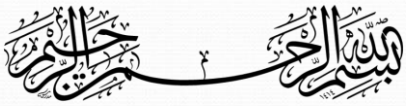


بهینه‌سازی استوار
و کاربردهای آن در مدیریت زنجیره تامین
مقدمه‌ای بر عدم‌قطعیت، ریسک و استواری

مدرس: میرسامان پیشوایی

عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران
pishvaee@iust.ac.ir - www.pishvaee.com

دی‌ماه ۱۳۹۲ – ویرایش اول

معرفی درس

- از قدیم‌الایام موضوع برخورد با عدم‌قطعیت در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی و یا به عبارت دیگر بهینه‌سازی سیستم‌ها از مباحث مهم و مورد توجه محققان و مشاروان حرفه‌ای بوده است
- رویکردهای مختلفی مانند برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی فازی برای برخورد با عدم‌قطعیت در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه داده شده است.
- رویکرد برنامه‌ریزی از متأخرترین روش‌های برخورد با عدم‌قطعیت است که به دلیل توانمندهای قابل توجه مورد اقبال محققان قرار گرفته است.
- درس حاضر بر آن است تا روش‌های مختلف برنامه‌ریزی استوار و کاربردهای آن در مدیریت زنجیره‌تأمین را مورد واکاوی قرار دهد.

اهداف درس

رئوس مطالب و منابع

ردیف	رئوس مطالب	برخی منابع پیشنهادی
۱	**مقدمه‌ای بر عدم‌قطعیت، خطرپذیری (ریسک) و استواری**	▪ Ben-Tal, A., El-Ghaoui, L., Nemirovski, A., (2009). Robust optimization, Princeton university press. ▪ Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A., (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review, European Journal of Operational Research, 203, 283–293. ▪ Ho C., (1989). Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness, International Journal of Production Research, 27: 1115–1135. ▪ شکوری گنجوی ح.، نساجی م، (۱۳۸۲). نظریه منطق فازی و اصل امتناع اجتماع و ارتفاع نقیضین: تبیین و تعدیل، نشریه علمی- پژوهشی امیر کبیر، شماره ۵۴. ▪ علامه طباطبائی (با پاورقی شهید مطهری)، اصول و فلسفه و روش رئالیسم (جلد اول و دوم)، انتشارات صدرا، چاپ یازدهم ۱۳۷۹.
۲	**بهینه‌سازی استوار تصادفی مبتنی بر سناریو**	▪ Mulvey, J, Vanderbei, R, Zenios, S., (1995). Robust optimization of large-scale systems, Operations Research, 43, 264-81. ▪ Yu, C.S., Li, H.L., (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems, International Journal of Production Economics, 64: 385-397. ▪ Leung, S.C.H., Tsang, S.O.S., Ng, W.L., Wu, Y., (2007). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment, European Journal of Operational Research, 181, 224–238. ▪ Birge J.R., Louveaux F. Introduction to Stochastic Programming. Springer Series in Operations Research. Springer-Verlag, New York; 1997.

رئوس مطالب و منابع (ادامه)

ردیف	رئوس مطالب	برخی منابع پیشنهادی
۳	بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم‌قطعیت بسته	▪ Ben-Tal, A., El-Ghaoui, L., Nemirovski, A., (2009). Robust optimization, Princeton university press. ▪ Soyster, A., (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming, Operations Research, 21:1154-1157. ▪ Bertsimas, D., Sim, M., (2004). The price of robustness, Operations research, 52, 35–53. ▪ Pishvaee, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, Applied Mathematical Modelling, 35, 637-649.
۴	بهینه‌سازی استوار فازی	▪ Pishvaee, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. Fuzzy Sets and Systems, 206, 1-20. ▪ Mousazadeh M., Torabi S.A., Pishvaee M.S., (2014). Green and Reverse Logistics Management Under Fuzziness in Kahraman C., Öztaysi B., (eds.) Supply Chain Management Under Fuzziness, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ▪ Dubois, D., Prade, H., (1988). Possibility theory, Plenum, New York. ▪ Inuiguchi, M., Ramik, J., (2000). Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem, Fuzzy Sets and Systems, 111: 3–28. ▪ Mula, J., Poler, R., Garcia, J. P., (2006). MRP with flexible constraints: a fuzzy mathematical programming approach, Fuzzy Sets and Systems, 157: 74–97.
۵	روش‌های اعتبارسنجی مدل‌های استوار	▪ Pishvaee, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, Applied Mathematical Modelling, 35, 637-649. ▪ Pishvaee, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. Fuzzy Sets and Systems, 206, 1-20.

نحوه ارزیابی

- ❑ حضور فعال در کلاس و ارائه پاسخ به موقع به تمرینات ٪۲۰
- ❑ پروژه کلاسی ٪۵۰ (قابل ارتقاء تا ٪۷۰)
- ❑ آزمون پایان ترم ٪۲۰

نکته ۱: آزمون پایان ترم به صورت جزوه و ... باز برگزار می‌گردد و سوالات مفهومی و ترکیبی خواهد بود.

نکته ۲: دانشجویان سعی کنند از پروژه کلاسی، حضور فعال در کلاس و پاسخ به تمرینات نمره لازم را کسب و کنند.

وظائف دانشجویان

۱. حضور به موقع و فعال در کلاس.

۲. تکمیل فرم حضور و اعلام نظر دانشجو در پایان هر جلسه (این بند شامل دانشجویان مجازی نمی‌شود).

۳. شرکت در آزمون پایان ترم.

۴. انجام با کیفیت و ارسال به موقع تمرینات به آدرس ایمیل تدریس‌یار r.babazadeh@ut.ac.ir

۵. انتخاب موضوع پروژه کلاسی و انجام و ارسال آن به ایمیل مدرس (pishvaee@iust.ac.ir) تا ۵ روز پس از آخرین امتحان پایان ترم و دریافت تاییدیه دریافت پروژه توسط مدرس.

نکته: اسلایدها و همچنین اکثر منابع از طریق سایت (www.pishvaee.com) در صورت عضویت در سایت با نام حقیقی قابل دستیابی می‌باشد.

مقدمه‌ای بر عدم قطعیت، ریسک و استواری

بهینه سازی در حالت قطعیت

- مسئله بهینه سازی ذیل را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \min \quad & cx+d \\ s.t. \quad & Ax \geq b, \\ & x >= 0 \end{aligned}$$

- اصل قطعیت: مقدار پارامترها معین و قطعی است.

- اما در کاربردهای واقعی به ندرت می توان مقدار پارامترها را به طور دقیق تعیین کرد. ضمناً مقدار بهینه متغیرها در پیاده سازی با خطا همراه است.

تاثیر عدم قطعیت پارامترها در بهینه سازی

یک مسئله بهینه سازی خطی را در نظر بگیرید. عبارت ذیل محدودیت ۳۷۲ آن است.

$$\begin{aligned} [a^{\mathrm{n}}]^T x = & -15.79081x_{826} - 8.598819x_{827} - 1.88789x_{828} - 1.362417x_{829} - 1.526049x_{830} \\ & -0.031883x_{849} - 28.725555x_{850} - 10.792065x_{851} - 0.19004x_{852} - 2.757176x_{853} \\ & -12.290832x_{854} + 717.562256x_{855} - 0.057865x_{856} - 3.785417x_{857} - 78.30661x_{858} \\ & -122.163055x_{859} - 6.46609x_{860} - 0.48371x_{861} - 0.615264x_{862} - 1.353783x_{863} \\ & -84.644257x_{864} - 122.459045x_{865} - 43.15593x_{866} - 1.712592x_{870} - 0.401597x_{871} \\ & +x_{880} - 0.946049x_{898} - 0.946049x_{916} \\ & \geq b \equiv 23.387405 \end{aligned}$$

- چه اتفاقی می افتد اگر در پارامترها **تنها** ۰.۰۰۱ عدم قطعیت وجود داشته باشد ؟

$$|a_i^{\mathrm{true}} - a_i^{\mathrm{n}}| \leq 0.001 |a_i^{\mathrm{n}}|$$

تاثیر عدم قطعیت پارامترها در بهینه سازی

با قرار دادن جواب بهینه در مسئله خواهیم داشت:

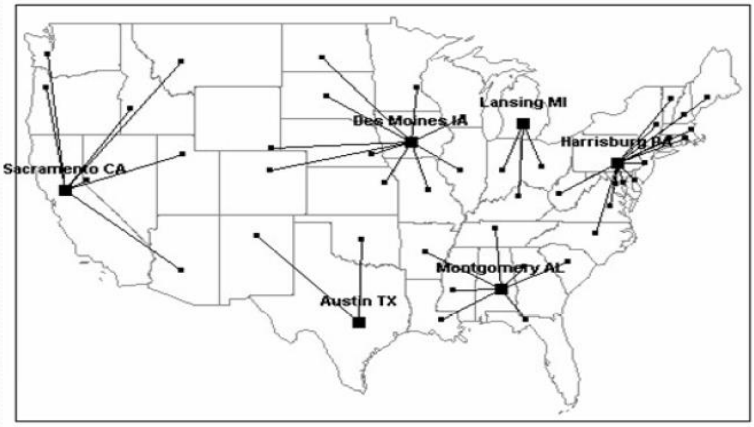
$$\min_{a^{\text{true}}} \{[a^{\text{true}}]^T x^{\text{n}} | \, a^{\text{true}} \textbf{ satisfies } (*)\} - b < -128.2 \approx 4.5|b|.$$

- یعنی مقدار بدست آمده از حد موجه محدودیت ۴۵۰٪ بیشتر می شود.

- بر اساس آزمایشات انجام شده Ben Tal & Nemerovski (2000) روی ۹۰ مسئله بهینه سازی خطی موجود در NETLIB
  - در ۱۹ مسئله عدم قطعیت ۰.۰۰۱ موجب آن شد که در یک یا تعدادی از محدودیت ها بیش از ۵٪ مقدار موجه محدودیت نقض شود.
  - در ۱۳ تا از این ۱۹ مسئله این مقدار بیش از ۵۰٪ بود.

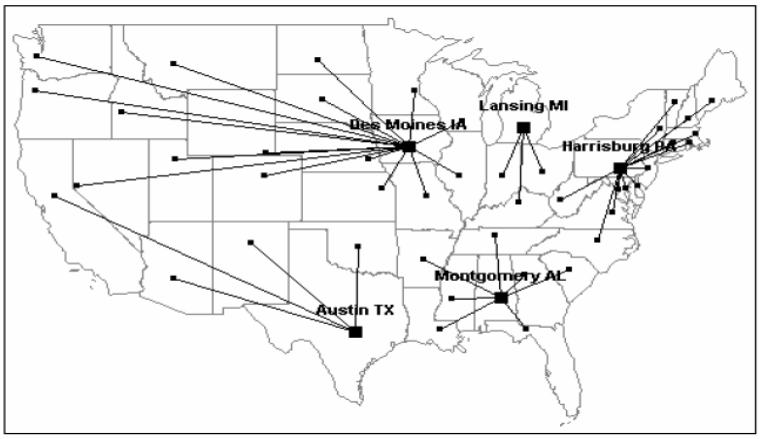
مثال زنجیره تامین

شکل زیر حالت بهینه یک شبکه توزیع را نشان میدهد.



مثال زنجیره تامین (ادامه)

حال فرض می کنیم یکی از تسهیلات به دلیل یک بحران امکان سرویس دهی نداشته باشد.



مثال زنجیره تامین (ادامه)

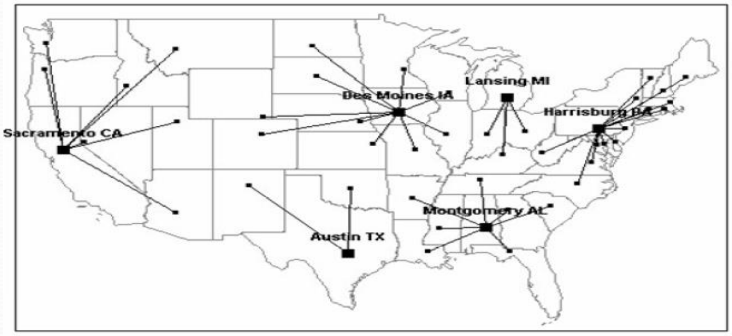
- در این حالت هزینه های حمل و نقل ۵۲٪ افزایش یافته و هزینه کل نیز نسبت به حالت بهینه ۱۷٪ افزایش می یابد.

- باید دقت کرد که تسهیل حذف شده ۱۹٪ تقاضای مشتریان را تامین می‌کرده است. در واقع میزان هزینه اضافه شده به دو عامل بستگی دارد:

۱- سهم تسهیل در ارضای تقاضای مشتریان و

۲- فاصله یا پخشی مشتریان

یک مثال از بحران در زنجیره تامین



Location	% Demand Served	Failure Cost	% Increase
Sacramento, CA	19	1,019,065	117
Harrisburg, PA	29	713,482	52
Montgomery, AL	17	634,473	35
Austin, TX	9	593,904	26
Des Moines, IA	16	546,599	16
Lansing, MI	12	537,347	14
Transportation cost w/o failures		470,228	0

راه حل برای این مثال

- با افزایش تعداد تسهیلات و پراکندگی بیشتر آنها در طول و عرض ناحیه سرویس‌دهی هزینه های خرابی و از دور خارج شده تسهیلات کم می شود.

- باید دقت کرد این راه حل موجب افزایش هزینه‌ها نسبت به حالت بهینه می‌شود لذا باید سعی کرد بین اهداف کلاسیک مانند حداقل کردن هزینه کل و حداقل کردن هزینه‌های بحران تعادل ایجاد شود.

عدم قطعیت و ریسک

- می توان مفهوم عدم قطعیت را شرایطی تعریف کرد که داده ها و اطلاعات به طور ناقص وجود دارد (شرایط قطعیت زمانی است که داده ها کامل هستند).
- Galbraith (1973) عدم قطعیت را تفاوت و فاصله بین مقدار اطلاعات لازم برای انجام کاری و مقدار اطلاعات موجود تعریف می‌کند.
- عدم قطعیت در این تعریف بار مثبت یا منفی ندارد و می تواند شامل شانس بدست آوردن منافع یا از دست دادن منافع و ضرر کردن گردد.
- بر اساس Stewart (2005) ریسک از عدم قطعیت حاصل می شود و ریسک بر حالتی صدق می‌کند که امکان بدست آوردن نتایج نامطلوب وجود دارد.

محاسبه ریسک

- در ادبیات مدیریت ریسک، ریسک به ضرب احتمال و میزان خسارت‌زا بودن وقایع برمی‌گردد.
  Grossi and Kunreuther (2005), Haimes (2004)

Risk = Probability of an accident occurring . Expected loss in case of accident

خطر پذیری = احتمال وقوع حادثه × میزان انتظاری زیان حاصل از وقوع حادثه

- فرمول ریسک در ادبیات مدیریت بحران:

Risk = Hazard . Vulnerability

خطر پذیری = خطر × آسیب پذیری

دسته بندی انواع عدم قطعیت

- **Ho (1989)** عدم قطعیت را به دو نوع
  - عدم قطعیت محیط (Environment uncertainty): ناشی از محیط است. مثال: تقاضای مشتری در یک سیستم تولیدی
  - عدم قطعیت سیستم (System uncertainty): مربوط به داخل سیستم است. مثال: خرابی ماشین آلات تولیدی در یک سیستم تولیدی
- **Mula et al. (2007)** بر اساس کارهای قبلی موجود (بخصوص در ادبیات فازی) عدم قطعیت را به دو نوع ذیل تقسیم بندی کرده است.
  - انعطاف پذیری در اهداف و محدودیتها (Flexibility in constraints and goals-Fuzziness): در حقیقت بیشتر به تعریف و ترجیح تصمیم گیر بر می گردد.
  - عدم قطعیت در داده‌ها (Uncertainty in data): که خود به دو نوع ذیل تقسیم می شود:
    - تصادفی (Randomness): ناشی از ماهیت تصادفی پارامترها مثل نتیجه پرتاب یک تاس
    - عدم قطعیت شناختی (Epistemic uncertainty): کمبود دانش ما راجع به پارامترها مثل میزات تقاضا در آینده

دسته بندی انواع عدم قطعیت

از منظری دیگر عدم قطعیت به دو نوع زیر تقسیم می شود.

- **عدم قطعیت معمول کسب و کار (فعالیت)**
- **و عدم قطعیت بحران**

- **Klibi et al. (2009)** سه نوع عدم قطعیت را معرفی می کند.
  - **عدم قطعیت تصادفی** (Randomness): که برای حوادث تکرار پذیر مثل عملیات معمول در صنعت استفاده می شود.
  - **بحران/فاجعه/خطر** (Disruption/Failure/Hazard): حالتی که شانس وقوع کم است اما اثرات بسیار زیادی دارد که از آن با نام بحران یا خطر نامبرده می شود.
  - **عدم قطعیت شدید** (Deep uncertainty) : که در آن اطلاعات بسیار اندکی درباره وقایع آینده برای تعیین شانس وجود دارد.

منشاء عدم قطعیت از نگاه:

Ben-Tal A., El-Ghaoui L., Nemirovski A., Robust optimization, (2009).

- خطای پیش‌بینی (Prediction error)
  - مانند تقاضا در آینده
- خطای اندازه‌گیری (Measurement error)
  - مانند اندازه گیری یک فاکتور تکنولوژیک
- خطای پیاده‌سازی (Implementation error)
  - مانند محل دقیق یک قطعه طراحی شده که در هنگام اجرا دقیقاً برابر مقدار طراحی نمی باشد

رویکردهای برخورد با عدم قطعیت و بحران

- چهار رویکرد معروفی که تا به حال توسعه داده شده است:
  - بهینه‌سازی تصادفی Stochastic optimization
  - بهینه‌سازی فازی Fuzzy optimization
  - بهینه‌سازی استوار Robust optimization
  - رویکردهای ترکیبی
  - رویکردهای تعریف تابع هدف و محدودیتهای اضافی
    Objective function and auxiliary constraints

رویکردهای کمتر استفاده شده:

- ❖ Rough set theory
- ❖ Grey sets

عدم قطعیت و اصل امتناع اجتماع نقیضین

- آیا در نظر گرفتن عدم قطعیت بخصوص با تعبیر غیر تصادفی آن باعث رد اصل مهم «امتناع اجتماع نقضین» می شود؟
- اصولاً امکان جمع دو نقیض وجود دارد؟

- برخی دانشمندان فازی از جمله Kosko تصور کرده اند که با منطق فازی اصل عدم تناقض را بی اعتبار کرده اند.

- جواب نقضی (اسکاتی): اگر اصل عدم تناقض بی اعتبار شود دیگر هیچ گزاره ای از جمله اینکه «اصل امتناع تناقض غلط (یا بی اعتبار) است» قابل اثبات یا نفی نیست. جالب اینکه Kosko (1994) می گوید: «فازی، فازی نیست»

- جواب اثباتی: مراجعه کنید به:
  - شکوری گنجوی ح.، نساجی م، (۱۳۸۲). نظریه منطق فازی و اصل امتناع اجتماع و ارتفاع نقیضین: تبیین و تعدیل، نشریه علمی–پژوهشی امیر کبیر، شماره ۵۴.
  - کتاب اصول و فلسفه و روش رئالیسم، علامه طباطبائی (با پاورقی شهید مطهری)

رویکردهای برخورد با عدم قطعیت دنبال چه هستند؟

- تعیین نوع مدل‌سازی عدم قطعیت
  - تابع توزیع احتمالی
  - تابع عضویت فازی
  - و ...

- تعیین آنچه که در برخورد با عدم قطعیت برای ما مطلوب است
  - رسیدن به متوسط عملکرد بهتر
  - رسیدن به موجه بودن در تمام شرایط
  - و ...

تاریخچه بهینه‌سازی استوار

- به عنوان پیشتاز در این عرصه، **Soyster (1973)** یک روش برنامه‌ریزی استوار بدبینانه برای برخورد با مسائل برنامه‌ریزی خطی غیر دقیق توسعه داد.
- در حوزه ادبیات برنامه‌ریزی ریاضی فازی، اولین تلاش‌ها توسط **Inuiguchi and Sakawa (1995; 1998)** با بکارگیری رویکردهای حداقل کردن حداکثر تأسف به انجام رسید.
- در سال ۱۹۹۵، **Mulvey et al. (1995)** یک روش برنامه‌ریزی استوار منعطف‌تر (نسبت به حالاتی که پیش‌تر بیان شد) مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور توسعه داد. این مقاله نقطه عطفی در ادبیات برنامه‌ریزی استوار ایجاد کرد و بر مبنای آن در سال‌های بعد روش‌های دیگری ارائه شد.
- چند سال بعد **Ben-Tal and Nemirovski (1998; 2000)** و **El-Ghaoui et al. (1998)** با توسعه روش **Soyster (1973)** برای مسائل برنامه‌ریزی خطی غیرقطعی با مجموعه‌های عدم‌قطعیت محدب گوناگون یک گام رو به جلوی قابل توجه در توسعه تئوری برنامه‌ریزی استوار برداشتند.
- بالاخره در موج آخر مدل‌های برنامه‌ریزی امکانی توسط **Pishvaee et al. (2012)** در راستای توسعه کاربرد منطق استواری در فضای برنامه‌ریزی امکانی ارائه شد.

منطق استواری

- تصمیم استوار تصمیمی است که نسبت به عدم قطعیت محیط تاب آورده و عملکرد ناشی از آن حداقل نوسان را داشته باشد.
- تئوری برنامه‌ریزی یا بهینه‌سازی استوار یک رویکرد ریسک گریز برای برخورد با مسائل بهینه‌سازی در شرائط عدم‌قطعیت است.

در مقابل عدم قطعیت به دنبال چه باید باشیم:

- **رویکرد اول:** سعی می کند متوسط عملکرد را تحت ریسک و بحران را بهبود بخشد و نسبت به خود بحران و ریسک حساسیت چندانی ندارد. (Average Case)
- **رویکرد دوم:** تصمیم گیرنده نسبت به خود ریسک و بحران بسیار حساس است یعنی نه تنها نسبت به عملکرد بلکه نسبت به انحراف از عملکرد نیز بسیار حساس است. (Worst Case)
- بهینه سازی استوار در واقع بیشتر مبتنی بر رویکرد دوم عمل می‌کند هر چند در توسعه‌های صورت گرفته امکان ترکیب دو حالت هم مهیا شده است.

تعریف علمی استواری

- تصمیم استوار تصمیمی است که نسبت به عدم قطعیت محیط تاب آورده و عملکرد ناشی از آن حداقل نوسان را داشته باشد.
- یک جواب برای یک مسئله بهینه‌سازی، یک جواب استوار است اگر دارای **استواری شدنی بودن (Feasibility Robustness)** و **استواری بهینگی (Optimality Robustness)** باشد.
- «استواری شدنی بودن» به این معناست که جواب می‌بایست برای تمامی (اکثریت قریب به اتفاق) حالات ممکن پارامترهای دارای عدم‌قطعیت شدنی باقی بماند.
- «استواری بهینگی» نیز بدین معناست که مقدار تابع هدف به ازاء جواب استوار می‌بایست برای تمامی (اکثریت قریب به اتفاق) حالات ممکن پارامترهای دارای عدم‌قطعیت، نزدیک به مقدار بهینه خود بوده و یا به عبارت دیگر حداقل انحراف را از مقدار بهینه خود داشته باشد.

دسته‌بندی رویکردهای بهینه‌سازی استوار

رویکردها	تعریف	برخی تحقیقات مرتبط
رویکرد بدبینانه سخت Hard worst case approach	با چشم‌پوشی از شانس یا امکان نشدنی بودن جواب، این رویکرد تضمین می‌کند که جواب به ازاء تمامی مقادیر ممکن برای پارامترهای دارای عدم‌قطعیت شدنی باقی بماند (حداکثر ایمنی در برابر عدم-قطعیت). از بعد «استواری بهینگی» هم این رویکرد در صدد حداقل کردن بدترین مقدار تابع هدف می‌باشد (منطق حداقل کردن حداکثر تأسف).	Soyster (1973) Ben-Tal & Nemirovski (1998) Ben-Tal et al. (2009)
رویکرد بدبینانه نرم Soft worst case approach	نسخه منعطف‌تر رویکرد برنامه‌ریزی استوار بدبینانه سخت می‌باشد که تلاش می‌کند بدترین مقدار تابع هدف را کمینه کند، اما در صدد ارضاء (تمامی) محدودیت‌ها در بدترین حالت ممکن هم نیست.	Bertsimas & Sim (2004) Inuiguchi & Sakawa (1998)
رویکرد واقع‌گرایانه Realistic approach	این رویکرد سعی در آن دارد که تعادلی منطقی (به طور صریح یا ضمنی) بین استواری، هزینه استواری و سایر اهداف مانند بهبود عملکرد متوسط سیستم ایجاد کند (منطق هزینه- منفعت). بر خلاف رویکردهای بدبینانه، در این رویکرد نقض جزئی و یا نقض برخی از محدودیت‌ها مجاز بوده و مدل به دنبال یک جواب استوار نسبی بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده می‌باشد. جواب حاصل از این روش موجه و نزدیک بهینه برای اکثر حالات ممکن پارامترهای دارای عدم‌قطعیت خواهد بود.	Mulvey et al. (1995) Pan & Nagi (2010)

دسته‌بندی رویکردهای بهینه‌سازی استوار

رویکردها	توضیح	برخی تحقیقات مرتبط
Scenario-based stochastic robust programming	بر روی روش برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو سوار می‌شود.	Mulvey et al. (1995) Pan & Nagi (2010)
Robust programming based on closed convex uncertainty sets	از مجموعه‌های بسته محدب برای مدل کردن پارامترهای غیر دقیق استفاده می‌شود.	Ben-Tal & Nemirovski (1998) Ben-Tal et al. (2009) Bertsimas & Sim (2004)
Fuzzy robust programming	بر روی روش‌های برنامه‌ریزی فازی شامل برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی منعطف سوار می‌شود.	Inuiguchi & Sakawa (1998) Pishvaee et al. (2012)