

Multi-Objective Optimization of Drainage Depth Based on Fair Benefits Division; Short-Term versus Long-Term Environmental Effects

F. Haji Rajabi¹ and H. Mazandarani Zadeh^{2*}

Abstract

In south Khuzestan construction of drainage systems is vital for amending saline soils and protecting the lands against salinity stress. However, these systems have some potential environmental effects and have become a major challenge in the region in recent years. These environmental effects can be divided into two categories; short-term effects of primary leaching and long-term effects. According to the salinity distribution in the soil, short-term and long-term environmental effects are conflicting; so that, less salt is discharged to the environment in primary leaching and it will result in high salt discharge to the environment during drainage operation. Therefore, short and long term environmental effects are discussed in this study to determine the optimal parameters for drainage designs. For this purpose, multi-objective simulated annealing model was used. Also, fair benefit division model has been used to select final optimal points among the multi-objective outputs. As a case study to test the ability of presented model, the data of Salman Farsi agro-industrial enterprise was used. According to the multi-objective model results, the optimum installation depth for the output varied between 1.1 to 2.7 m. This optimum installation depth was reduced to 1.45 to 2 m using the fair benefits division model. Optimum installation depth using symmetric Nash method was approximately 1.5 meters.

Keywords: AMOSA, Multi-Objective Optimization, Simulated Annealing, Salinity Control, Conflict of Interests, Nash Method.

Received: March 11, 2017

Accepted: July 6, 2017

بهینه‌سازی دوهدفه عمق نصب زهکشی بر مبنای تقسیم عادلانه منافع

آثار کوتاه‌مدت در مقابل آثار بلندمدت زیست‌محیطی

فائزه حاجی رجبی^۱ و حامد مازندرانی زاده^{۲*}

چکیده

احداث سیستم زهکشی به منظور اصلاح خاک‌های شور و حفاظت از اراضی در مقابل شوری مجدد در خاک‌های جنوب خوزستان ضروری است؛ اما اثرات ناخواسته زیست‌محیطی که به همراه دارند، در سال‌های اخیر تبدیل به چالشی بزرگ در مناطق دارای شبکه‌های زهکشی شده است. اثرات زیست‌محیطی بهره‌برداری را می‌توان به دو بخش اثرات کوتاه‌مدت ناشی از آبشویی اولیه و اثرات درازمدت تقسیم نمود. بر اساس نيمرخ توزیع شوری در خاک، اهداف کوتاه‌مدت و درازمدت زیست‌محیطی در تعارض با یکدیگر می‌باشند به گونه‌ای که کاهش نمک تخلیه‌شده به محیط‌زیست در اثر آبشویی اولیه باعث باقی ماندن نمک و افزایش نمک تخلیه‌شده به محیط‌زیست در دوران بهره‌برداری خواهد شد، در این تحقیق تقابل آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت زیست‌محیطی به منظور تعیین پارامترهای بهینه طراحی زهکشی مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور از مدل بهینه‌سازی دوهدفه بازپخت فلزات و همچنین از مدل‌های تقسیم عادلانه منافع برای انتخاب نقطه بهینه نهایی از میان نقاط بهینه خروجی مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. به منظور ارزیابی توانایی مدل ارائه‌شده، اطلاعات شرکت کشت و صنعت سلمان فارسی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. نتایج مدل بهینه‌سازی نشان می‌دهد عمق بهینه نصب از ۱/۱ تا ۲/۷ متر متغیر است، درحالی‌که محدوده تغییرات عمق بهینه نصب در صورت استفاده از مدل‌های تقسیم عادلانه منافع به بازه ۱/۴۵ تا ۲ متر کاهش می‌یابد و عمق بهینه نصب با استفاده از روش NASH مقارن در حدود ۱/۵ متر است.

کلمات کلیدی: AMOSA، بهینه‌سازی چندهدفه، بازپخت فلزات، کنترل شوری، تعارض منافع، روش NASH.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۴/۱۵

1-Former MSc. Graduate Student, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: faeze_hajirajabi@yahoo.com

2- Assistant Professor, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

سلامت محیط‌زیست را به شدت تهدید نماید. بر اساس تحقیق Sotoodehnia et al. (2014) بیشترین مشکلات زیست‌محیطی زهکش‌های زیرزمینی، دفع مواد شیمیایی حاصل از کشاورزی (کودها و سموم شیمیایی) در اراضی زهدار و تخلیه املاح به محیط‌زیست است؛ لذا در آن تحقیق پیشنهاد شده است که معیارهای رایج طراحی به گونه‌ای بازنگری شوند که جنبه‌های زیست‌محیطی نیز در آن‌ها گنجانده شود. همچنین، در تحقیق Nazari et al. (2008) مشخص شد در مناطق با آب‌های شور کم‌عمق مانند جنوب ایران، افزایش عمق نصب زهکش‌ها می‌تواند به افزایش نمک خروجی از زهکش‌های زیرزمینی منجر شود و همچنین کاهش عمق نصب زهکش‌ها نیز پیامدهای مختلفی را مانند ماندابی شدن، تجمع نمک در ناحیه ریشه گیاه و کاهش عملکرد گیاه در پی خواهد داشت. برای شوری‌زدایی خاک‌های شور، به‌طور معمول به آیشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک و لایه‌ای که اصلاح آن مورد نظر است، اقدام می‌گردد. بر اساس تحقیق Konukcu et al. (2005) و Corwin et al. (2007) عمق آب لازم برای آیشویی نمک‌ها، بستگی به میزان شوری اولیه، بافت و عمق خاک، گیاهان انتخابی در الگوی کشت و روش آیشویی نمک‌های محلول دارد. پارامترهای طراحی زهکش شامل عمق و قطر لوله‌های زهکش به‌عنوان پارامتر مستقل و فاصله زهکش‌ها به‌عنوان پارامتر وابسته هستند که بسته به نوع هدف می‌توان ترکیبی مختلف از این متغیرها را به کار برد. در تحقیق Mazandaranizadeh (2016) بهینه‌سازی چندهدفه اقتصادی-محیط‌زیستی عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از مدل NSGA-II پرداخته شده است، نتایج نشان داد عمق بهینه نصب که هم‌زمان هر دو هدف اقتصادی و محیط‌زیستی را تأمین نماید در فاصله $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{8}$ متر است.

توزیع نمک در خاک از الگوی جریان آب در خاک پیروی می‌کند. به‌عنوان مثال نفوذ رو به پایین آب در خاک، نمک را از سطح بالایی خاک به عمق‌های پایین‌تر انتقال می‌دهد. بر اساس تحقیق Hanson et al. (2006) نوع خاک، نوع نمک، ترکیبات شیمیایی موجود در خاک، مقدار آب به‌کاررفته و روش آبیاری همگی بر الگوی توزیع و حرکت نمک در خاک تأثیرگذار هستند. Gaarde et al. (1974) و Rajabzadeh et al. (2011) نشان دادند که در شرایط عدم وجود شستشو و پیش از آیشویی اولیه، تجمع املاح در لایه‌های سطحی بیشتر و در عمق کمتر است. به این ترتیب نصب زهکش‌های عمیق، هرچند باعث شسته شدن نیم‌رخ عمیق‌تری از خاک در کوتاه‌مدت در اثر آب آیشویی اولیه می‌شوند، ولی در هنگام بهره‌برداری به علت مجاورت با آب زیرزمینی با غلظت مناسب‌تر، شوری کمتری خارج می‌شود. همچنین آیشویی اولیه در زهکش‌های

یکی از مهم‌ترین مشکلات خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، شوری خاک است؛ زیرا در این مناطق به علت بارندگی کم و اقلیم خشک، املاح تجمع پیدا کرده و در نتیجه خاک‌ها شور می‌شوند. شبکه‌های زهکشی با ایجاد امکان آیشویی، کنترل شوری خاک را میسر می‌سازد. جمع‌آوری و تخلیه آب مازاد و نمک‌های خاک، اراضی کشاورزی را از ماندابی و شور شدن نجات می‌دهد. زهکشی همچنین باعث تهویه در خلل و خرج خاک شده و تنفس ریشه گیاه را نیز تضمین می‌کند. وجود بیش از ۴۰۰ هزار هکتار از اراضی جنوب ایران که به دلیل محدودیت شدید شوری از پتانسیل تولید بسیار ضعیفی برخوردار است، اهمیت طرح‌های زهکشی زیرزمینی را در ایران مشخص می‌نماید. شبکه‌های زهکشی موجب کنترل شوری و احیای اراضی می‌شوند؛ اما اثرات ناخواسته زیست‌محیطی که به همراه دارند، در سال‌های اخیر تبدیل به چالشی بزرگ در مناطق دارای شبکه‌های زهکشی شده است. تحقیقات زیادی توسط محققانی نظیر Mazandaranizadeh (2016)، Nazari et al. (2008)، Sotoodehnia et al. (2014) و Rajabzadeh et al. (2011) در خصوص اثرات زیست‌محیطی اجرای طرح‌های زهکشی انجام شده است.

در گذشته در مناطق نیمه‌خشک با آب زیرزمینی شور و کم‌عمق، سامانه‌های زهکشی به‌منظور پایین نگه‌داشتن سطح ایستابی از عمق ریشه طراحی و اجرا می‌گردید. لیکن امروزه در زمینه زهکشی نگرش‌های جدیدی مطرح گردیده است. در نگرش جدید علاوه بر هدف کنترل سطح ایستابی، کاهش میزان زه‌آب خروجی جهت حفاظت از منابع آب‌و خاک نیز به‌عنوان هدف در نظر گرفته می‌شود. در تحقیق Mokhtaran et al. (2013) بررسی اثر عمق زهکش بر دبی خروجی از زهکش نشان داد با کاهش عمق زهکش دبی زهاب خروجی به‌شدت کاهش می‌یابد. زهکشی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با خارج کردن نمک اضافی از خاک همراه است، بر اساس تعریف بانک جهانی، زهکشی فرآیند خارج کردن آب سطحی اضافی و مدیریت سفره آب زیرزمینی کم‌عمق از طریق نگهداشت و دفع آب و مدیریت کیفیت آب برای رسیدن به منافع دلخواه اقتصادی و اجتماعی در ضمن حفظ محیط‌زیست است (Nijland et al., 2005). در حال حاضر استفاده مجدد از زه‌آب‌های کشاورزی و پساب فاضلاب‌ها، به‌ویژه در مناطق کم‌آب و مواجه با تنش آبی یکی از راهکارهای مقابله با بحران کم‌آبی است. تحقیقات Adimi (2006) نشان می‌دهد مصرف آبی که به شکل‌های مختلف توسط پساب واحدهای صنعتی، خانگی و کشاورزی آلوده شده است می‌تواند پیامدهای خطرناکی در پی داشته و

پارامترهای فاصله و قطر لوله زهکش توسط الگوریتم بهینه‌سازی حدس زده می‌شود. سپس، با استفاده از معادله هوخهات، عمق نصب و غلظت زهاب محاسبه می‌شود. از بین جواب‌های به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، توسط روش‌های تقسیم عادلانه منافع نقطه مطلوب نهایی به دست می‌آید.

۲-۱- مطالعه موردی: شرکت کشت و صنعت سلمان فارسی

شرکت کشت و صنعت سلمان فارسی در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب اهواز و در مسیر جاده اهواز-آبادان واقع است. منبع اصلی تأمین آب مورد نیاز آبیاری مزارع نیشکر، رودخانه کارون است که در فاصله دو کیلومتری در غرب اراضی طرح قرار دارد (Mazdaranizadeh, 2016). طول رودخانه کارون تقریباً ۸۹۰ کیلومتر بوده و آبرسانی از طریق ایستگاه پمپاژ متمرکز و با استفاده از کانال‌های آبرسانی اصلی و فرعی و لوله‌های اصلی آبیاری انجام می‌گیرد. در جدول ۱ اطلاعات کمی و کیفی مطالعه موردی ارائه شده است.

Table 1- Quantitative and qualitative information of the case study (Salman Farsi agro-industry)

جدول ۱- اطلاعات کمی و کیفی مطالعه موردی (کشت و صنعت سلمان فارسی)

Parameter	Description	Unit	Value
k_{up}	Hydraulic conductivity above the drainage	$m.day^{-1}$	1
k_{down}	Hydraulic conductivity under the drainage	$m.day^{-1}$	1
q	Drainage coefficient	$mm.day^{-1}$	6
S	Impermeable layer depth	m	6
W	Preliminary water-table depth	m	1.5
H	Stabilization depth of water-table	m	1
C_{up}	Salinity of irrigation water	$dS.m^{-1}$	2.5

کیفیت و دبی رودخانه کارون طی ماه‌های مختلف سال متغیر بوده و کیفیت آن به میزان جریان وابسته است. به‌طور معمول حداقل غلظت املاح در بهار و اوایل تابستان و حداکثر آن در اواخر تابستان و اوایل پاییز است. بر اساس تحقیق (Mazdaranizadeh, 2016) بیشترین غلظت شوری این رودخانه در فصل تابستان و برابر ۲/۵ دسی زیمنس بر متر گزارش شده است. همچنین بر اساس تحقیق (Rajabzadeh et al., 2011) نیمرخ شوری خاک قبل از آبیاری با استفاده از رابطه (۱) قابل‌نمایش است:

کم‌عمق به خروج مقادیر کمتری از نمک در کوتاه‌مدت منجر خواهد شد ولی در درازمدت با توجه به شوری زیاد لایه‌های پایینی، نمک بیشتری به محیط‌زیست وارد می‌شود. از آنجاکه بسیاری از مسائل از ماهیت چندهدفه برخوردار هستند و امکان حل آن‌ها با روش‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه ممکن نیست، بهینه‌سازی چندهدفه مورد توجه محققین قرار گرفته است از آن جمله می‌توان به (Mazdaranizadeh, 2016) و (Banihabib et al., 2017) اشاره کرد که با استفاده از الگوریتم NSGA-II اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به ترتیب درزمینه طراحی زهکش زیرزمینی و مسئله بازتوزیع آب کشاورزی نموده‌اند.

بررسی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد در اغلب آن‌ها منظور از صدمات وارد به محیط‌زیست، فقط آثار زیست‌محیطی بعد از اجرای آبیاری اولیه و در هنگام بهره‌برداری است، به‌عبارت‌دیگر در آن مدل‌ها فقط آثار بلندمدت ناشی از اجرای طرح‌های زهکشی اعمال شده است. درحالی‌که پس از اجرای هر طرح زهکش و پیش از بهره‌برداری کامل از سیستم، عملیات آبیاری انجام می‌شود. در این عملیات تقریباً تمام نمک بالای سطح زهکش در مدت نسبتاً کوتاهی تخلیه و وارد طبیعت می‌شود، این اثر به‌عنوان یک اثر کوتاه‌مدت زیست‌محیطی شناخته می‌شود. با توجه به اینکه هدف کوتاه‌مدت و بلندمدت زیست‌محیطی در طرح‌های زهکشی در تضاد با یکدیگر بوده و بهبود یکی منجر به تضعیف دیگری می‌شود، در این تحقیق به تعیین عمق بهینه نصب زهکش زیرزمینی با استفاده از مدل بهینه‌سازی دوهدفه با هدف کاهش هم‌زمان آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت زیست‌محیطی پرداخته شده است. به این منظور از مدل بهینه‌سازی چندهدفه بازپخت فلزات (AMOSA) که مدلی بر پایه مدل بهینه‌سازی بازپخت فلزات (SA) و مختص حل مسائل چندهدفه است، استفاده شده و با توجه به اینکه خروجی مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه تعدادی جواب بهینه است به‌منظور انتخاب جواب نهایی از بین جواب‌های به‌دست‌آمده، روش‌های تقسیم عادلانه منافع مورد استفاده قرار گرفته است. شایان‌ذکر است در این تحقیق، هدف اقتصادی برخلاف تحقیقات گذشته که به‌عنوان یکی از اهداف طراحی زهکش در نظر گرفته شده است، لحاظ نشده است و طراحی زهکش صرفاً بر اساس تقابل دو هدف زیست‌محیطی کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

از آنجاکه هدف از انجام این مطالعه محاسبه پارامترهای طراحی زهکش به‌منظور کمینه نمودن خسارت‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت زیست‌محیطی ناشی از بهره‌برداری زهکش زیرزمینی است، در ابتدا

زهکش برحسب میلی‌متر بر روز، q ضریب زهکشی، d_e عمق معادل فاصله محل زهکش تا لایه غیرقابل نفوذ برحسب متر، h ارتفاع سفره آب در بالا و بین دو خط زهکش برحسب متر، L فاصله زهکش‌ها برحسب متر، D فاصله عمودی میان عمق نصب زهکش و لایه نفوذناپذیر برحسب متر، R شعاع لوله زهکش و u محیط خیس شده لوله زهکش برحسب متر است. شکل ۲ به نمایش پارامترهای به‌کاررفته در معادله هوخهات می‌پردازد.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه AMOSA

الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برخلاف الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه به جواب نهایی یکتا منجر نمی‌شود، خروجی نهایی این الگوریتم‌ها تعدادی جواب بهینه است که جبهه پارتو^۲ نامیده می‌شود و نسبت به یکدیگر نامغلوب هستند. در روش AMOSA که توسط Bandyopadhyay et al. (2008) توسعه یافته است، از دو مفهوم غلبه کامل و غلبه نسبی جواب‌ها بر یکدیگر استفاده شده است.

الف- غلبه کامل جواب‌ها بر یکدیگر: اگر x_1 و x_2 دو بردار جواب از مسئله بهینه‌سازی M هدفه باشند، x_1 غالب و x_2 جواب مغلوب خوانده می‌شود اگر و تنها اگر x_1 در تمام اهداف بهتر یا مساوی با x_2 باشد $(f_i(x_1) \geq f_i(x_2), \forall i=1,2,3...M)$ و حداقل در یک هدف بهتر باشد $(f_i(x_1) > f_i(x_2), \exists i=1,2,3...M)$.

در این رابطه $f_i(x_j)$ مقدار تابع هدف i ام به ازای جواب x_j است. بر اساس شکل ۳ اگر هدف‌های f_1 و f_2 هر دو بیشینه‌سازی باشند، نواحی B و D شامل جواب‌های نامغلوب با جواب x است، ناحیه A شامل جواب‌های مغلوب توسط x و ناحیه C شامل جواب‌های غالب بر جواب x هستند.

$$C=50.91 d^{-0.35} \quad (1)$$

که d عمق خاک برحسب متر و C شوری خاک برحسب دسی‌زیمنس بر متر است. شکل (۱) تغییرات شوری را در عمق خاک پیش از آبیویی اولیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین تجمع نمک قبل از آبیویی در نواحی نزدیک به سطح است به عبارت دیگر در اثر آبیویی اولیه املاح واقع در بالایی سطح زهکش شسته شده و به محیط تخلیه می‌گردد.

۲-۲- معادله هیدرولیکی محاسبه غلظت زهاب خروجی

با فرض شکل‌گیری جریان ماندگار، دبی و غلظت زهاب خروجی از زهکش در هنگام بهره‌برداری از رابطه هوخهات قابل محاسبه است (Mazandaranzadeh, 2016):

$$C_{\text{drain}} = C_{\text{up}} \times \frac{4k_{\text{up}}h^2}{L^2} + C_{\text{down}} \times \frac{8k_{\text{up}}d_e h}{L^2} \quad (2)$$

$$q = \frac{4k_{\text{up}}h^2 + 8k_{\text{down}}d_e h}{L^2} \quad (3)$$

$$d_e = \frac{D}{\left(\frac{8D}{\pi L} \ln\left(\frac{D}{u}\right)\right) + 1} \quad \text{if } D < \frac{1}{4}L \quad (4)$$

$$d_e = \frac{\pi L}{8 \ln \frac{L}{u}} \quad \text{if } D > \frac{1}{4}L \quad (5)$$

$$u = \pi R^2 \quad (6)$$

در معادله بالا C_{drain} غلظت شوری خروجی از زهکش، C_{up} و C_{down} به ترتیب غلظت آب ناحیه بالا و پایین زهکش برحسب دسی‌زیمنس بر متر، k_{down} و k_{up} به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع بالا و پایین سطح

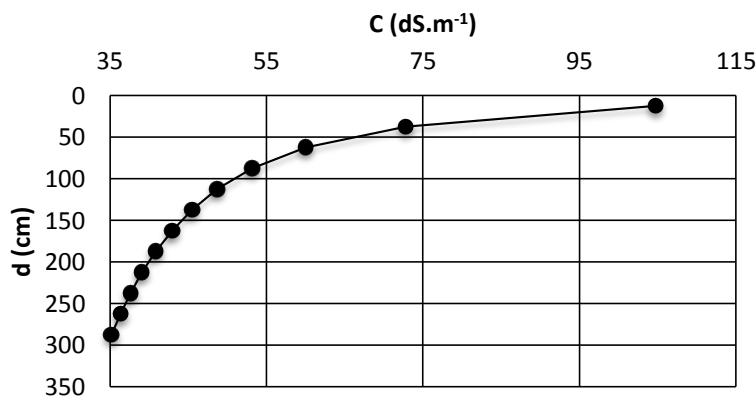


Fig. 1- Soil salinity profile before leaching

شکل ۱- نیمرخ شوری خاک قبل از آبیویی

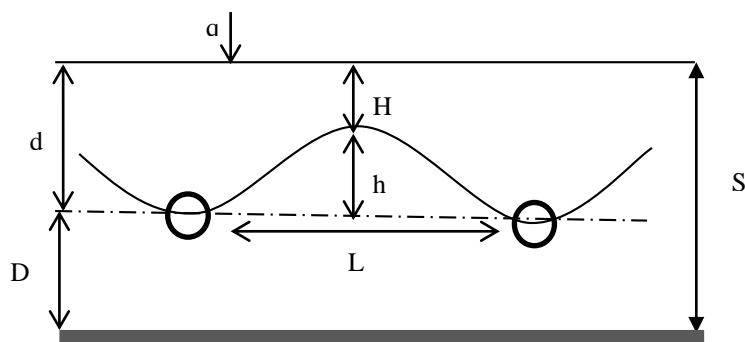


Fig. 2- Hooghoudt equation parameters

شکل ۲- نمایش پارامترهای به کاررفته در معادله هوخهاوت

به دست آمده، روش های مختلفی از جمله روش های زیر پیشنهاد شده اند. روش نش متقارن^۳: این روش که توسط Nash (1953) به منظور حل بازی های همکارانه معرفی گردید، بر مبنای بیشینه سازی فاصله همه هدف ها از حداقل مقدار آنها است.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \prod_{i=1}^m (f_i - \bar{f}_i) \\ & \text{Subject to:} \\ & \bar{f}_i \leq f_i \leq \bar{f}_i^+ \end{aligned} \quad (8)$$

که \bar{f}_i تابع هدف \bar{f}_i و \bar{f}_i^+ به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف \bar{f}_i هستند.

روش نش نامتقارن^۴: این روش که توسط Harsanyi and Selten (1972) معرفی گردید برای مواردی که در روش نش، اهداف از درجه اهمیت متفاوتی برخوردار باشند، با استفاده از توان های متفاوت برای هدف های مختلف قابل اعمال است.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \prod_{i=1}^m (f_i - \bar{f}_i)^{w_i} \\ & \text{Subject to:} \\ & \bar{f}_i \leq f_i \leq \bar{f}_i^+ \end{aligned} \quad (9)$$

w_i درجه اهمیت تابع هدف \bar{f}_i است.

روش Kalai-Smorodinsky: نقطه تقسیم عادلانه در این روش که توسط Kalai and Smorodinsky (1975) ارائه شد، نقطه تقاطع منحنی پارتو نرمال شده با خط ترسیمی از مبدأ است. ضریب زاویه خط ترسیم شده، نشان دهنده درجه اهمیت هدف های مختلف است. به عبارت دیگر نقطه تقسیم عادلانه جواب معادله

$$\bar{f}_1 + \left[\frac{(f_2^+ - \bar{f}_2)}{(f_1^+ - \bar{f}_1)} \right] \left(f_1 - \bar{f}_1 \right) \left(\frac{w_2}{w_1} \right) - f_2 = 0$$

هدف \bar{f}_1 است. چنانچه درجه اهمیت اهداف برابر باشد خط ترسیم

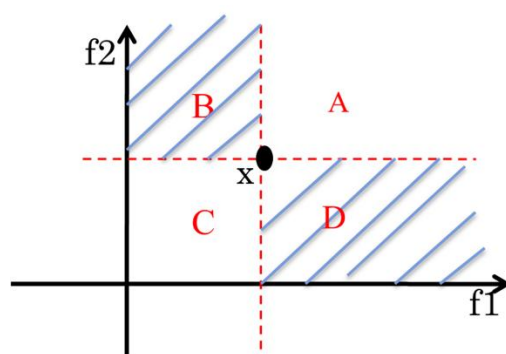


Fig. 3- Dominant and non-dominant answers

شکل ۳- جواب های غالب و نامغلوب

ب- غلبه نسبی جواب ها بر یکدیگر: مقدار غلبه بین دو جواب x_1 و x_2 برابر $\Delta \text{dom}_{x_1, x_2}$ است. R_i محدوده تغییرات هدف \bar{f}_i است.

$$\Delta \text{dom}_{x_1, x_2} = \prod_{i=1}^m (|f_i(x_1) - f_i(x_2)| / R_i) \quad (10)$$

الگوریتم از دمای بیشینه اولیه (T_{Initial}) آغاز و به تدریج با آهنگ یکنواخت $T_{i+1} = \lambda \cdot T_i$ کاهش یافته تا به دمای نهایی (T_{Final}) برسد. پارامتر کاهش دمای عددی بین صفر و یک است. در شروع الگوریتم تعدادی جواب به طور تصادفی ساخته شده و پس از مقایسه میان آنها، جواب هایی که با یکدیگر نامغلوب هستند در مجموعه ای به نام آرشیو ذخیره می شود. از آرشیو ساخته شده برای ایجاد جواب های بعدی کمک گرفته می شود. نحوه عملکرد الگوریتم AMOSA در شکل ۴ به صورت یک شبه کد نمایش داده شده است. n تعداد دفعات اجرای مدل در هر دمای k تعداد نقاطی از آرشیو است که بر جواب فعلی غلبه می کند.

۲-۴- روش های تقسیم عادلانه منافع

از آنجاکه مدل های بهینه سازی چندهدفه دارای جواب منحصر به فرد و یکتایی نیستند، برای یافتن جواب نهایی در بین جواب های نامغلوب

شده، نیمساز است. شکل ۵ نحوه محاسبه تقسیم عادلانه را به روش Kalai-Smorodinsky نمایش می‌دهد.

```

- Set  $T_{Initial}, T_{Final}, \lambda, n$ 
- Create an archive with non-dominated solutions
- Random selection of the archive (Current-pt)
-  $T_i = T_{Initial}$ 
- While  $T_i > T_{Final}$ 
  -  $i = 1$ 
  - While  $i < n$ 
    - Creating a new solution (New-pt) by changing in Current-pt
    - Check the status of dominance between New-pt and Current-pt
    -  $i = i + 1$ 

    ○ Case 1: if Current-pt and  $k, (k \geq 0)$  points of archive dominate New-pt then New-pt is selected as the Current-pt with a probability of  $P$ 

    
$$P = \frac{1}{1 + \exp(\Delta dom_{avg} \times T_i)}$$


    
$$\Delta dom_{avg} = \frac{(\sum_{j=1}^k \Delta dom_{i,new}) + \Delta dom_{current,new}}{(k+1)}$$


    ○ Case 2: if New-pt and Current-pt are nondominating to each other

    I: if New-pt is dominated by  $k, (k \geq 1)$  points in archive then New-pt is selected as the Current-pt with a probability of  $P$ 

    
$$\Delta dom_{avg} = \frac{(\sum_{i=1}^k \Delta dom_{i,new})}{k}$$


    
$$P = \frac{1}{1 + \exp(\Delta dom_{avg} \times T_i)}$$


    II: if New-pt is nondominating with all the points in the archive then set the New-pt as the Current-pt and add it to archive
    III: if New-pt dominates  $k, (k \geq 1)$  points of the archive then set the New-pt as the Current-pt and add it to archive, remove all the  $k$  dominated points from the archive

    ○ Case 3: if New-pt dominates Current-pt

    I: if New-pt is dominated by  $k, (k \geq 1)$  points in archive then set point of the archive which corresponds to the  $\Delta dom_{min}$  as the Current-pt with probability  $P$ 

    
$$\Delta dom_{min} = \min \{ \Delta dom_{i,new} \quad i=1,2,\dots,k \}$$


    
$$P = \frac{1}{1 + \exp(-\Delta dom_{min})}$$


    II: if New-pt is nondominating with all the archive points then select the New-pt as the Current-pt
    III: if New-pt dominates  $k$  points in archive then set the New-pt as the Current-pt and all the  $k$  dominated points from the archive

  End While
  -  $T_i = \lambda T_i$ 
End While

```

Fig. 4- The proposed multi-objective algorithm pseudo code

شکل ۴- شبیه کد الگوریتم چندهدفه پیشنهادی

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } C_{S\text{-Term}} \quad \text{and} \quad \text{Min } C_{L\text{-Term}} \\
 & \text{S.T:} \\
 & C_{S\text{-Term}} = \int_0^d 255.21 d^{-0.35} \\
 & C_{L\text{-Term}} = C_{up} \times \frac{\frac{4k_{up}h^2}{L^2}}{4k_{up}h^2 + 8k_{down}d_e h} \\
 & + C_{down} \times \frac{\frac{8k_{up}d_e h}{L^2}}{4k_{up}h^2 + 8k_{down}d_e h} \\
 & 1 \leq d \leq 3 \\
 & R \in \{0.1, 0.125\}
 \end{aligned} \tag{11}$$

در رابطه فوق $C_{S\text{-Term}}$ و $C_{L\text{-Term}}$ به ترتیب غلظت شوری خارج شده در کوتاه مدت و بلندمدت است. پارامترهای فاصله (L) و شعاع لوله زهکش (R)، متغیرهای تصمیم مسأله هستند که توسط مدل بهینه سازی AMOSA تخمین زده می شود، سپس توسط رابطه هوخهات (معادله ۳) عمق نصب محاسبه می شود. دامنه تغییرات عمق نصب لوله زهکش (d) با توجه به گیاه مورد نظر (نیشکر) از یک تا سه متر است و همچنین شعاع های تجاری موجود در بازار شامل شعاع های ۰/۱ و ۰/۱۲۵ متر است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج حاصل از مدل AMOSA

مدل بهینه سازی چندهدفه AMOSA به ازای پارامترهای $n = 11$ بر روی $T_{Initial} = 5000$, $T_{Final} = 100$, $\lambda = 0.99$ مطالعه موردی اعمال گشت. نتایج حاصل از اجرای این مدل در شکل ۶ ارائه شده است. محور افقی نشان دهنده تابع هدف کوتاه مدت شوری ناشی از آبشویی اولیه ($C_{S\text{-Term}}$) و محور قائم شوری خارج شده در درازمدت ($C_{L\text{-Term}}$) را نمایش می دهد.

بر اساس این نمودار دامنه تغییرات $C_{S\text{-Term}}$ از حدود ۷۰ تا ۱۰۱ و $C_{L\text{-Term}}$ از حدود ۹ تا ۲۴ دسی زیمنس بر متر متغیر است. همان گونه که مشاهده می شود بهبود یکی از اهداف منجر به تضعیف دیگری شده است و بالعکس. در جدول ۲ تعدادی از جواب های بهینه پارتو آمده است. ستون های اول تا سوم به عمق، فاصله و شعاع بهینه اختصاص دارد و ستون چهارم غلظت شوری آبشویی اولیه ($C_{S\text{-Term}}$) و ستون پنجم شوری بلندمدت ($C_{L\text{-Term}}$) را نمایش می دهد.

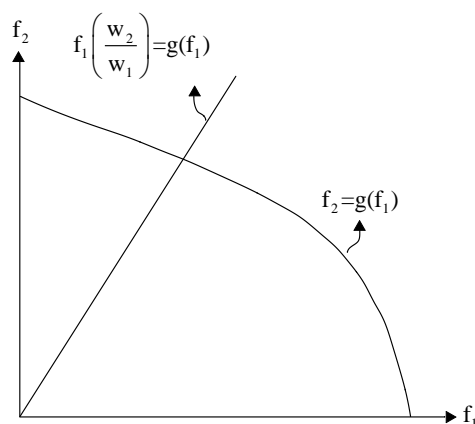


Fig. 5- Kalai-Smorodinsky optimum point
شکل ۵- انتخاب نقطه بهینه بر اساس روش
Kalai-Smorodinsky

روش Monotonic Area: برای محاسبه نقطه تقسیم عادلانه در این روش از مساحت زیر منحنی پارتو به دست آمده استفاده می شود، به نحوی که نقطه تعادل در این روش نقطه ای است که مساحت زیر منحنی پارتو را به دو قسمت متناسب با درجه اهمیت اهداف تقسیم نماید. بر اساس تحقیق Rouhparvar et al. (2014) اگر اهمیت اهداف برابر نباشد، در نتیجه توان اختصاص داده شده به آن ها نیز برابر نبوده و خط متمایل به سمت هدف با اهمیت بیشتر می شود. با استفاده از حل معادله غیرخطی (۹)، نقطه تعادل قابل محاسبه است. نقطه $(f_1^*, f_2^* = g(f_1^*))$ نقطه تعادل مسئله است.

$$\begin{aligned}
 & w_2 \left[\int_{f_1^*}^{f_1^+} g(t) dt - \frac{1}{2} (f_1^* - f_1^-) (g(f_1^*) + f_2^-) \right] \\
 & = w_1 \left[\int_{f_1^*}^{f_1^+} g(t) dt - (f_1^- - f_1^*) f_2^- + \frac{1}{2} (f_1^* - f_1^-) (g(f_1^*) - f_2^-) \right]
 \end{aligned} \tag{10}$$

۲-۵- مدل دوهدفه زیست محیطی پیشنهادی

آبشویی اولیه برای ایجاد شرایط مناسب کشت گیاهان در خاک هایی که شوری بالایی دارند صورت می گیرد. خارج کردن این مقدار نمک و وارد شدن حجم بالایی زه آب به محیط در مدت زمان کوتاه نیز به محیط زیست آسیب وارد می کند. همچنین بنا بر معادله هوخهات و به واسطه شوری خاک زیر زهکش، در هنگام بهره برداری نیز حجم قابل توجهی از نمک در درازمدت به محیط زیست تخلیه می شود. در مدل پیشنهادی کاهش اثرات بلندمدت و کوتاه مدت زیست محیطی به طور هم زمان مورد توجه قرار گرفته است. به این ترتیب تابع هدف این مدل شامل دو تابع هدف کوتاه مدت و بلندمدت زیست محیطی است.

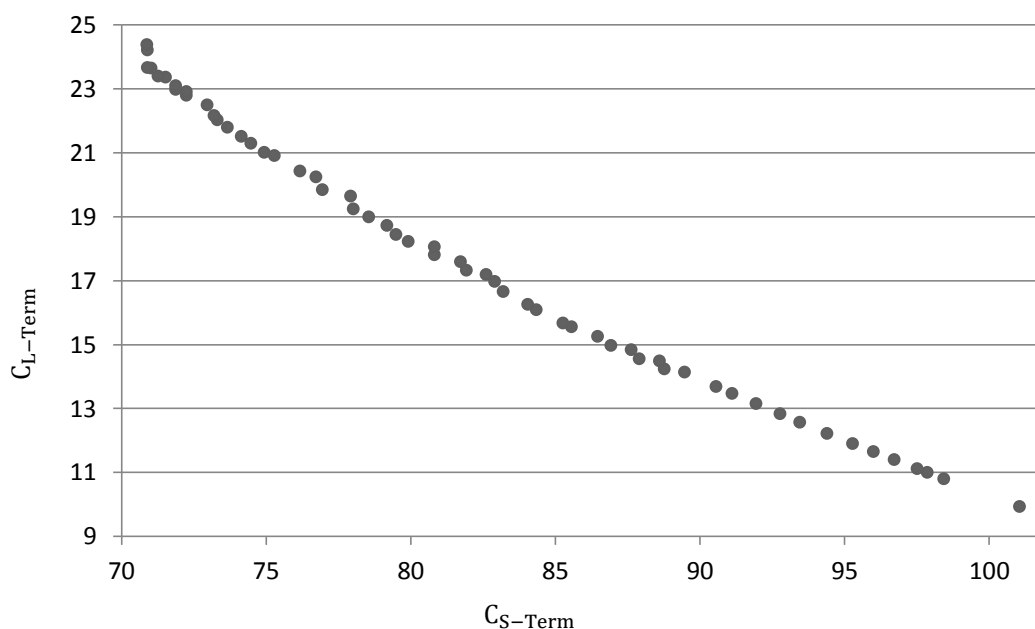


Fig. 6- Pareto optimal frontier; salinity of primary leaching vs. the operational leaching
شکل ۶- جبهه بهینه پارتو، غلظت آبشویی اولیه در برابر غلظت زه آب بهره‌برداری

نش نامتقارن، Kalai-Smorodinsky و Monotonic Area را نمایش می‌دهد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد تغییرات عمق بهینه نصب، به ازای روش‌های مختلف تقسیم منافع از ۱/۴۵ تا ۲ متر متغیر است، به گونه‌ای که اگر دو هدف از درجه اهمیت یکسان برخوردار باشند عمق بهینه نصب از روش‌های مختلف در حدود ۱/۷۵ متر است و اگر کاهش شوری خروجی در کوتاه‌مدت از اهمیت بیشتری نسبت به بلندمدت برخوردار باشد عمق نصب به حدود ۱/۴۵ متر کاهش می‌یابد و همچنین اگر تابع هدف بلندمدت زیست‌محیطی از اهمیت بیشتری برخوردار باشد عمق نصب به حدود ۲ متر افزایش می‌یابد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

با نگاه دقیق به سامانه‌های زهکشی موجود و مشکلات آن‌ها می‌توان به اهمیت تعیین بهینه پارامترهای طراحی این سامانه‌ها پی برد. در گذشته بیشتر به جنبه بلندمدت زیست‌محیطی ناشی از اجرای طرح‌های زهکشی پرداخته می‌شده است، در این تحقیق تلاش شده است تا مدلی برای انتخاب بهینه پارامترهای طراحی ارائه شود به گونه‌ای که هم اثرات بلندمدت مدت ناشی از تخلیه زه‌آب و هم اثرات کوتاه‌مدت ناشی از آبشویی اولیه را مدنظر قرار دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود درحالی‌که دامنه تغییرات عمق بهینه از ۱/۱۰ تا ۲/۷۳ متر، فاصله بهینه از ۱۵ تا ۷۰ متر است، شعاع بهینه انتخاب‌شده در عمق‌های کمتر از ۱/۷۰ متر برابر ۰/۱ متر و در سایر عمق‌ها از لوله به شعاع ۰/۱۲۵ متر استفاده شده است. همچنین به ازای عمق‌های کم نصب، مقدار شوری خارج‌شده در کوتاه‌مدت کم است در حالی در همین عمق‌ها شوری خارج‌شده در درازمدت مقادیر قابل‌توجهی هستند. دلیل این موضوع را می‌توان به شکل ۱ نسبت داد، مطابق شکل ۱ هر چه عمق نصب کمتر باشد مقدار کمتری از خاک در آبشویی اولیه شسته می‌شود، درحالی‌که با توجه به مجاورت با خاک با شوری زیاد، در درازمدت باعث خروج نمک زیادی خواهد شد. همچنین هرچند که در عمق نصب زیاد، مقدار زیادی نمک در ابتدا شسته می‌شود لیکن در درازمدت مقادیر کمتری از نمک خارج خواهد شد. همچنین به ازای عمق‌های کم نصب، آبشویی اولیه کم‌ترین آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌کند، در صورتی‌که این عمق‌ها در بلندمدت موجب خروج زه‌آب باکیفیت پایین به محیط‌زیست می‌شوند.

۳-۲- نتایج حاصل از مدل‌های تقسیم عادلانه منافع

همان‌گونه که مشاهده شد نتایج مدل بهینه‌سازی چندهدفه اجراشده دامنه وسیعی از جواب‌ها از عمق کم تا عمق زیاد را در برمی‌گیرد. لذا به‌منظور انتخاب یک عمق نصب نهایی از مدل‌های تقسیم منافع عادلانه استفاده شده است. جدول ۳ نتایج حاصل از مدل‌های نش،

Table 2- Some Pareto optimum results obtained from the two-objective environmental model

جدول ۲- تعدادی از نتایج بهینه پارتو حاصل از مدل دوهدفه زیست محیطی

Depth (m)	Distance (m)	Radius (m)	C_{S-Term} ($dS.m^{-1}$)	C_{L-Term} ($dS.m^{-1}$)
1.10	15.35	0.10	70.90	23.68
1.20	23.00	0.10	73.20	22.12
1.30	29.52	0.10	75.62	20.67
1.40	35.14	0.10	78.03	19.33
1.50	38.92	0.10	79.81	18.38
1.60	43.10	0.10	81.94	17.58
1.70	46.61	0.125	83.75	16.70
1.80	50.19	0.125	85.84	15.72
1.90	52.86	0.125	87.49	14.99
2.00	55.60	0.125	89.27	14.24
2.15	59.10	0.125	91.72	13.26
2.25	61.42	0.125	93.46	12.60
2.40	64.31	0.125	95.78	75.11
2.50	65.98	0.125	97.22	11.24
2.66	68.54	0.125	99.63	10.42
2.73	69.56	0.125	100.67	10.08

Table 3- Final optimum solution among the Pareto optimal solutions

جدول ۳- جواب بهینه نهایی از میان جواب‌های بهینه پارتو

Method	Depth (m)	Distance (m)	Radius (m)	C_{S-Term} ($dS.m^{-1}$)	C_{L-Term} ($dS.m^{-1}$)
Symmetric Nash	1.75	48.23	0.13	84.68	16.26
Non-Symmetric Nash $w_1=2, w_2=1$	2.00	55.60	0.13	89.27	14.24
Non-Symmetric Nash $w_1=1, w_2=2$	1.45	38.92	0.10	78.77	18.85
Kalai-Smorodinsky $w_1=1, w_2=1$	1.70	46.61	0.13	83.75	16.70
Kalai-Smorodinsky $w_1=2, w_2=1$	1.94	53.80	0.13	88.09	14.74
Kalai-Smorodinsky $w_1=1, w_2=2$	1.47	37.75	0.10	79.29	18.61
Monotonic Area	1.73	47.57	0.13	84.30	16.44

آسیب را به محیط زیست وارد می‌کند، در صورتی که این عمق‌ها در بلندمدت موجب خروج زه‌آب با کیفیت پایین به محیط زیست می‌شوند. همچنین، به منظور انتخاب جواب نهایی از بین جواب‌های ارائه شده توسط مدل AMOSA از مدل‌های تقسیم عادلانه منافع نش، Kalai-Smorodinsky و Monotonic Area استفاده شد نتایج

مدل ارائه شده مدل بهینه‌سازی چندهدفه AMOSA، مدلی بر مبنای SA است. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که مقدار غلظت آبشویی اولیه جواب‌های بهینه از حدود ۷۱ تا ۱۰۱ دسی‌زیمنس بر متر و غلظت زه‌آب بهره‌برداری نیز بین ۱۰ تا ۲۴ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است. به این ترتیب به ازای عمق‌های کم نصب، آبشویی اولیه کم‌ترین

Kalai E and Smorodinsky M (1975) Other solutions to Nash's bargaining problem. *Econometrica* 43:513-518

Konukcu F, Gowing G W and Rose D A (2005) Dry drainage: A sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas. *Agricultural Water Management* 83(1):1-12

Mazandaranzadeh H (2016) Drainage system design by NSGA-II multi objective algorithm using economic and environmental approach. *Journal of Iran-Water Resources Research* 12(3):142-152 (In Persian)

Mokhtaran R, Naseri A, Kashkuli H A and Boroomandnasab S (2013) Effect of drainage depth and impermeable layer on the flow rate and drainage water salinity in the irrigated soils of south Khuzestan. *Journal of Soil and Water Conservation* 3(1):61-73 (In Persian)

Nash J (1953) Two-Person Cooperative Games. *Econometrica* 21(1):128-140

Nijland H J, Croon F W and Ritzema H P (2005) Subsurface drainage practices: Guidelines for the implementation, operation and maintenance of subsurface pipe drainage systems. Alterra, Wageningen, The Netherlands, 607p

Nazari B, Liaghat A, Parsinejad M and Naseri A (2008) Optimization of drainage depth based on the economical and environmental aspects. 5th workshop on Drainage and Environmental Engineering (In Persian)

Rajabzadeh F, Pazira E and Mahdian M H (2011) Studies on appropriate and an empirical model for salt leaching of Saline-Sodic soils of central part of Khuzestan province. *Journal of Water and Soil Conservation* 18(3):61-84 (In Persian)

Rouhparvar M, Mazandaranzadeh H and Nasirzadeh F (2014) Quantitative risk allocation in construction projects: a fuzzy-bargaining game approach. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research* 25(2):83-94

Sotoodehnia A, Razi F and Daneshkar Arasteh P (2014) Using SEEP/W numerical model to simulate drain installation depth effects on drain water salinity improvement. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 8(1):187-196 (In Persian)

نشان می‌دهد که اگر دو هدف از درجه اهمیت یکسان برخوردار باشند عمق بهینه نصب از روش‌های مختلف در حدود ۱/۷۵ متر است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Archived Multi-Objective Simulated Annealing (AMOSA)
- 2- Pareto Frontier
- 3- Symmetric Nash Solution
- 4- Non-Symmetric Nash Solution

۵- مراجع

Adimi M (2006) A brief outlook on the current situation, challenges and approaches of drainage in Iran. 4th workshop on Drainage and Environmental Engineering (In Persian)

Bandyopadhyay S, Saha S, Maulik U and Deb K (2008) A simulated annealing-based multi-objective optimization algorithm: AMOSA. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 12(3):269-283

Banihabib ME, Mohammad Rezapour Tabari M, Mohammad Rezapour Tabari M (2017) Development of integrated multi-objective strategy for reallocation of agricultural water. *Journal of Iran-Water Resources Research* 13(1):38-52 (In Persian)

Corwin DL, Rhoades JD and Simunek J (2007) Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agricultural Water Management* 90(3):165-180

Gaarde V S, Bernstein J, Rhoades L and Rawlins S L (1974) Irrigation management of salt control. *Journal of Irrigation and Drainage Division* 100:321-338

Hanson B R, Grattan S R and Fulton A (2006) *Agricultural salinity and drainage*. California University Davis, California, 164p

Harsanyi J and Selten R (1972) A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information. *Management Science* 18(5):80-106