرزمینی است، تغییر قابل توجهی در ساختارتصمیم ایجاد نمی‌کند. ولی تغییر PL که میزان و درصدکل نشت از شبکه است عامل تأثیر گذاری بر تصمیم بوده و باعث اعمال و امکان کاربرد بیشتر روش D (اصلاح شبکه) است.

تمرین٦-٣: مدل بهینه‌سازی دومعیاره را بنویسید که اولاً میزان آهن مورد استفاده در خرپای شکل ٦-١١ را بکاهد و ثانیاً تنش حداکثر موجود در اعضا کمینه شود. طول y بین ١ تا ٣ متر باشد و حداکثر تنش موجود نیز ١٠٠ مگا پاسکال باشد. دیگر متغیرهای تصمیم عبارتند از مساحت مقاطع دو عضو یعنی x_1, x_2 .



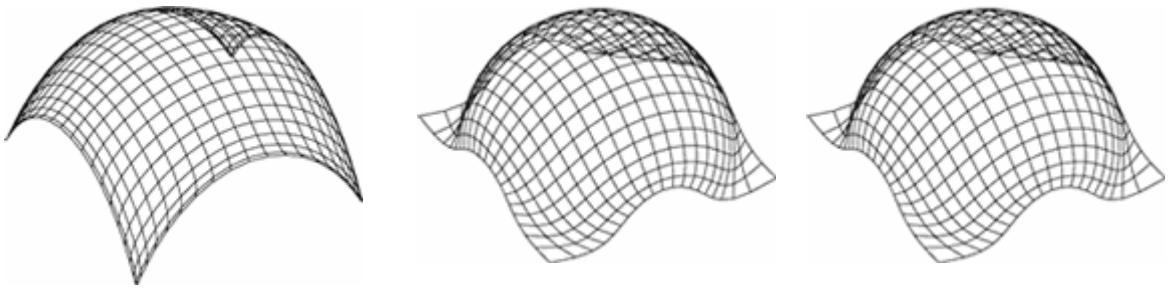
شکل ٦-١١ مساله طراحی خرپای دوعضوی

لازم به ذکر است که جوابهای حل این مساله بهینه‌سازی به کمک یک الگوریتم ژنتیک توسعه یافته در شکل ٦-١٢ ارایه شده است. جوابهای بهینه برای هر معیار بسته به این است که معیار دیگر چه مقداری داشته باشد. به چنین نقاط بهینه نقاط غیر مغلوب non-dominated یا نقاط بهینه پارتو Pareto نام می‌نهند. در واقع در فضای جوابهای ممکن، نقاط بهتری نسبت به این نقاط وجود ندارد.



شکل ٦-١٢ نقاط بهینه پارتو برای مساله خرپای دوعضوی (Deb, 2001)

نکته جالب توجه این است که بسته به وزن و اهمیت هر یک از معیارها (میزان آهن به کار رفته یا میزان تنش قابل قبول در اعضا) نقطه بهینه فرق می نماید. چنین منحنی‌هایی مشهور به منحنی توازن یا tradeoff هستند که در واقع حرکت در یک محور آن باعث بهبود یک معیار ولی در عوض خسارت و کمبود برای معیار دیگری می‌شود. نقش و وظیفه یک کارشناس خبره در مهندسی سیستمها ابتدا تهیه چنین منحنی‌هایی برای مساله مورد بررسی است و ثانیا انتخاب تصمیم نهایی به کمک مدیر و کارفرمای مساله تصمیم‌گیری. نمونه دیگر از وجود منحنی توازن در ساخت سازه های فضا کار در شکل ٦-١٣ ارایه شده است. در شکل الف هدف تنها گرد و کروی بودن فضا است. در شکل ب هدف تنها استقامت زیاد صفحه است. در شکل ج یک توازنی بین این دو هدف برقرار شده و طراحی نهایی صورت گرفته است (Kyoto, 2010).



الف ب ج

شکل ٦-١٣ طراحی یک سازه فضایی با دو هدف استقامت بیشتر و گرد بودن آن

فصل ۷- تصمیم‌گیری گروهی به روش انتخاب اجتماعی

از آنجا که هدف از سرمایه‌گذاری و صرف بودجه در طرح های عمرانی، تأمین نیازها و خواسته‌های متقاضیان مختلف می‌باشد، منافع ملّی ایجاب می‌کند که تعیین اولویت اجرای طرح‌ها برای تخصیص منابع لازم، بخصوص در شرایط وجود محدودیت، براساس نظرات ذینفعان متعدد انجام شود. در کشور ایران اجرای صدها طرح عمرانی مطرح می‌باشد که به دلایل زیر ضرورت مدیریت این طرح‌ها به خصوص در سطح حوضه آبریز مشخص می‌شود:

- تصمیم گیری بر اساس معیارهای انسانی، زیست محیطی و... نسبت به تصمیم گیری تک معیاره مالی (روش سنتی)،
- محدودیت منابع مالی برای تخصیص،
- جلوگیری از اتلاف فرصت های سرمایه گذاری به خاطر طولانی شدن فرایند حل اختلاف‌ها،
- جوابگویی به اعتراضات استان ها و سازمان های دولتی،
- لزوم مشارکت ذینفعان در تصمیم‌گیری‌ها.

یکی از مهمترین مسایل مطرح در انتخاب و توسعه مدلهای تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رسیدن به اهداف فوق، داشتن اطلاعات دقیق در مورد ارزیابی طرحها از دید معیارهای مختلف می‌باشد. ولی در اغلب مسایل واقعی این اطلاعات وجود نداشته و یا تهیه آنها بسیار مشکل و حساس است. لذا یکی از روشهایی که در این گونه مسایل کاربرد دارد روش انتخاب اجتماعی است که فقط نیازمند رتبه هر طرح از دید هر ذینفع بوده و در نهایت رتبه هر طرح را به صورت کلی ارایه می‌نماید. روشهای انتخاب اجتماعی در بسیاری از مسایل تصمیم‌گیری گروهی به کار رفته‌اند؛ هرچند که تمام شرایط و فرضیات مطرح شده توسط ارو (۱۹۵۱) را ارضا نمی‌کنند. در این فصل ابتدا روشهای مختلف و مطرح در انتخاب اجتماعی معرفی می‌گردند. سپس روشهای معرفی شده در یک مطالعه موردی واقعی به کاربسته می‌شود. البته باید توجه کرد که انتخاب یک روش موثر وابسته به خصوصیات مطالعه موردی است و نمی‌توان برای همه مسایل یک روش خاصی را به عنوان بهترین روش پیشنهاد کرد.

مساله مورد بررسی، اولویت‌بندی n گزینه مستقل از هم است که از دید m تصمیم‌گیر است. در اغلب مسائل واقعی به دست آوردن مقدار واقعی این ارزیابی‌ها خیلی مشکل بوده و یا عدم قطعیت زیادی در آنها وجود دارد. لذا یک راه‌حل این است که به جای مقادیر دقیق ارزیابی‌ها، تنها رتبه مقایسه‌ای آنها نسبت به همدیگر از دید تصمیم‌گیرها سوال شود که روش‌های انتخاب اجتماعی برای حل این‌گونه مسائل توسعه پیدا کرده‌اند. در ماتریس تصمیم‌گیری این مسائل، مولفه a_{ij} رتبه گزینه jام از دید تصمیم گیر i ام، می‌باشد.

اگر $a_{ij}=1$ باشد یعنی بهترین گزینه از دید تصمیم‌گیر i ام، گزینه jاست و اگر این مقدار ۲ باشد یعنی بعد از گزینه برتر گزینه jام بهترین گزینه است. در این بخش به بررسی سه روش انتخاب اجتماعی می پردازیم:

۱- روش رای اکثریت: این روش گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که دارای بیشترین تعداد انتخاب اول از سوی تصمیم گیرنده‌ها است، که به صورت زیر مدل می‌شود:

$$f(a_{ij}) = \begin{cases} 1 & if \quad a_{ij}=1 \\ 0 & if \quad otherwise \end{cases} \qquad (۱)$$

$$A_j = \sum_{i=1}^{m} f(a_{ij}) \qquad (۲)$$

A_j مشخص می کند که چند بار گزینه jام به عنوان گزینه اول انتخاب شده است. حال گزینه j^* که بزرگترین مقدار A_j را دارد به عنوان انتخاب اجتماعی شناخته می‌شود.

$$A_{j^*} = \max \{A_j\} \qquad (۳)$$

۲- روش شمارش بوردا[1]: این روش بر حسب مجموع رتبه های هر گزینه تصمیم گیری می کند. اگر فرض کنیم بدترین گزینه امتیاز صفر و بهترین گزینه امتیاز $n-1$ را بگیرد، با جمع امتیاز های هر گزینه می‌توان گزینه‌ای را که بیشترین امتیاز را دارد به عنوان انتخاب اجتماعی در نظر گرفت. اگر a_{ij} یک عنصر جدول رتبه‌بندی باشد آنگاه:

$$g(a_{ij}) = n - a_{ij} \qquad (٤)$$

$$B_j = \sum_{i=1}^{m} g(a_{ij}) \qquad (٥)$$

و گزینه j^* با بزرگترین مقدار B_j، انتخاب برتر است.

$$B_{j^*} = \max\{B_j\} \qquad (٦)$$

توجه داشته باشید که برای هر گزینه داریم:

$$B_j = \sum_{i=1}^{m} g(a_{ij}) = \sum_{i=1}^{m} (n - a_{ij}) = nm - \sum_{i=1}^{m} a_{ij} \qquad (٧)$$

بنابراین یک رویه دیگر این است که برای هر گزینه، مقادیر a_{ij} را از دید تمام تصمیم‌گیران با هم جمع کنیم و گزینه ای که کمترین مجموع را دارد انتخاب کنیم.

۳- روش دیکتاتوری: در این روش یکی از افراد به عنوان دیکتاتور انتخاب شده و گزینه ای که از نظر دیکتاتور ترجیح داده می‌شود، انتخاب برتر است. به عبارت دیگر اگر تصمیم‌گیر i^* ام دیکتاتور باشد، گزینه j^* ام انتخاب برتر است اگر و تنها اگر:

[1] Borda

$$a_{i^* j^*} = 1 \qquad (۸)$$

مثال۷-۱: در شمال ایالت آریزونا برای حفاظت از جنگل چهـار روش مختلـف کنترلـی وجـود دارد. شـش گروه از ذینفعان روی این چهار روش مختلف نظرات خود را به صورت رتبه‌بندی شده در جدول ۷-۱ ارایه داده‌اند (d'Angelo et al. 1998). گزینه برتر را به روشهای سه گانه انتخاب اجتماعی معرفی نمایید.

جدول ۷-۱ ماتریس تصمیم گیری گروهی برای مساله مدیریت جنگل در شمال آریزونا

	تصمیم گیران	گزینه ۱- برش کامل درخت‌ها	گزینه ۲- برش درخت‌ها در نوارهای موازی	گزینه ۳- هرس درختها	گزینه ٤- کنترل درختها
۱	آب بران	۱	۲	۳	٤
۲	طرفداران حیات وحش	٤	۲	۱	۳
۳	دامداران	۱	۲	۳	٤
٤	کارخانه های تولید چوب	۳	٤	۲	۱
٥	طرفداران محیط زیست	٤	۳	۲	۱
٦	مدیران منطقه	٤	۲	۳	۱

حل- به کمک روش رای اکثریت امتیاز گزینه‌ها به این صورت است $A_1=2, A_2=0, A_3=1$ and $A_4=3$

پس گزینه چهارم برتر است. با کمک روش بوردا امتیاز گزینه های چهارگانه به صورت زیر حاصل می شود:

$$B_1=7, B_2=9, B_3=10 \text{ and } B_4=10$$

بنابراین یک گره در انتخاب گزینه برتر وجود دارد، زیرا گزینه های ۳ و ٤ هر دو امتیاز برابر دارند. در روش دیکتاتوری مهم انتخاب ذینفع با قدرت سیاسی بیشتر است. اگر مدیران (ذینفع ششم) رفتار دیکتاتوری داشته باشند و سایر افراد را در تصمیم‌گیری مشارکت ندهند گزینه چهارم برتر خواهد بود.

تمرین۷-۱: در تقسیم منافع دریای خزر بین ٥ کشور ساحلی آن ٥ سناریو مطرح است. این سناریوها از دید هر یک از ذینفعان رتبه‌بندی شده و در جدول زیر نمایش داده شده است. به کمک سه روش مطـرح گزینـه برتر گروه را معرفی نمایید.

جدول ۷-۲ ماتریس رتبه پنج سناریوی مطرح برای تقسیم منافع دریای خزر (Sheikhmohammady et al. 2008)

ذینفعان	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
DM1	1	3	2	5	4
DM2	1	4	5	3	2
DM3	5	3	1	2	4
DM4	5	2	4	1	3
DM5	4	2	5	1	3

تمرین ۷-۲ یک روش مهم دیگر برای حل مسایل حل اختلاف روش ورشکستگی یا Bankruptcy است. لطفا در مورد این روش و کاربرد آن در مهندسی عمران تحقیق کرده و در صورت تمایل در کلاس ارایه نمائید.

فصل ۸- بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت

دلایل ایجاد عدم‌قطعیت[1] در مدلسازی مسایل عمرانی متعدد هستند. بعضی از آنها عبارتند از:

- عدم اطلاع کافی: ما اطلاع دقیق از چرخه عوامل در حرکت آب و باد و... نداریم.
- ضعف مدلسازی: توانایی ریاضی کافی نداریم یا مدلهای دقیق را نمی‌توانیم حل کنیم لذا مدلهای ساده‌تری استفاده می‌کنیم که در آنها عدم قطعیت وجود دارند.

لذا برای مواجهه با عدم قطعیت دو رویکرد ریاضی متفاوت را می‌توان در پیش گرفت:

- عدم قطعیت تصادفی[2]

بیشتر در مسائل فنی و طبیعی رخ می‌دهد. به عنوان مثال عبارت "با احتمال ۷۰٪ این خاک مقاومت کافی را خواهد داشت." از این نمونه است.

- عدم قطعیت فازی[3]

این حالت بیشتر در رفتارهای انسانی بوفور بوقوع می‌پیوندد؛ که در آن ابهام[4] وجود دارد. بطور مثال عبارت "هوا نسبتا گرم است" بیان یک ابهام است چون معیاری از گرمی هوا در اختیار شنونده قرار نمی‌دهد.

مثال۸-۱: در مورد یک حوضه آبریز مثالی از عدم قطعیت وجود تغییر اقلیم[5] است. ممکن است نحوه بارش و مقدار آن در ۳۰ -۴۰ ساله آتی در یک حوزه آبریز عوض شود که گازهای گلخانه ای و یا تغییر کاربری اراضی می‌توانند عامل اصلی این تغییرات باشند. حال بایستی مدل بارش – رواناب حوضه را با لحاظ عدم قطعیت‌ها بدست آوریم.

یک راه حل مهم برای حل مدلهای تصمیم‌گیری تحت عدم‌قطعیت شبیه سازی تصادفی آنها است. برای اینکار اعداد تصادفی را برای متغیرهای غیرقطعی تولید کرده و سپس مقدار مورد انتظار، $E(F)$ و واریانس، $Var(F)$ امتیاز هر متغیر تصمیم را بدست می‌آوریم. در تئوری اقتصاد ریاضی ثابت شده که تابع مطلوبیت

[1] Uncertainty
[2] Stochastic
[3] Fuzzy
[4] Vagueness
[5] Climate Change

یک تصمیم‌گیر در شرایط عدم‌قطعیّت هم به میزان انتظاری امتیاز یک گزینه و هم به واریانس آن وابسته است. ایده اولیه این مطلب مبتنی بر مطالعه Markowitz (1959) ارایه شده است. در این قسمت مبتنی بر دیدگاه فوق، یک سنجه ترکیبی برای امتیاز هر گزینه ارایه می‌شود:

$$F^* = E(F) - \beta Var(F), \qquad (۱)$$

β یک پارامتر مثبتی است که میزان اهمیت واریانس را می‌رساند. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد نشانگر حساسیّت تصمیم‌گیر نسبت به ریسک است. گزینه j گزینه غالب در تصمیم‌گیری خواهد بود اگر به ازای هر گزینه k داشته باشیم $F_j^* \geq F_k^*$ که $k \neq j$ و m تعداد گزینه‌ها است.

بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت

برای حل مسائل بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت راه حلهای مختلفی وجود دارد که یکی از آنها استفاده از قیود شانسی است تا مساله بهینه‌سازی به حالت قطعی تبدیل شود.

قیود شانسی[۱]

فرض می‌کنیم در رودخانه ای دبی Q جریان دارد و سه بنگاه اقتصادی در اطراف رودخانه قرار دارد. تابع هدف شامل کل سود حاصل از مقدار آبی است که به هر سه بنگاه اقتصادی می‌رسد.

$$Max \quad B_1(x_1) + B_2(x_2) + B_3(x_3)$$
$$s.t.$$
$$x_1 + x_2 + x_3 \leq Q$$

اگر از مقدار دقیق دبی اطلاع نداشته باشیم تکلیف چیست؟

گام اول – استخراج توزیع آماری متغیر تصادفی از داده‌های تاریخی؛ به عنوان مثال: توزیع یکنواخت، توزیع نمائی، توزیع نرمال.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$$

در کتابهای متداول آمار جداولی برای عدد z ترسیم شده که با استفاده از آن می‌توان مقدار متناسب را استخراج کرد:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

[1] Chance Constraint

گام دوم – نوشتن قید تصادفی بصورت غیر تصادفی

$$X_1 + X_2 + X_3 \le Q$$
$$\downarrow$$
$$P\left(X_1 + X_2 + X_3 \le Q\right) \ge q$$
$$\downarrow$$
$$\frac{(X_1 + X_2 + X_3) - Q}{\sigma_Q} \le z^{1-q}$$

مثال ۸-۲: اگر توزیع دبی نرمال باشد ومیانگین دبی برابر۲ واحد و انحراف معیار آن ۱ واحد باشد. معادل قطعی محدودیت زیر را بنویسید.

$$P((X_1 + 2X_2 + 4X_3) \le Q) \ge 0.9$$
$$P(\frac{(X_1 + 2X_2 + 4X_3) - 2}{1} \le \frac{Q - 2}{1}) \ge 0.9$$
$$\frac{X_1 + 2X_2 + 4X_3 - 2}{1} \le z^{0.1}$$

$z^{0.1}$: عددی از جدول است که احتمال رخ دادن کمتر از آن ۱۰٪ باشد.

$$\frac{X_1 + 2X_2 + 4X_3 - 2}{1} \le -1.28$$
$$X_1 + 2X_2 + 4X_3 \le 0.72$$

بنابراین بخاطر پیروی از تابع توزیع نرمال، عدد استاندارد را از جدول استخراج کردیم.

فصل ۹- شبیه سازی

بهینه‌سازی یک سیستم در تلاش برای تشخیص "بایدها و نبایدها" می‌باشد در حالی که شبیه‌سازی[1] یک سیستم ناظر به "هستها و نیستها" است. یعنی رفتار یک سیستم در برابر ورودیهای مختلف معلوم می‌شود.

۹-۱ شبیه سازی با استفاده از تحلیل اوج متوالی[2]

در این روش به کمک قانون پیوستگی رفتار مخزن سد بررسی شده و می توان حجم حداقل مورد نیاز در طراحی آن را بدست آورد. در مثال زیر نحوه استفاده از این روش نشان داده می‌شود.

مثال۹-۱: یک سد چه حجمی‌داشته باشد تا بتواند تقاضای آب را در هر بازه زمانی کفایت نماید. از فرمول شبیه سازی زیر معروف به تحلیل اوج متوالی استفاده می‌کنیم. واحدها بر حسب میلیون متر مکعب می‌باشد.

$K_t = R_t - Q_t + K_{t-1}$ if positive,

$= 0$ otherwise

K_t حجم آب در سد در آخر ماه t، Q_t حجم آب ورودی به سد، R_t حجم آب خروجی از سد (که برابر تقاضا یعنی ۲/۵ میلیون مترمکعب در ماه) فرض می‌شود. ابتدا جدولی را به صورت جدول ۹-۱ تشکیل می‌دهیم.

جدول ۹-۱ فرایند شبیه سازی برای تعیین حجم مورد نیاز یک سد

Time (month)	$(R_t$	$-Q_t$	$+K_{t-1})^+$	$=K_t$
1	2.5	3	0	0
2	2.5	4	0	0
3	2.5	2	0	0.5
4	2.5	1	0.5	2
5	2.5	5	2	0
6	2.5	7	0	0
7	2.5	2	0	0.5
8	2.5	0	0.5	3
9	2.5	1	3	4.5
10	2.5	3	4.5	4
11	2.5	2	4	4.5=max
12	2.5	4	4.5	3

[1] Simulation
[2] Sequent Peak Analysis

بنابراین حجم لازم برای سد ٤/٥ میلیون متر مکعب می‌باشد.

۹-۲ شبیه‌سازی مبتنی بر تئوری حد مرکزی[1]

برای شبیه‌سازی تصادفی نیازمند تولید اعداد تصادفی هستیم. برای اینکار از ایده مطرح در تئوری حد مرکزی استفاده می‌نماییم. در صورت میانگین‌گیری از یک متغیر تصادفی (با هر توزیع فراوانی که داشته باشد)، متغیر تصادفی جدید $\overline{X}$، از توزیع نرمال تبعیت می‌کند؛ بدون توجه به اینکه خود متغیر تصادفی، X از چه نوع توزیعی تبعیت می‌کرد. (البته به شرط اینکه n یک عدد بزرگ باشد.) حال با توجه به این نکته اعداد تصادفی تولید شده در صورتی که $n=$ ۱۲ توسط فرمول زیر از توزیع نرمال تبعیت خواهند کرد:

$$x = \mu + \left(\sum_{i=1}^{12} u_i - 6 \right) \cdot \sigma$$

μ : میانگین داده‌های اولیه است.

σ: انحراف معیار داده‌های اولیه است.

u_i: اعداد تصادفی بین صفر و یک می‌باشند.

۹-۳ شبیه سازی با کمک علم پویایی سیستم‌ها[2]

سیستم پویا یک مدل شی‌گرا برای شبیه سازی است که جهت مطالعه رفتار یک سیستم پیچیده توسعه یافته است. این متدولوژی توسط فارستر در ۱۹٦۱ توسعه داده شد و در طول دهه های گذشته مورد اصلاح قرار گرفته و ابتدا در مدیریت صنایع و تجارت مورد بهره برداری واقع گردید. از آن پس دایره و کاربرد این روش به مسایل متنوعی نظیر اقتصاد، ارتقای کیفی در همکاری ها و برنامه‌ریزی در مهندسی عمران گسترش یافت (Sterman, 2000).

مدل شی گرا، یک راه جدید تفکر درباره مسائل با استفاده از مدل های سازمان یافته تصورات دنیای واقعی اطراف است، که به عنوان یک روش توانمند برای مدیریت شناخته شده است. با جدا نمودن سؤالات در مورد سیاستگذاری از اطلاعات، مدل شی گرا نتایج را به صورت عملکرد شفاف برای تمامی طرفهای مرتبط در مدیریت منابع در می آورد. روش پیشنهادی، قابل انعطاف، شفاف، و امکان ارتباط با ذینفعان در مراحل تصمیم گیری را نیز فراهم می آورد.

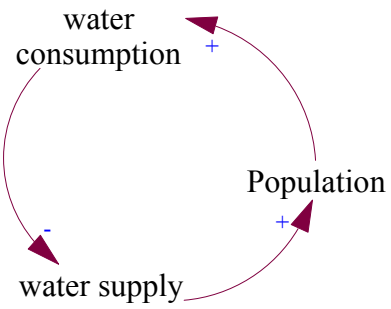
[1] Central Limit Theorem
[2] System Dynamics

لازمه داشتن رویکرد دینامیک در بررسی یک سیستم، در نظر گرفتن تعاملات و بازخورهای درون سیستم می باشد. از این رو، یک مدل مفهومی سیستمیک از مشخصه های نحوه تغییرات ذخایر و جریانها نسبت به اجزای دیگر سیستم از جمله کم آبی تهیه شده است که درآن تعاملات بین بخشهای مختلف اقتصادی، اجتماعی و نیز عکس العمل افراد به نمایش درآمده است. در ادبیات تفکر سیستمیک برای نمایش تعاملات و بازخورهای میان اجزا درون سیستم از ابزاری موسوم به حلقه های علت و معلولی استفاده می شود (Bagheri and Hjorth, 2007; Floyd, 2008). جوهر اصلی تفکر سیستمیک تغییر در نوع نگرش به مسأله است. در حقیقت برای داشتن یک تفکرسیستمیک باید موارد زیر را در نظر گرفت:

- مشاهده و درک روابط درونی پدیده ها بجای روابط خطی علت و معلولی
- شناخت فرآیند تغییر در سیستم بجای اقدام فوری و عاجل

آغاز تغییر در نگرش و بروز تفکر سیستمیک، تمرین در شناخت مفهوم" بازخور "در سیستمهاست (Senge, 1990).

مدل شی گرا یک روش مناسب برای اعمال سیستم فکری است. مسائل برنامه ریزی پیچیده منابع آب وابستگی زیادی به تفکر سیستمی دارد که مدل شی گرا به عنوان ابزاری توانمند برای تولید دانسته ها توسط عملیات مدل فکری، طراحی، مقایسه و حل آن است. از ابزارهای متعددی برای انجام روش مدل شی گرا استفاده شده است. مدلهای کامپیوتری نظیر Powersim, Vensim, Simile, Dynamo, Stella و دیگر مدلها کمک به اجرای این عملیات می نمایند. شبیه‌سازی دینامیکی ابزار بسیار مناسبی است برای ارائه مدلهای ذهنی که توسط تفکر سیستمی توسعه داده شده، خصوصاً ابزاری که دارای ساختار توالی میباشند. ذخایر (Stocks) و جریان (Flows) اصول ساختاری چارچوب این مدل است. ذخایر عبارت است از مواد و جریان پارامتر یا عمل است. ذخایر نمایانگر تجمع و به عنوان منشاء می باشند. آنها می توانند به عنوان محدودیتها نیز عمل نمایند. جریان ها از اجزاء ذخایر هستند که یکی بدون دیگری وجود نخواهد داشت. اگر چیزی تجمع یابد (مانند آب در مخزن)، این تجمع می بایستی منجر به یک فعالیتی بشود، (جریان ورودی به مخزن). ذخایر و جریان ها تشکیل دهنده حداقل ساختار برای تعریف یک دینامیک می باشند. دو عنصر پایه ای دیگر این ساختار تبدیل کننده ها (Converter) و اتصالات (Connector) می باشند. تبدیل کننده ها ورودی را به خروجی تبدیل می نمایند. آنها می توانند نماینده اطلاعات یا مقادیر مواد باشند. اتصالات (Connectors) ذخایر را به تبدیل کننده ها، ذخایر را به جریان های تنظیم کننده و تبدیل کننده ها را به سایر تبدیل کننده ها متصل می نماید. آنها مقادیر عددی نمی گیرند؛ بلکه آنها را انتقال می دهند. در شکل ۹-۱ می توان نمونه ای از مدل پویایی از تاثیر جمعیت بر ذخایر آب را مشاهده کرد.



شکل ۹-۱ تفکر سیستمیک از ارتباط منابع آب و سطح زیرکشت

این حلقه بیانگر رابطه علت و معلولی بین جمعیت و مقدار ذخایر آب است که نشان می دهد افزایش جمعیت و به تبع آن بالا رفتن میزان مصرف از عوامل کاهش میزان ذخیره، افزایش کمبود آب و کاهش امنیت آبی است.

توانایی ویژه مدل سازی توسط پویایی سیستم ها کشف و رسم فرآیندهای بازخوردی می باشد. بازخورد فرایندی است که در واقع یک تغییر در یک جزء را به سایر اجزای دیگر سیستم هشدار می دهد و به واقع بر روی اجزای اصلی سیستم اثر می گذارد. بازخورد یکی از اجزای اصلی در ایجاد پیچیدگی و تطابق سیستم ها می باشد. بازخورد در سیستم های پیچیده تشکیل دهنده حلقه های تقویتی و تعادلی می باشد. حلقه های بازخوردی منفی در جهت تعادل در سیستم و تعدیل تغییرات نقش ایفا می نمایند. حلقه های مثبت می توانند یک واقعه کوچک را تا زمانی که یک حادثه عظیم سیستمیک به وقوع بپیوندد پی در پی تقویت کنند. در واقع بازخور، فرایندی است که طی آن یک سیگنال از زنجیره ای از روابط علّی عبور می کند تا اینکه مجددا بر خودش تاثیر بگذارد. دو نوع بازخور وجود دارد:

- بازخور مثبت (Positive Feedback): افزایش(کاهش) در یک متغیر، بعد از یک تأخیر باعث افزایش (کاهش) همان متغیر می شود.
- بازخور منفی (Negative Feedback): افزایش(کاهش) در یک متغیر، بعد از یک تأخیر باعث کاهش (افزایش) همان متغیر می شود.

۹-۳-۱ الگوهای سیستمی (Archetypes)

الگوهای سیستمی خصوصیات رفتاری متعارف را در سازمان ها توصیف می کند. به عنوان ابزار تشخیص، بینشی را درون ساختار های اساسی که از آنها رفتار در طول زمان و حوادث محتاطانه پدید می‌آیند فراهم میسازد. به عنوان ابزار عطف کننده به آینده، به مدیران در مورد عواقب حوادث غیر منتظره در آینده هشدار می دهد. در مجموع آنها مدیران را به در نظر گرفتن شایستگی راه حل های بنیادی توسط قرار دادن زمان به عنوان متغیر واضح در تصمیم گیری ها، دعوت می کنند.

الگوهای سیستم، ابزار های بسیار موثری برای به دست آوردن بینشی در داخل الگوی رفتاری هستند که خودشان بازتاب ساختار اساسی سیستم مورد مطالعه هستند. طرح اصلی به دو طریق، تشخیص و با معطوف به آینده به کار می روند. به طور تشخیصی الگوی سیستم می تواند به مدیران در تشخیص الگوهای رفتاری که قبلا در سازمانشان وجود داشته اند کمک کنند. آنها به عنوان وسیله ای برای به دست آوردن بینشی درون ساختار سیستم اساسی که از آن رفتار طرح اصلی به وجود می آید محسوب می شوند. این متعارف ترین استفاده از الگوی سیستم است.

الگوهای سیستم ابزار موثری برای شروع به پاسخ گویی به این سوال هستند که، چرا ما شاهد مشکلات مشابه در طول زمان هستیم؟ الگوهای سیستم همچنین با نگاه به آینده برای طرح پردازی مفید هستند. اگر مدیران به این مسئله پی ببرند می توانند قبل از این که تغییرات منفی در ساختار سازمان جای بگیرند، چاره‌ای بیاندیشند (Braun, 2002).

عموما ده الگو به عنوان به وجود آورنده مجموعه‌ای از الگوهای رفتاری در سیستم ها شناخته شده است:

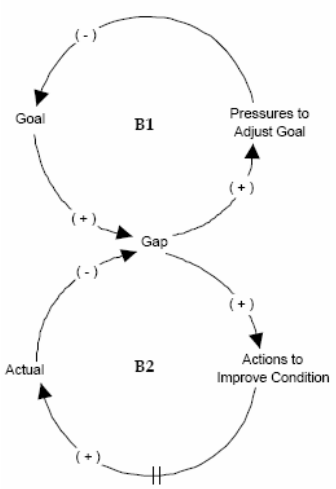
- محدودیت‌های رشد (Limits to Growth)
- تعویض بار مسئولیت (Shifting the Burden)
- اهداف در حال فرسایش (Eroding Goals)
- صعود (Escalation)
- موفقیت برای موفق (Success to the Successful)
- مصیبت عوام (Tragedy of the Commons)
- راه حل هایی که شکست می خورند (Fixes that Fail)
- رشد و شکست در سرمایه گذاری (Growth and Underinvestment)
- مخالفان تصادفی (Accidental Adversaries)
- اصل جاذبیت (Attractiveness Principle)

در این تحقیق با الگوهای"اهداف در حال فرسایش"، "موفقیت برای موفق" و "راه حل هایی که شکست می خورند" روبرو هستیم که در ادامه مطلب در توضیحات مربوط به مکانیزم ها بیشتر توضیح داده خواهند شد.

۱) اهداف در حال فرسایش

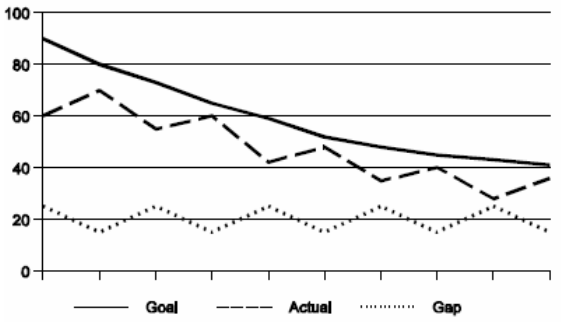
اهداف در حال فرسایش کشش محرک میان یک راه حل موقت و یک راه حل بنیادی است. در مورد اهداف در حال فرسایش، مدیران با عملکردی که در رسیدن به هدف تعیین شده ناموفق بوده است، مواجه

می شوند. آنها یک دلیل منطقی (راه حل موقت) برای تغییر هدف به هدفی که دست یافتنی تر باشد را جستجو می کنند (شکل ۹-۲). بر خلاف دیگر الگوها، اهداف در حال فرسایش، رفتار محرک در حال حاضر را که نتیجه ای از پیش بینی هایی از آینده که در گذشته انجام یافته است را بررسی می کند. آینده به طور حتمی مشخص نیست، بنابراین اگر پیش بینی درست نباشد عملیاتی که دانسته های کنونی را در مورد واقعیت مورد باز تاب قرار می دهد نادرست خواهند بود.



شکل ۹-۲ ساختار عمومی اهداف در حال فرسایش

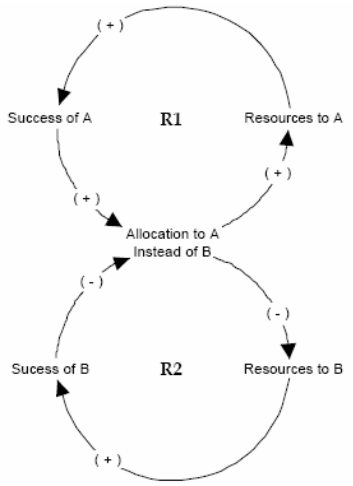
این الگو بیان می کند که شکافی میان یک هدف و یک حالت واقعی می تواند به دو طریق تحلیل شود : توسط به کار گیری عمل صحیح برای دست یابی به هدف یا توسط تنزل دادن هدف. فرض شده است که وقتی شکافی میان یک هدف و یک حالت وجود دارد هدف برای از بین بردن شکاف تنزل می یابد (شکل ۹-۳). در طول زمان تنزل دادن هدف موجب بدتر شدن عملکرد می شود. اهداف در حال فرسایش تاثیر طولانی مدت روی اهداف تنظیم شده در سازمان دارند. هر وقت اهداف در سازمان به پایین سوق داده شوند، پس از مدتی سازمان در رسیدن به اهداف کمتر و کمتر موفق خواهد بود.



شکل ۹-۳ رفتاردر طول زمان

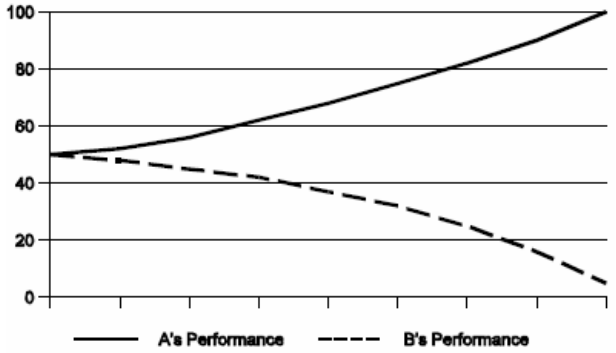
۲) موفقیت برای موفق

طرح اصلی موفقیت در پی موفقیت امیدواری به این که پیشرفت یک فرد موفق تداوم می یابد را شرح می دهد. عقیده ای وجود دارد مبنی بر این که (افراد، دپارتمانها، محصولات و غیره) موفق قسمت افزاینده منابع خود را از عملکرد گذشته اشان کسب کرده اند. الگوی موفقیت برای موفق بیان می کند که اگربه یک شخص یا گروه (A) از گروه دیگر با توانایی یکسان منابع بیشتری داده شود (B)، احتمال بیشتری برای موفقیت A وجود دارد (شکل ۹-٤). فرض بر این است که موفقیت اولیه A، اختصاص منابع بیشتر به A را تصدیق می کند و فاصله عملکردی میان دو گروه را در طول زمان بیشتر گسترش می دهد. کامیابی به موفقیت برندۀ رقابت را با هدف برنده شدن دوباره تقدیر می کند.



شکل ۹-٤ ساختار عمومی موفقیت در پی موفقیت

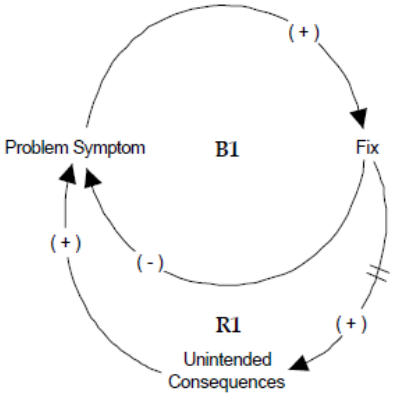
زمانی که افراد، دپارتمانها و یا محصولات بررسی می شوند، از طریق بررسی داده ها می توان الگوی موفقیت در پی موفقیت را تشخیص داد. وقتی منابع به گروه برنده تعلق می یابد، موفقیت آنها بیشتر و بیشتر می شود و در مقابل عملکرد گروه بعدی با امکانات و منابع کمتر رفته رفته تقلیل می یابد (شکل ۹-۵).



شکل ۹-۵ رفتار ذینفعان در طول زمان در الگوی موفقیت برای موفق

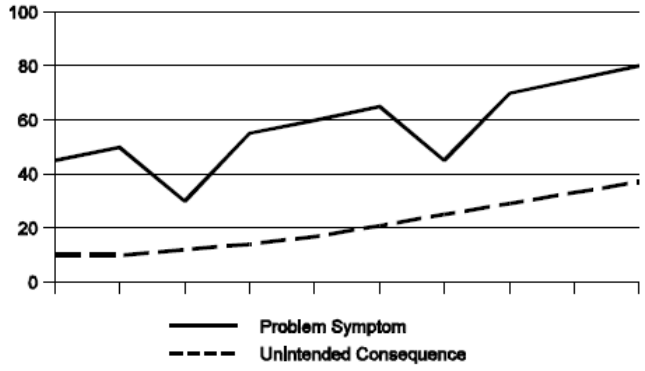
۳) راه‌حلهایی که شکست می‌خورند

اغلب در مدیریت یک سیستم گفته ی شود که "علیرغم اینکه یک اقدامی کردیم چرا وضعیت از حالت قبلی بدتر شد؟" علت وقوع این الگو آن است که راه حل بکار رفته برای اصلاح سیستم، متاسفانه در یک سیستم دیگر باعث خرابی می شود که در یک فرایند بلند و بزرگ برای سیستم اولیه ما هم خرابی را بیشتر می کند. این مفهوم در شکل ۹-٦ نمایش داده شده است.



شکل ۹-٦ ساختار عمومی الگوی راه حلهایی که شکست می خورند

اغلب راه حلهای کوتاه مدت در مدیریت آب باعث چنین وضعی می شوند. توسعه مدیریت عرضه بدون توجه به تبعات آن بر منابع آبی بالخصوص سفره های زیر زمینی در اغلب کشورها اتفاقات ناگواری را باعث شده است. رفتار سیستم در طول زمان در چنین شرایطی در شکل ۹-۷ نمایش داده شده است.



شکل ۹-۷ رفتاردر طول زمان

۹-۳-۲ معادلات حاکم بر متدولوژی

معادلات حاکم اولیه در دیدگاه پویایی سیستمها به صورت دو معادله پیوستگی و معادله تغییرات و نرخ ها قابل تعریف هستند. معادله پیوستگی به طور کلی بر اساس قانون بقای جرم استوار است. به طور کلی نمودارهای ذخیره و جریان بر اساس شبیه سازی هیدرولیکی هستند. جریان، همان ورود و خروج آب به

مخزن است. در واقع مخزن در اینجا نقش یک تشت آب را برای جریان بازی می کند. مقدار آب موجود در این تشت در هر زمانی برابر است با مقدار آب رها شده از شیر آب منهای مقدار آب خارج شده از تشت (با فرض صرفنظر کردن از تبخیر و نشت). به همین ترتیب مقدار ماده موجود در ذخیره نیز برابر است با مقدار ماده ورودی منهای مقدار ماده خروجی. مقدار ذخیره خالص برابر با نرخ تغییرات ذخیره است، بنابراین معادله انتگرالی زیر نشان دهنده میزان ذخیره در زمان t خواهد بود(Sterman, 2000).

$$Stock(t_n) = \int_{t_0}^{t_n} [Inflow(t) - Outflow(t)]dt + Stock(t_0) \quad (۱)$$

$Stock(t)$=ذخیره در زمان t

$Inflow(t)$ = مقدار ورودی به انباره در زمان t

$Outflow(t)$ = مقدار خروجی از انباره در زمان t

$Stock(t_0)$ = انباره در زمان t_0

t = زمان در بازه زمانی بین t_0 تا t_n

بنابراین داریم:

تغییرات زمانی حجم کنترل = دبی خروجی – دبی ورودی

۹-۳-۳ مراحل انجام تحقیق

مراحل مختلف مدلسازی در این روش شبیه سازی به صورت زیر می‌باشد (اکبریه، ۱۳۹۰):

- استخراج مکانیزم دینامیک تغییرات سیستم بصورت یک مدل مفهومی
- رسم نمودار علت و معلولی و بررسی تمامی عوامل موثر بر مدل
- جمع آوری داده ها و اطلاعات مورد نیاز برای توسعه مدل
- توسعه مدل ذخیره و جریان بر اساس داده ها و توابع و روابط بین اجزای مختلف
- اجرای مدل و مشاهده و تحلیل نتایج
- انجام آزمون های صحت سنجی جهت اطمینان از نتایج به دست آمده
- در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و اعمال سیاستهای معرفی شده

تمرین- در مورد علم پویایی سیستم تحقیق کرده و بعد از یادگیری نرم افزار Vensim مساله‌ای را در زمینه مهندسی عمران با آن مدل نمایید. در سایت دانشگاه MIT کلاس مجازی برای آموزش این روش دارد. برای دریافت نرم افزار به سایت www.vensim.com مراجعه نمایید.

فصل ۱۰- معرفی چند نرم‌افزار برای مهندسی سیستم‌ها

اسامی‌نرم‌افزارهای مهم در ارتباط با فصول مختلف این نوشتار به صورت زیر می‌باشد. برای آشنایی بیشتر می‌توان به بخش راهنما در داخل خود نرم‌افزارها مراجعه کرد.

1. GAMS
2. LINGO
3. WINQSB
4. EXPERT CHOICE
5. GFDM
6. Vensim

نرم‌افزار WINQSB

این نرم‌افزار یک سیستم پشتیبانی تصمیم گیر برای حل مسایل بهینه سازی خطی غیرخطی و عدد صحیح را ارایه میدهد. با توجه به سادگی یادگیری آن استفاده از آن بسیار راحت بوده و در این بخش به کمک مثال زیر پنجره های مختلف آن معرفی میگردد.

مثال ۱۰-۱: برای تصفیه فاضلاب امکان استفاده ازسه روش وجود دارد. هر یک از این روشها به ترتیب مقادیر ۱، ۲ و ۳ گرم از غلظت آلودگی در هر مترمکعب را کاهش می‌دهند. روش سوم نمی‌تواند بیش از ۵۰ درصد حجم فاضلاب ورودی را تصفیه کند. هزینه های بکارگیری هریک از این سه روش به ترتیب ۵و۳و۲ (هزارریال برمترمکعب) برآورد شده است. چنانچه لازم باشد مقدار۱۰۰۰ مترمکعب فاضلاب تصفیه گردد و حداقل به میزان ۱/۵ گرم در هر مترمکعب غلظت آلودگی کاهش یابد، یک مدل بهینه‌سازی خطی برای انتخاب سیاست بهینه تصفیه نوشته و آن را با نرم‌افزار حل نمایید.

حل- دراین مسئله متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از:

X_1: حجم فاضلاب تصفیه شده بااستفاده ازروش ۱

X_2: مقدار فاضلاب تصفیه شده بااستفاده ازروش۲

X_3: مقدار فاضلاب تصفیه شده بااستفاده ازروش ۳

باتوجه به اینکه نمی توان روش سوم رابرای بیش از۵۰ درصد حجم تصفیه به کاربردخواهیم داشت:

$$X_3 \leq 500$$

هم چنین محدودیت تصفیه آلودگی به گرم به صورت زیراست:

$$X_1+2X_2+3X_3 \geq 1/5\times 1000 \rightarrow X_1+2X_2+3X_3 \geq 1500$$

بقیه محدودیت ها به صورت زیرهستند:

$$X_1+X_2+X_3=1000$$

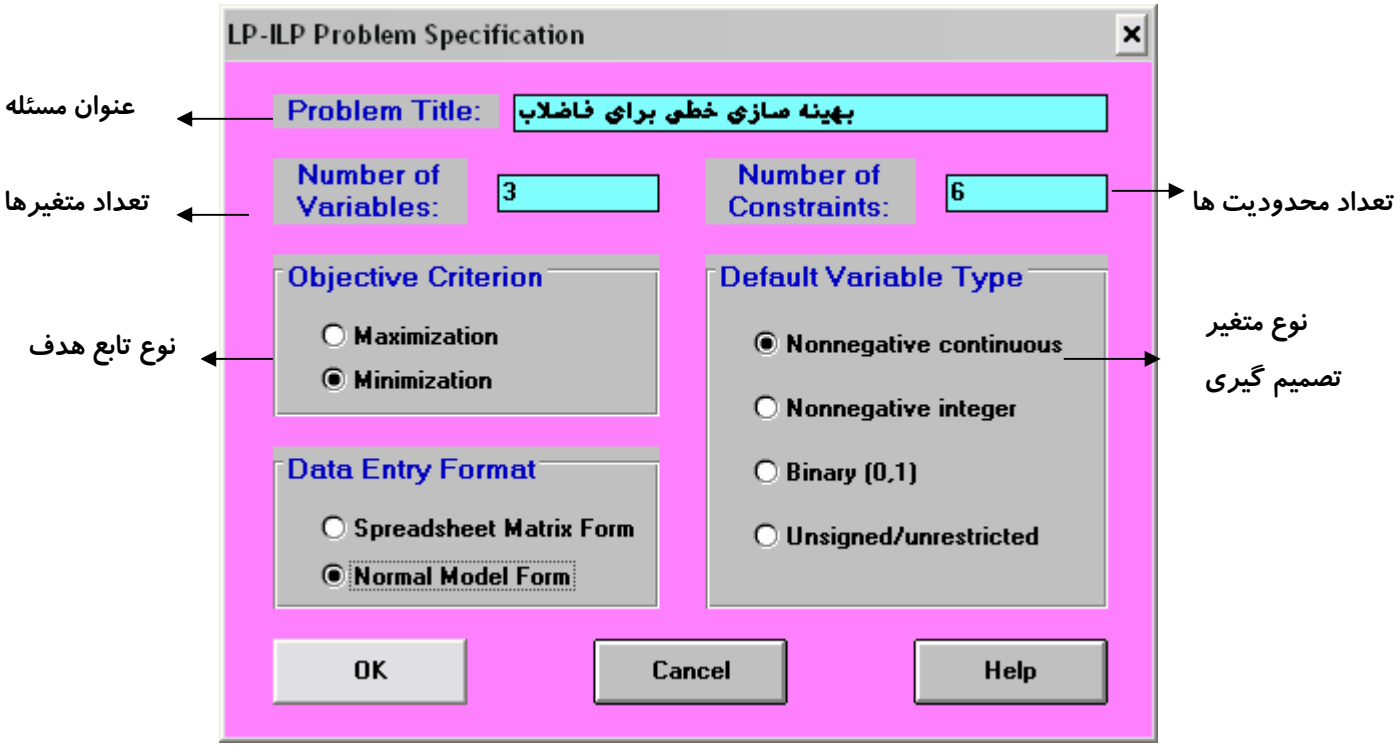
و

$X_3 \geq 0 \quad X_2 \geq 0 \quad X_1 \geq 0$

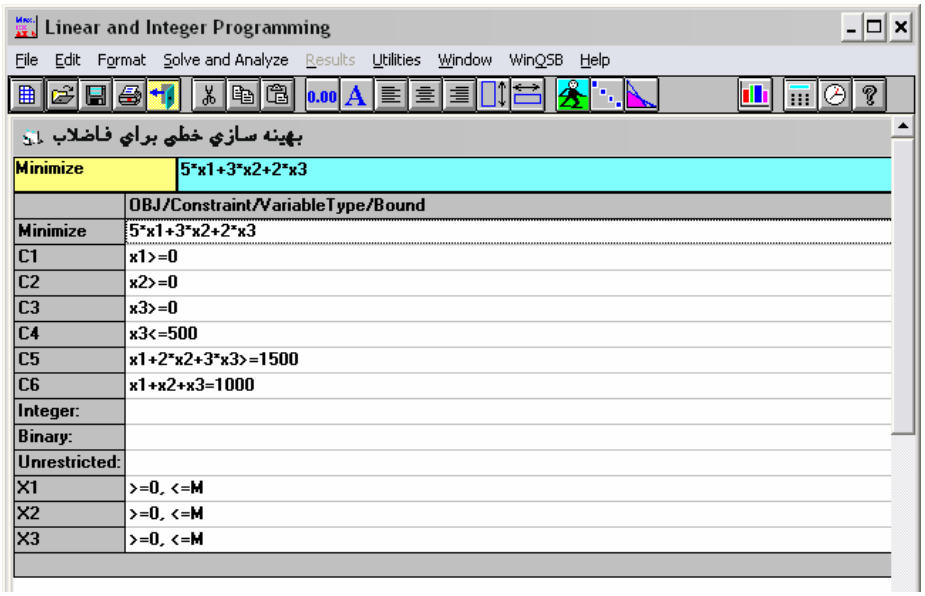
تابع هدف کمینه کردن کل هزینه است:

$\text{Min } Z = 5X_1 + 3X_2 + 2X_3$

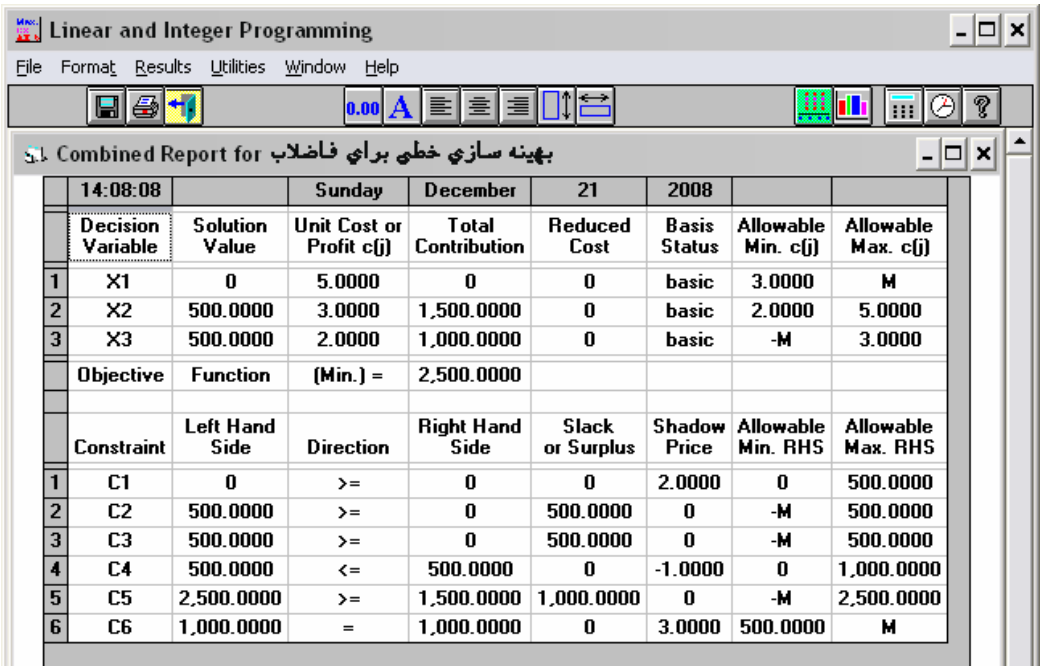
در نرم‌افزار WINQSB در مرحله اول مشخصات کلی مسئله را وارد می‌کنیم:



در مرحله بعد تابع هدف و محدودیتهای آن را به شکل زیر وارد می‌کنیم:



در مرحله بعد برای حل مسئله از سربرگ solve and analyze گزینه solve the problem را انتخاب می کنیم. البته برای نشان دادن جواب مسئله دو راه وجود دارد که یکی از آنها مورد گفته شده در بالا است اما مورد دیگر انتخاب گزینه solve and display steps است که حل مسئله رابه صورت مرحله به مرحله با استفاده از روش سیمپلکس نشان می‌دهد. در زیر حل مسئله به روش اول نشان داده شده است.



Linear and Integer Programming

File Format Results Utilities Window Help

Combined Report for بهينه سازي خطي براي فاضلاب

	14:08:08		Sunday	December	21	2008		
	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c[j]	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c[j]	Allowable Max. c[j]
1	X1	0	5.0000	0	0	basic	3.0000	M
2	X2	500.0000	3.0000	1,500.0000	0	basic	2.0000	5.0000
3	X3	500.0000	2.0000	1,000.0000	0	basic	-M	3.0000
	Objective	Function	(Min.) =	2,500.0000				
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	C1	0	>=	0	0	2.0000	0	500.0000
2	C2	500.0000	>=	0	500.0000	0	-M	500.0000
3	C3	500.0000	>=	0	500.0000	0	-M	500.0000
4	C4	500.0000	<=	500.0000	0	-1.0000	0	1,000.0000
5	C5	2,500.0000	>=	1,500.0000	1,000.0000	0	-M	2,500.0000
6	C6	1,000.0000	=	1,000.0000	0	3.0000	500.0000	M

ازشکل بالا می‌توان نتایج زیررا به دست آورد. در قسمت objective function مقداربهینه تابع هدف ۲۵۰۰ بدست آمده است. در ستون solution values مقدار بهینه متغیرها رابه صورت $x_1=0$ و $x_2=500$ و $x_3=500$ نشان می دهد.

مراجع

۱. استیفن پی. برادلی، آرنولدو سی. هکس و تامس ال. مگنتی، برنامه‌ریزی ریاضی کاربردی، (۱۹۷۷) ترجمه دکتر هـدایت ذکایی آشتیانی و دکتر حسین تقی‌زاده کاخکی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.

۲. اصغرپور، محمد جواد، تصمیم گیری های چندمعیاره، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷، چاپ پنجم.

۳. اکبریه س.، مدلسازی سیستم منابع آب به کمک پویایی سیستمها؛ مطالعه موردی شهر تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز، ۲۸ تیر ۱۳۹۰.

٤. ضرغامی، مهدی و احمد ابریشم‌چی، استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت طرح‌های انتقال بین حوضـه‌ای آب، سمینار انتقال بین‌حوضه‌ای آب و نقش آن در توسعه پایدار کشور، ۲۸ آبان ۱۳۸۳ دانشگاه صنعت آب و برق.

۵. کارآموز، محمد؛ آزاده احمدی و مهدیس فلاحی، مهندسی سیستم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.

6. Arrow, K. (1951). Social choice and Individual Values. Wiley, New York.
7. Awasthi A., Chauhan S.S. (2012). A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning, Applied Mathematical Modelling 36, 573–584.
8. Bagheri, A., Hjorth, P. (2007). A Framework for Process Indicators to Monitor Development: Practice to an Urban Water System, Environment, Development and Sustainability, 9, 143–161.
9. Ben Abdelaziz, F. and M. Sameh, (2001). Application of goal programming in a multi-objective reservoir operation model in Tunisia, European Journal of Operational Research, 133, 352-361.
10. Braun, William, The System Archetypes, (2002). Available online at: http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/sd/wb_sysarch.pdf.
11. d'Angelo A., Eskandari, A., Szidarovszky, F., (1998). Social choice procedures in water resource management. Journal of Environmental Management, 52, 203–210.
12. Floyd, J. (2008). Toward an integral of systems methodology for futures studies, Futures. 40, 138-149.
13. Deb, K. (2001). Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons, Chichester.
14. Karamouz, M., F. Szidarovszky and B. Zahraie. (2003). Water Resources Systms Analysis, Lewis publishers, Boca Raton.
15. Korea Institute of Construction Technology (2009), Assessment of Water Development in the Han River Basin; Case Study: Republic of Korea.
16. Loucks, D. P. and E. van Beek. (2005). Water Resources Systems Planning and Management - an introduction to methods, models and applications, UNESCO/ Delft Hydraulics.
17. Kyoto (2010), http://www.ar.t.kyoto-u.ac.jp/en/information/laboratory/space
18. Markowitz, H. (1959). Portfolio selection. Wiley, New York.
19. Ossenbruggen, P.J. (1984). System Analysis for Civil Engineers, John Wiley & Sons.
20. Saaty, T.L., (1980). The analytic hierarchy process for decision in a complex world. RWS Publications, Pittsburgh.
21. Senge, P. M., (1990) The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organisation, Doubleday Currency, New York.
22. Sheikhmohammady M., D.M. Kilgour, K.W. Hipel (2010). Modeling the Caspian Sea negotiations. Group Decision and Negotiation, 19(2), 149-168.
23. Sterman, J. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking for a Complex World. Irwin/McGraw-Hill.
24. Ragsdell, K. and D. Phillips. (1976). Optimal design of a class of welded structures using geometric programming. ASME Journal of Engineering for Industries, 98(3):1021–1025.
25. http://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic, accessed 2009.
26. http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_Hierarchy_Process, accessed 2009.
27. Zarghami, M. (2006) Integrated water resources management in Polrud irrigation system, Water Resources Management, 20(2), 215-225.
28. Zarghami, M. A. Abrishamchi, R. Ardakanian (2008). Multi-criteria decision making for integrated urban water management, Water Resources Management 22(8), 1017-1029.

29. Zeleny, M. (1973). Compromise programming, in: J. Cochrane, M. Zeleny (Eds.), Multiple criteria decision making, University of South Carolina Press, Columbia, USA.

لطفا نظرات اصلاحی خود را در مورد این نوشتار به آدرس الکترونیکی نگارنده ارسال فرمایید:

zarghaami@gmail.com

والسلام