

ارائه مدل جدید DEA شبکه‌ای مبتنی بر تابع فاصله‌ی جهت‌دار برای پردازش همزمان داده‌های منفی و مقدار صحیح

حسین عزیزی^{۱*}، سمیه رشید^۲

۱. استادیار، گروه ریاضی، واحد پارس‌آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، پارس‌آباد مغان، ایران
۲. دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه ریاضی، واحد پارس‌آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، پارس‌آباد مغان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

چکیده

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) به‌عنوان یک روش غیرپارامتری و داده‌محور، ابزاری کارآمد برای ارزیابی کارایی نسبی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUها) با چندین ورودی و خروجی است. با این حال، مدل‌های کلاسیک DEA ساختار درونی DMUها را نادیده می‌گیرند و آن‌ها را به‌عنوان جعبه‌های سیاه در نظر می‌گیرند. برای رفع این محدودیت، DEAی شبکه‌ای توسعه یافته است که تعاملات درونی بین اجزای DMU را به‌طور صریح مدل‌سازی می‌کند. علاوه بر این، در بسیاری از کاربردهای واقعی، برخی متغیرهای ورودی، خروجی یا محصولات بینابینی دارای ماهیت گسسته و مقادیر صحیح هستند و حتی ممکن است داده‌های منفی نیز وجود داشته باشد. این ویژگی‌ها در مدل‌های مرسوم DEA نادیده گرفته می‌شوند و می‌توانند منجر به برآوردهای نادرست و غیرعملی گردند. در این مقاله، یک مدل DEAی شبکه‌ای مبتنی بر تابع فاصله‌ی جهت‌دار برای سیستم‌های سری دو بخشی ارائه می‌شود که قابلیت پردازش همزمان داده‌های منفی و مقدار صحیح را داراست. مدل پیشنهادی با تعریف مناسب بردار جهت، امکان اندازه‌گیری کارایی سیستم تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر را فراهم می‌کند. برای نمایش قابلیت‌های مدل پیشنهادی، یک مطالعه‌ی موردی بر روی ۲۹ زنجیره‌ی تأمین ایرانی در صنعت تجهیزات مصرفی پزشکی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نه تنها قادر است DMUهای کارا و ناکارا را به‌درستی تفکیک کند، بلکه با ارائه‌ی نقاط تصویر، مسیر دقیق اصلاح عملکرد هر بخش را نیز مشخص می‌سازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری معتبر برای ارزیابی و بهبود کارایی زنجیره‌های تأمین، به‌ویژه در صنایع حساس نظیر تجهیزات پزشکی، مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، DEAی شبکه‌ای، تابع فاصله‌ی جهت‌دار، داده‌های منفی، داده‌های مقدار صحیح، زنجیره‌ی تأمین.



۱- مقدمه و بیان مسئله

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^۱، که نخستین بار توسط چارنزا^۲ و همکاران [۱] مطرح شد، رویکردی داده‌محور و غیرپارامتری برای اندازه‌گیری کارایی نسبی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUها)^۳ با ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه است [۲-۴]. از زمان انتشار اولیه، پژوهش‌های بنیادی و کاربردی فراوانی در حوزه‌های مختلف نظیر بانکداری و صنعت بیمه ارائه شده است [۵-۷]. با این حال، مدل‌های کلاسیک DEA ساختار درونی DMU را نادیده می‌گیرند و DMU را به‌منزله‌ی یک جعبه‌ی سیاه تلقی می‌کنند. این محدودیت زمینه‌ساز شکل‌گیری و توسعه‌ی DEA شبکه‌ای شد؛ رویکردی که تعاملات داخلی میان اجزای DMU را صریحاً مدنظر قرار می‌دهد.

در بسیاری از مسائل واقعی، برخی متغیرهای ورودی و خروجی از ماهیتی گسسته برخوردارند و تنها مقادیر صحیح را اختیار می‌کنند؛ برای مثال، تعداد کارکنان، تعداد ماشین‌آلات، تعداد گواهی‌نامه‌ها یا شمار دفعات وقوع یک رویداد. متغیرهایی هستند که ذاتاً قابل تقسیم به مقادیر کسری نیستند. استفاده از مدل‌های متعارف DEA که این متغیرها را پیوسته فرض می‌کنند، ممکن است به نتایجی منجر شود که از لحاظ عملیاتی قابل اجرا نبوده یا رفتار واقعی سیستم را بازتاب ندهد. به‌منظور رفع این کاستی، گنجاندن متغیرهای مقدار صحیح در چارچوب DEA ضروری است، زیرا این کار سبب می‌شود ارزیابی کارایی بر مبنای ساختار واقعی داده‌ها صورت گیرد و راه‌حل‌های به‌دست آمده از نظر اجرایی قابل تفسیر و پیاده‌سازی باشند. افزون بر این، لحاظ کردن قیود صحیح بودن باعث ایجاد مرز کارایی واقع‌بینانه‌تر شده و در شرایطی که تصمیم‌گیرندگان با محدودیت‌های گسسته سروکار دارند، تحلیل کارایی را به‌طور معناداری دقیق‌تر و معتبرتر می‌سازد.

گسترش متغیرهای مقدار صحیح به چارچوب DEA شبکه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در بسیاری از سیستم‌های چندبخشی، برخی ورودی‌ها، محصولات میانی و خروجی‌های هر بخش ماهیتاً گسسته‌اند و نمی‌توان آن‌ها را با فرض پیوستگی مدل‌سازی کرد. در شبکه‌هایی که شامل فرایندهای متوالی مانند تأمین، تولید و توزیع هستند، متغیرهایی نظیر تعداد اقلام انتقال‌یافته،

^۱ Data Envelopment Analysis (DEA)

^۲ Charnes

^۳ Decision-Making Units (DMUs)

تعداد محصولات معیوب، یا تعداد کارکنان تخصیص‌یافته به هر بخش، مقادیر صحیح اختیار می‌کنند و نادیده‌گرفتن این ماهیت می‌تواند مرز کارایی را به‌طور مصنوعی جابه‌جا کند. ادغام قیود صحیح بودن در DEAی شبکه‌ای این امکان را فراهم می‌کند که تعاملات بین مراحل مختلف با دقت بیشتری بازنمایی شود و ارزیابی کارایی هر یک از اجزای شبکه، بازتاب‌دهنده‌ی محدودیت‌های واقعی عملیاتی باشد. این بسط موجب می‌شود تحلیل کارایی نه تنها برای کل سیستم، بلکه برای هر بخش نیز به‌صورت معتبر انجام شود و راهکارهای پیشنهادی برای بهبود، از نظر اجرایی قابل‌پیاده‌سازی و سازگار با طبیعت گسسته‌ی تصمیمات واقعی باشند. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که توسعه‌ی یک مدل DEAی شبکه‌ای مبتنی بر DDF، که به‌طور هم‌زمان توانایی (۱) لحاظ ساختار درونی سیستم، (۲) مدیریت داده‌های منفی، و (۳) مدیریت داده‌های مقدار صحیح را داشته باشد، یک ضرورت پژوهشی محسوب می‌شود. در راستای رفع خلأهای موجود، این مقاله یک مدل DEAی شبکه‌ای مبتنی بر DDF در ساختار سری ارائه می‌کند. مزایا و ویژگی‌های اصلی مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

(۱) امکان اندازه‌گیری کارایی سیستم، که این قابلیت تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت (CRS)^۱ و بازده به مقیاس متغیر (VRS)^۲ برقرار است.

(۲) در مقایسه با مدل‌های موجود مبتنی بر DDF، مدل پیشنهادی قادر به مدیریت داده‌های منفی و همچنین داده‌های مقدار صحیح می‌باشد.

سازمان‌دهی مقاله به شرح زیر است: مرور ادبیات در بخش ۲ ارائه شده است. بخش ۳، چارچوب نظری DDF را با تمرکز بر نحوه‌ی برخورد با داده‌های منفی و نیز مدیریت متغیرهای دارای مقادیر صحیح مورد بررسی قرار می‌دهد. بخش ۴ مدل DEAی شبکه‌ای سری را پیشنهاد می‌کند که قابلیت پردازش داده‌های منفی و متغیرهای مقادیر صحیح را دارد و در عین حال بردار جهت مناسب را نیز تعیین می‌کند. بخش ۵ یک مطالعه‌ی تجربی به‌منظور نمایش قابلیت‌ها و مزایای مدل ارائه می‌دهد. بخش ۶ به تبیین پیامدهای مدیریتی یافته‌های پژوهش می‌پردازد. نهایتاً، بخش ۷ جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده فراهم می‌آورد.

^۱ Constant Returns to Scale
(CRS)

^۲ Variable Returns to Scale
(VRS)

۲- مرور ادبیات

در حالی که مدل‌های اولیه DEA، DMUها را به‌عنوان یک سیستم یک‌پارچه در نظر می‌گرفتند، محدودیت اصلی این نگاه ساده‌انگارانه، عدم توجه به ساختار درونی و فرآیندهای میانی DMUها بود. برای غلبه بر این ضعف، مفهوم DEA شبکه‌ای [۸] در اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ میلادی ظهور کرد که با تجزیه‌ی DMU به چندین زیرفرآیند به هم‌پیوسته (مرحله)، امکان بررسی دقیق‌تر کارایی کل و همچنین شناسایی گلوگاه‌های داخلی را فراهم می‌آورد. این پارادایم نوین، با آشکارسازی «جعبه‌ی سیاه» تبدیل ورودی‌ها به خروجی‌ها، درک عمیق‌تری از منابع ناکارایی و زمینه را برای تحلیل کارایی مرحله‌ای و تعامل بین فرآیندهای داخلی مهیا ساخته است. به‌عنوان یکی از ابتدایی‌ترین ساختارهای شبکه‌ای پایه‌ای، سیستم سری از ساده‌ترین سیستم دوبخشی مشتق می‌شود؛ سیستمی که در آن بخش نخست، ورودی‌ها را به محصولات میانی تبدیل می‌کند و بخش دوم، همان محصولات میانی را به‌عنوان ورودی برای تولید خروجی‌های نهایی به کار می‌گیرد. در مطالعات نخستین درباره‌ی این ساختار، کارایی هر یک از بخش‌ها غالباً به‌صورت مستقل برآورد می‌شد [۹-۱۱]. پژوهش‌های بعدی از جمله آثار فاره^۱ [۱۲]، فاره و ویتاکر^۲ [۱۳]، فاره و گراسکُپف^۳ [۱۴] و لوئگرن^۴ و تمبور^۵ [۱۵] به ارزیابی کارایی سیستم با لحاظ عملیات بخش‌های منفرد پرداختند. کائو^۶ و هوانگ^۷ [۱۶] رویکرد ضربی را برای یک سیستم دوبخشی تحت فرض CRS ارائه کردند که در آن کارایی سیستم به‌صورت حاصل‌ضرب کارایی بخش‌ها بیان می‌شود. کارهای بعدی از جمله کائو و لیو^۸ [۱۷] و کائو و هوانگ [۱۸]، محاسبه‌ی کارایی در محیط داده‌های فازی و تجزیه‌ی کارایی فنی و مقیاس را در این ساختار مورد بررسی قرار دادند. همچنین چن^۹ و همکاران [۱۹] یک رویکرد جمعی برای اندازه‌گیری کارایی سیستم معرفی کردند که در آن کارایی سیستم به‌صورت میانگین وزنی کارایی بخش‌ها ارائه می‌شود. اندازه‌گیری کارایی در کائو و هوانگ [۱۸] و چن و همکاران [۱۹] را می‌توان به سیستم‌های سری با بیش از دو بخش نیز تعمیم داد. برای

^۱ Färe

^۴ Löthgren

^۷ Hwang

^۲ Whittaker

^۵ Tambour

^۸ Liu

^۳ Grosskopf

^۶ Kao

^۹ Chen

مطالعات تفصیلی‌تر پیرامون سیستم‌های سری به کائو [۲۰]، لیو و همکاران [۲۱]، آن^۱ و همکاران [۲۲]، لین و لیو [۲۳]، امیرتیموری و همکاران [۲۴]، آزادی و همکاران [۲۵] و ژو^۲ و همکاران [۲۶] مراجعه کنید.

اکثر مدل‌های DEA شبکه‌ای موجود بر پایه‌ی مدل‌های ورودی-محور یا خروجی-محور نظیر مدل CCR [۱] و BCC [۲۷] توسعه یافته‌اند؛ مدل‌هایی که امکان سنجش هم‌زمان ناکارایی ورودی و خروجی را فراهم نمی‌کنند. این محدودیت، اهمیت رویکردهای مبتنی بر تابع فاصله‌ی جهت‌دار (DDF)^۳ [۲۸] و اندازه‌ی مبتنی بر اسلک (SBM)^۴ [۲۹] را برجسته می‌کند که قابلیت سنجش هم‌زمان تغییرات ورودی و خروجی را دارند. در مقایسه با SBM، تابع DDF به دلیل ماهیت کاملاً خطی و عدم نیاز به تبدیل داده، از کارآمدی محاسباتی بالاتری برخوردار است. علاوه بر این، در چارچوب VRS، DDF تنها با انتخاب یک بردار جهت مناسب، قادر است داده‌های منفی را بدون نیاز به اصلاحات مدل یا دستکاری داده‌ها پردازش کند. این ویژگی‌ها موجب توسعه‌ی مدل‌های مختلف مبتنی بر DDF شده است؛ از جمله مدل اندازه‌ی دامنه‌ی جهت‌دار (RDM)^۵ [۳۰]، نسخه‌های اصلاح‌شده‌ی اندازه‌ی شعاعی [۳۱]، [۳۲]، و مدل‌های ابرکارایی مبتنی بر DDF که توسط لین^۶ و چن [۳۳] و لین و لیو [۳۴] ارائه شده‌اند. با توجه به مزایای مطرح‌شده برای DDF، لو^۷ و همکاران [۳۵] چندین مدل DEA پویای مبتنی بر DDF را برای برآورد کارایی عملیاتی و سودآوری اتحادیه‌های اعتباری مرتبط با انجمن‌های کشاورزان تایوان در دوره‌ی ۲۰۰۶-۲۰۱۱ معرفی کردند. ایزدی‌خواه و فرضی‌پور [۳۶] برای اندازه‌گیری کارایی یک سیستم دوبخشی، یک مدل مبتنی بر DDF طراحی کرده و آن را برای ارزیابی ۲۹ زنجیره‌ی تأمین ایرانی در تولید تجهیزات مصرفی پزشکی به‌کار بردند. لین و همکاران [۳۷] یک مدل DEA شبکه‌ای پویای مبتنی بر DDF با قابلیت تنوع‌بخشی ارائه نمودند تا عملکرد چنددوره‌ای صندوق‌های سرمایه‌گذاری مشترک را ارزیابی کنند. بر پایه‌ی DDF، توانا و همکاران [۳۸] یک مدل شبکه‌ای RDM و مدل پویای متناظر آن را برای ارزیابی ۲۹

^۱ An

^۴ Slacks-based measure

^۷ Lu

^۲ Zhu

(SBM)

^۳ Directional Distance

^۵ Range Ddirectional

Function (DDF)

Measure (RDM)

^۶ Lin

شعبه‌ی بانک ملی دیترویت ساختند. شایان ذکر است که مدل‌های شبکه‌ای یا پویای مورد بحث، قابلیت پردازش داده‌های منفی را دارا می‌باشند. در مقابل، پژوهش‌های مربوط به مدل‌های شبکه‌ای ضربی مبتنی بر DDF محدود است. مدل دومرحله‌ای ضربی وانگ^۱ و همکاران [۳۹] نمونه‌ی معدودی از این رویکرد است که فقط تحت فرض CRS تعریف شده و توانایی پردازش داده‌های منفی را ندارد.

ژانگ^۲ و همکاران [۴۰] به ارزیابی و پیش‌بینی کارایی اقتصادی سبز در ۲۴۸ شهر چین طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ پرداختند. آن‌ها از یک مدل SBM شبکه‌ای سه‌مرحله‌ای مبتنی بر زیرسیستم‌های تولید اقتصادی، توسعه‌ی اجتماعی و حکمرانی محیط‌زیستی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که کارایی اقتصادی سبز در شهرهای چین در سطح پایینی قرار دارد که در آن منطقه‌ی شرقی پیشتاز و منطقه‌ی غربی در جایگاه آخر است. پیکانی و همکاران [۴۱] یک چارچوب نوآورانه برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های شبکه‌ای دومرحله‌ای ارائه دادند که برای مواجهه با عدم قطعیت و عدم دقت در داده‌های دنیای واقعی طراحی شده است. از مزایا و نوآوری‌های کلیدی پژوهش آن‌ها می‌توان به (۱) توسعه‌ی چارچوبی نوین برای بسط مطالعات DEA فازی شهودی در ساختارهای شبکه‌ای دومرحله‌ای عمومی؛ (۲) معرفی مفهوم «محدودیت‌های فازی قابل تنظیم» در چارچوب DEA شبکه‌ای فازی شهودی؛ و (۳) اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی در بخش بانکداری که نشان‌دهنده‌ی قابلیت اجرا و ارتباط آن با مسائل واقعی است، اشاره کرد. چن و وانگ^۳ [۴۲] از روش گرافیکی برای تحلیل رابطه‌ی متقابل بین مرزهای تولید دومرحله تحت VRS استفاده کردند و دو مدل اصلاح شده‌ی DEA شبکه‌ای دومرحله‌ای به همراه مدل‌های ضربی و پوششی آن‌ها برای تجزیه‌ی کارایی و تصویر مرزی به ترتیب از دیدگاه ماهیت ورودی و ماهیت خروجی پیشنهاد کردند. آن‌ها برای رفع سوگیری ماهیت ورودی و خروجی تحت VRS، DDF شبکه‌ای دومرحله‌ای پیشنهاد کردند که راه‌های تجزیه‌ی کارایی بدون ماهیت و تصویر مرزی را در چارچوب DEA شبکه‌ای دومرحله‌ای بررسی می‌کند. زو^۴ و لیو^۵ [۴۳] با ارائه‌ی مدل جدید DEA مبتنی بر بازی چانه‌زنی دومرحله‌ای برای داده‌های نامطمئن، سه دستاورد عمده را ارائه دادند: (۱) این مدل امکان مذاکره

^۱ Wanke

^۲ Wang

^۵ Lio

^۳ Zhang

^۴ Zou

مشارکتی بین مراحل را برای تجزیه‌ی کارایی کلی به شیوه‌ای منصفانه و یکتا فراهم می‌آورد؛ (۲) مدل پیشنهادی درجه‌ی رضایت هر مرحله از تجزیه‌ی کارایی را در فرآیند چانه‌زنی ادغام می‌کند که این امر نه تنها صحت ریاضی نتایج را تضمین می‌نماید، بلکه مقبولیت عملی برای طرفین درگیر را نیز به همراه دارد؛ (۳) مدل آن‌ها به‌طور مؤثر چالش داده‌های نامطمئن را با بهره‌گیری از نظریه عدم قطعیت مبتنی بر درجه‌ی باور پوشش می‌دهد.

۳- مدل‌های DEA مبتنی بر DDF

تعداد n DMU را در نظر بگیرید که بر اساس m ورودی و s خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. فرض کنید x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) و y_{rj} ($r = 1, \dots, s$) به ترتیب مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌های این DMUها باشند. برای اندازه‌گیری کارایی DMUها، چمبرز^۱ و همکاران [۲۸]، [۴۴] DDF را بر روی مجموعه‌ی امکان تولید T به صورت $\eta(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{f}, \mathbf{g}) = \max\{\eta \mid (\mathbf{x} - \eta\mathbf{f}, \mathbf{y} + \eta\mathbf{g}) \in T\}$ تعریف کردند؛ که در اینجا بردارهای \mathbf{f} و \mathbf{g} جهت‌های از پیش تعیین شده هستند. DDF اندازه‌گیری شده برای DMU_o در امتداد جهت $(-\mathbf{f}, \mathbf{g})$ تحت فرض VRS برای کار با مقادیر منفی عبارت است از:

$$\begin{aligned} & \max \eta_o & (۱) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{io} - \eta_o f_{io}, & i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} + \eta_o g_{ro}, & r = 1, \dots, s, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ \lambda_j \geq 0, & j = 1, \dots, n, \quad \eta_o \text{ unrestricted in sign.} \end{cases} \end{aligned}$$

این تابع، فاصله‌ی DMU_o را در راستای $(-\mathbf{f}, \mathbf{g})$ تا نقطه‌ای روی مرز تولید اندازه‌گیری می‌کند. این مقدار نشان می‌دهد که خروجی‌ها تا چه حد امکان افزایش دارند و ورودی‌ها تا چه

^۱ Chambers

میزان می‌توانند کاهش یابند. در حالت بهینه، مقدار هدف $\eta_o^* = 0$ نشان می‌دهد که این DMU کارا است، و غیرکارا است، اگر $\eta_o^* > 0$. بعلاوه، $(\sum_{j=1}^n \lambda_j^* x_{ij}, \sum_{j=1}^n \lambda_j^* y_{rj})$ محکی را که در DMU_o در اندازه‌گیری کارایی متکی بر آن است، نشان می‌دهد. مدل (۱) می‌تواند DMU‌های کارا و غیرکارا را شناسایی کند، لیکن قادر نیست وسعت ناکارایی را بسنجد، زیرا کران بالای η_o^* معلوم نیست. پورتلا^۱ و همکاران [۳۰] یک اندازه‌ی دامنه‌ی جهت‌دار را پیشنهاد کردند که در آن از بزرگ‌ترین گام ممکن که DMU می‌تواند به‌عنوان بردار جهت حرکت کند، استفاده می‌شود، به‌طوری‌که η_o^* کوچک‌تر یا مساوی با یک باشد، که در اینجا $1 - \eta_o^*$ به‌عنوان کارایی تعریف می‌شود. به‌طور خاص، جهت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} f_{io} &= x_{io} - \min_{j=1, \dots, n} \{x_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, m, \\ g_{ro} &= \max_{j=1, \dots, n} \{y_{rj}\} - y_{ro}, \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \quad (2)$$

با این شرایط، کارایی $1 - \eta_o^*$ بین صفر و یک خواهد بود. یکی از فروض مدل‌های کلاسیک DEA آن است که مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌ها را پیوسته در نظر می‌گیرند. با این حال، در بسیاری از کاربردهای دنیای واقعی، برخی از ورودی‌ها و/یا خروجی‌ها ماهیتاً گسسته بوده و تنها مقادیر صحیح را اختیار می‌کنند. بدون خدشه وارد شدن به کلیت بحث، فرض کنید مجموعه‌ی متغیرهای ورودی به‌صورت $I = I^I \cup I^{NI} = \{1, \dots, m\}$ و مجموعه‌ی متغیرهای خروجی به‌صورت $O = O^I \cup O^{NI} = \{1, \dots, s\}$ افزاز شده‌اند؛ به‌طوری‌که زیرمجموعه‌های I^I و O^I شامل متغیرهای دارای شرط مقدار صحیح بودن هستند و زیرمجموعه‌های I^{NI} و O^{NI} متغیرهایی با مقادیر پیوسته را دربر می‌گیرند. برای اندازه‌گیری کارایی DMU_o تحت فرض وجود متغیرهای ورودی و/یا خروجی مقدار صحیح، مدل زیر پیشنهاد می‌شود:

^۱ Portela

$$\begin{aligned} & \max \eta_o \\ & \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{io} - \eta_o f_{io}, \quad i \in I^I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{io} - \eta_o f_{io}, \quad i \in I^{NI}, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} + \eta_o g_{ro}, \quad r \in O^I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} + \eta_o g_{ro}, \quad r \in O^{NI}, \\ x_{io} - \eta_o f_{io} = \tilde{x}_{io}, \quad \tilde{x}_{io} \in Z, \quad i \in I^I, \\ y_{ro} + \eta_o g_{ro} = \tilde{y}_{ro}, \quad \tilde{y}_{ro} \in Z, \quad r \in O^I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \quad \eta_o \text{ unrestricted in sign.} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3)$$

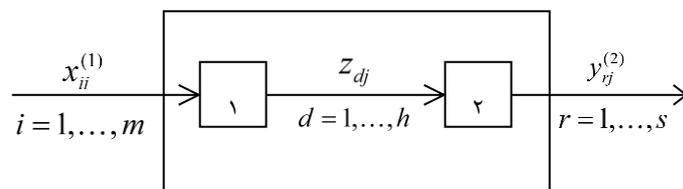
مدل (۳) با افزودن قیود صحیح‌بودن برای بخشی از ورودی‌ها و/یا خروجی‌ها، قابلیت فراهم می‌کند تا ویژگی‌های گسسته‌ی برخی متغیرها در ارزیابی کارایی لحاظ شود. در واقع، این چارچوب امکان می‌دهد که عملکرد DMUها در شرایطی سنجیده شود که برخی از شاخص‌ها تنها مقادیر صحیح می‌پذیرند و استفاده از یک مدل کاملاً پیوسته می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست یا غیرواقع‌بینانه شود. با این اصلاح ساختاری، کارایی برآورده شده منعکس‌کننده‌ی محدودیت‌های عملی و ماهیت واقعی داده‌ها بوده و در مقایسه‌های بین DMUها، نتایج معتبرتر و قابل اتکاتری ارائه می‌شود.

۴- مدل‌های DEAی شبکه‌ای مبتنی بر DDF

مدل‌های مبتنی بر DDF به‌عنوان یکی از چارچوب‌های قدرتمند در DEAی شبکه‌ای، امکان ارزیابی کارایی سیستم‌های چندمرحله‌ای را با در نظرگیری همزمان ورودی‌ها و خروجی‌های میانی فراهم می‌کنند. بر خلاف مدل‌های کلاسیک DEA که تنها به ارزیابی کارایی کل سیستم

می‌پردازند، این مدل‌ها با تجزیه‌ی کارایی به مراحل مختلف، امکان شناسایی دقیق نقاط ضعف و قوت در هر مرحله را فراهم می‌نمایند. در این بخش، با به کارگیری DDF در چارچوب شبکه‌ای، مدلی توسعه می‌دهیم که قادر به محاسبه‌ی کارایی کلی DMUها است. این مدل با پشتیبانی از انتخاب جهت‌های مختلف، انعطاف‌پذیری لازم برای تطبیق با شرایط واقعی و اهداف مدیریتی متنوع را دارا می‌باشد.

ساختار سیستم دوبخشی پایه‌ای به صورت نشان داده شده در شکل ۱ را در نظر بگیرید؛ که در آن بخش اول از m ورودی $x_{ij}^{(1)}$ ($i = 1, \dots, m$) که از بیرون تأمین شده است استفاده می‌کند و h محصول بینابینی z_{dj} ($d = 1, \dots, h$) را نیز تولید می‌نماید. بخش دوم از h محصول بینابینی z_{dj} ($d = 1, \dots, h$) تولید شده به وسیله‌ی بخش اول استفاده می‌کند و s خروجی $y_{rj}^{(2)}$ ($r = 1, \dots, s$) تولید می‌کند که به بیرون سیستم فرستاده می‌شود.



شکل ۱: ساختار سیستم دوبخشی پایه‌ای.

در ادبیات مربوط به سیستم‌های شبکه‌ای، گونه‌های متفاوتی از مجموعه‌ی امکان تولید (PPS)^۱ تعریف شده‌اند که مبنای سنجش کارایی قرار می‌گیرند. یکی از این رویکردها، متعلق به فاره و گراسگُف [۸] است که در آن PPS یک سیستم شبکه‌ای از طریق تجمیع PPSهای هر یک از بخش‌ها ساخته می‌شود. برای سیستمی که در شکل ۱ نشان داده شده است، PPS به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$(۴)$$

^۱ Production Possibility Set (PPS)

$$T^{\text{Network}} = \left\{ (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} x_{ij}^{(1)} \leq x_i^{(1)}, i = 1, \dots, m, \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} z_{dj} \geq z_d, d = 1, \dots, h, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} z_{dj} \leq z_d, d = 1, \dots, h, \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} y_{rj}^{(2)} \geq y_r^{(2)}, r = 1, \dots, s, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} = 1, k = 1, 2, \lambda_j^{(k)} \geq 0, k = 1, 2; j = 1, \dots, n \end{array} \right. \right\}$$

محصولات بینابینی z_d ($d = 1, \dots, h$) در داخل سیستم تولید و مصرف می‌شوند و از بیرون قابل مشاهده نیستند. برای مثال، محصول میانی‌ای که توسط بخش ۱ تولید می‌شود، از دیدگاه بخش ۱ افزایش در مقدار آن نشان‌دهنده‌ی کارایی بالاتر بخش ۱ است؛ درحالی‌که از منظر بخش ۲، کاهش مقدار این محصول میانی می‌تواند به کارایی بالاتر بخش ۲ منتج شود، زیرا ورودی کمتری برای تولید مورد نیاز است. بنابراین، عرضه‌کننده و مصرف‌کننده‌ی محصول میانی دربارده‌ی مقدار مطلوب آن اهدافی متضاد دارند. برخی پژوهش‌ها، از جمله مقاله‌ی چن و همکاران [۴۵]، با بهره‌گیری از مجموعه قیود $\sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} z_{dj} = \hat{z}_{do}$ ($d = 1, \dots, h$) و $\sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} z_{dj} = \hat{z}_{do}$ ($d = 1, \dots, h$) تلاش می‌کنند مقدار یکسان از محصول میانی \hat{z}_{do} را برای هر دو بخش تعیین کنند تا در سنجش کارایی سیستم هیچ‌گونه ناسازگاری میان آن‌ها ایجاد نشود؛ در این چارچوب، \hat{z}_{do} ($d = 1, \dots, h$) یک متغیر تصمیم به‌شمار می‌رود. در این مقاله ما نیز رویکرد چن و همکاران [۴۵] را برای مدل‌سازی اقتباس می‌کنیم. بر این اساس، مدل DEAی شبکه‌ای برای ارزیابی کارایی DMU تحت فرض VRS به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \eta_o \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} x_{ij}^{(1)} \leq x_{io}^{(1)} - \eta_o f_{io}^{(1)}, \quad i = 1, \dots, m, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d = 1, \dots, h, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d = 1, \dots, h, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} y_{rj}^{(2)} \geq y_{ro}^{(2)} + \eta_o g_{ro}^{(2)}, \quad r = 1, \dots, s, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} = 1, \quad k = 1, 2, \\
 & \quad \quad \lambda_j^{(k)} \geq 0, \quad k = 1, 2; j = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{5}$$

مدل (5)، با پیروی از رویکرد چن و همکاران [45]، یک چارچوب سازگار و هماهنگ برای تعیین مقدار محصول میانی ارائه می‌کند تا تعارض ذاتی میان تولیدکننده و مصرف‌کننده‌ی این محصول درون سیستم از بین برود. در این مدل، مقدار محصول میانی به‌عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است، به‌گونه‌ای که بتواند هم‌زمان شرایط کارایی هر دو بخش را برآورده سازد. استفاده از قیود تساوی مقدار محصول میانی موجب می‌شود که مدل، جریان واقعی مواد یا خدمات داخل سیستم را هماهنگ‌سازی کند و از بروز جواب‌هایی که ممکن است به‌طور مصنوعی یک بخش را کاراتر و بخش دیگر را ناکاراکنده جلوه دهند جلوگیری شود. به‌طور خلاصه، ویژگی اصلی مدل پیشنهادی آن است که با تعریف مقدار مشترک برای محصول میانی و استفاده از قیود سازگار، یک ارزیابی عادلانه، هم‌راستا و بدون تناقض از کل سیستم ارائه می‌دهد.

برای مدل (5)، بردار جهت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} f_{io}^{(1)} = x_{io}^{(1)} - \min_{j=1, \dots, n} \{x_{ij}^{(1)}\}, & i = 1, \dots, m, \\ g_{ro}^{(2)} = \max_{j=1, \dots, n} \{y_{rj}^{(2)}\} - y_{ro}^{(2)}, & r = 1, \dots, s. \end{cases} \tag{6}$$

با این شرایط، کارایی DMU_o یعنی $1 - \eta_o^*$ بین صفر و یک خواهد بود.
 قضیه‌ی ۱: مدل (۵) همواره شدنی است.

برهان: روشن است که

$$\begin{aligned} \lambda_o^{(k)} &= 1, \quad \lambda_j^{(k)} = 0, \quad j = 1, \dots, n; j \neq o; k = 1, 2 \\ \hat{z}_{do} &= z_{do}, \quad d = 1, \dots, h, \\ \eta_o &= 0, \end{aligned}$$

یک جواب شدنی برای مدل (۵) است و این اثبات را کامل می‌کند. ■

فرض کنید $I = I_1 \cup I_2 = \{1, \dots, m\}$ را به‌گونه‌ای تفکیک کنیم که I_1 نمایانگر مجموعه‌ی اندیس‌های مربوط به متغیرهای با مقدار صحیح و I_2 بیانگر مجموعه‌ی اندیس‌های مربوط به متغیرهای پیوسته باشد. به‌طور مشابه، $O = O_1 \cup O_2 = \{1, \dots, s\}$ را در نظر بگیرید که در آن O_1 مجموعه‌ی اندیس‌های متغیرهای با مقدار صحیح و O_2 مجموعه‌ی اندیس‌های متغیرهای پیوسته را مشخص می‌کند. همچنین، برای مجموعه‌ی $D = D_1 \cup D_2 = \{1, \dots, h\}$ نیز داریم که D_1 به متغیرهای با مقدار صحیح و D_2 به متغیرهای پیوسته تعلق دارد. با در نظر گرفتن این دسته‌بندی از داده‌ها—که شامل ترکیبی از متغیرهای با مقدار صحیح و متغیرهای پیوسته در ورودی‌ها، محصولات میانی و خروجی‌ها است—مدل DEA شبکه‌ای پیشنهادی در حضور چنین داده‌هایی به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \eta_o \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} x_{ij}^{(1)} \leq x_{io}^{(1)} - \eta_o f_{io}^{(1)}, \quad i \in I_1, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} x_{ij}^{(1)} \leq x_{io}^{(1)} - \eta_o f_{io}^{(1)}, \quad i \in I_2, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d \in D_1, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d \in D_1, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(1)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d \in D_2, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} z_{dj} = \hat{z}_{do}, \quad d \in D_2, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} y_{rj}^{(2)} \geq y_{ro}^{(2)} + \eta_o g_{ro}^{(2)}, \quad r \in O_1, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(2)} y_{rj}^{(2)} \geq y_{ro}^{(2)} + \eta_o g_{ro}^{(2)}, \quad r \in O_2, \\
 & \quad \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} = 1, \quad k = 1, 2, \\
 & \quad \quad x_{io}^{(1)} - \eta_o f_{io}^{(1)} = \tilde{x}_{io}^{(1)}, \quad i \in I_1, \\
 & \quad \quad y_{ro}^{(2)} + \eta_o g_{ro}^{(2)} = \tilde{y}_{ro}^{(2)}, \quad r \in O_1 \\
 & \quad \quad \tilde{x}_{io}^{(1)}, \tilde{y}_{ro}^{(2)}, \hat{z}_{do} \in Z, \quad i \in I_1, r \in O_1, d \in D_1, \\
 & \quad \quad \lambda_j^{(k)} \geq 0, \quad k = 1, 2; j = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{V}$$

مدل (V) با هدف سنجش کارایی DMUها در یک ساختار شبکه‌ای و با در نظر گرفتن تفکیک ورودی‌ها، محصولات بینابینی و خروجی‌ها بر اساس ماهیت صحیح یا پیوسته‌ی آنها تدوین

شده است. قیود مدل تضمین می‌کنند که روابط فناورانه‌ی هر دو بخش به‌درستی بازنمایی شوند و مقدار محصول بینابینی در کل سیستم نیز به‌صورت سازگار و یکتا تعیین گردد. به‌این ترتیب، مدل پیشنهادی قادر است تصویری دقیق، یکپارچه و سازگار از کارایی شبکه‌ای DMUها در حضور داده‌های مختلط (صحیح-پیوسته) ارائه دهد و پایه‌ای برای تحلیل‌های تکمیلی و تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم کند.

قضیه‌ی ۲: مدل (۷) همواره شدنی است.

برهان: اثبات مشابه قضیه‌ی ۱ است.

به‌منظور نشان‌دادن کارایی مدل سری پیشنهادی در برخورد با داده‌های مختلط، در بخش بعدی مطالعه‌ی موردی واقعی مطرح‌شده در ایزدی‌خواه و فرضی‌پور [۳۶] مورد تحلیل قرار می‌گیرد؛ مطالعه‌ای که ۲۹ زنجیره‌ی تأمین ایرانی را شامل می‌شود.

۵- مطالعه‌ی موردی

برون‌سپاری و کاهش پایگاه تأمین، میزان اتکای خریداران به تأمین‌کنندگان را افزایش داده است. در سال‌های اخیر، مفهوم پایداری با تأکید بر سه‌بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی توجه بیشتری در ادبیات مدیریت زنجیره‌ی تأمین به خود جلب کرده است. پایداری بازتاب‌دهنده‌ی عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی یک سازمان است. عوامل مرتبط با پایداری نقشی حیاتی در موفقیت بلندمدت یک زنجیره‌ی تأمین دارند و ورود فشارهای اجتماعی و زیست‌محیطی، فرآیند تدارکات را پیچیده‌تر کرده است. امروزه نگرانی‌های جهانی درباره‌ی پایداری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. فعالان اجتماعی، رسانه‌ها، مصرف‌کنندگان و سازمان‌های مردم‌نهاد شرکت‌ها را ترغیب می‌کنند تا دامنه‌ی مسئولیت‌پذیری خود را گسترش داده و مؤلفه‌های پایداری را در تصمیم‌گیری‌ها و عملیات خود لحاظ کنند. اجرای عملیات پایدار برای خلق ارزش و ارتقای رضایت مشتری ضروری است و این امر می‌تواند با تمرکز بر توسعه‌ی اجتماعی، حفاظت محیط‌زیست و پیشرفت اقتصادی محقق شود. با این حال، پرداختن به پایداری نیازمند توجه به عوامل اجتماعی، مانند عدالت اجتماعی و سلامت کارکنان است. بعلاوه، رقابت شدید حاکم بر بازارهای امروزی سازمان‌ها را وادار می‌کند تا به نیازهای مشتریان پاسخی سریع، دقیق و اثربخش ارائه دهند. طی دهه‌ی گذشته، افزایش برون‌سپاری و کاهش گستره‌ی پایگاه تأمین‌کنندگان موجب شده است وابستگی خریداران به عرضه‌کنندگان

بیش‌ازپیش تشدید شود [۴۶-۴۸].

یکی از ابزارهای کلیدی و پرکاربرد در صنایع پزشکی، تجهیزات مصرفی پزشکی است. این تجهیزات شامل اقلامی مانند سرنگ، ست تزریق، کیت‌های آزمایشگاهی، تجهیزات محافظت فردی، گاز و باند و انواع مواد یک‌بارمصرف هستند که به دلیل ماهیت حساس و زمان‌بر نبودن ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، نیازمند مدیریت دقیق موجودی و برنامه‌ریزی کارا در زنجیره‌ی تأمین می‌باشند. در ایران تولیدکنندگان متعددی در حوزه‌ی تجهیزات مصرفی پزشکی فعالیت دارند و کارایی زنجیره‌های تأمین این محصولات را می‌توان از طریق مدل‌های DEA شبکه‌ای اندازه‌گیری کرد. زنجیره‌ی تأمین تجهیزات مصرفی پزشکی معمولاً از چند بخش تشکیل می‌شود: تأمین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مراکز لجستیکی و در نهایت بیمارستان‌ها و مراکز درمانی. ماهیت حیاتی این اقلام باعث می‌شود عواملی مانند قابلیت ردیابی، زمان تحویل کوتاه، کیفیت پایدار، شرایط نگهداری مناسب و مدیریت ریسک کمبود کالا اهمیت ویژه‌ای پیدا کنند. به‌منظور نمایش توانایی مدل سری پیشنهادی در مواجهه با داده‌های منفی و مقدار صحیح، مطالعه‌ی موردی واقعی ارائه‌شده در ایزدی‌خواه و فرضی‌پور [۳۶] بررسی می‌شود که شامل ۲۹ زنجیره‌ی تأمین ایرانی است. فرایند تولید این زنجیره‌ها به دو بخش مجزا تقسیم شده است: بخش تأمین‌کننده و بخش تولیدکننده. استفاده از مدل‌های DEA شبکه‌ای، می‌تواند عملکرد زنجیره‌ی تأمین تجهیزات مصرفی پزشکی را بهبود دهد و از اتلاف منابع، کمبود موجودی و مشکلات کیفی جلوگیری کند، که این موضوع برای پایداری عملیاتی مراکز درمانی و افزایش ایمنی بیماران کاملاً حیاتی است.

ورودی‌ها بخش تأمین‌کننده عبارت‌اند از: هزینه‌ی ایمنی محیط کار و سلامت نیروی کار (ورودی نامنفی)، هزینه‌ی سالانه (ورودی نامنفی) و هزینه‌های زیست‌محیطی (ورودی نامنفی). معمولاً در تحلیل نهایی، تمامی این موارد ذیل عنوان «هزینه‌ی سالانه» قرار می‌گیرند؛ با این حال، همانند خداکرمی و همکاران [۴۹] و شاوردی و همکاران [۵۰]، این پژوهش سه ورودی مذکور را به‌صورت جداگانه بررسی می‌کند تا پایداری زنجیره‌های تأمین با دقت بیشتری ارزیابی شود.

محصولات بینابینی شامل نرخ افزایش هزینه‌ی مشارکت در برنامه‌های تولید سبز (دارای مقادیر منفی یا نامنفی) و تعداد محصولات انتقال‌یافته از تأمین‌کننده به تولیدکننده (عامل نامنفی)

و مقدار صحیح) هستند. چنانچه مقدار Z_{1j} مثبت باشد، نشان می‌دهد زنجیره‌ی تأمین نسبت به سال قبل هزینه‌ی بیشتری صرف تولید محصولات سبز کرده است؛ و اگر این مقدار منفی باشد، بیانگر کاهش هزینه‌ها نسبت به سال گذشته است.

خروجی‌های بخش تولیدکننده عبارت‌اند از: تعداد گواهی‌نامه‌های ISO اخذ شده (خروجی نامنفی و مقدار صحیح)، تعداد کارکنان آموزش‌دیده در حوزه‌های شغلی، ایمنی و سلامت (خروجی نامنفی و مقدار صحیح)، نرخ افزایش تعداد محصولات سبز (خروجی با مقادیر منفی و نامنفی) و نرخ افزایش درآمد (خروجی با مقادیر منفی و نامنفی). ۲۹ زنجیره‌ی تأمین مورد مطالعه، مهم‌ترین تولیدکنندگان تجهیزات مصرفی پزشکی در کشور به‌شمار می‌روند. جدول ۱ مجموعه داده‌های DMUها را نمایش می‌دهد.

جدول ۱: مجموعه‌ی داده‌های ۲۹ زنجیره‌ی تأمین (منبع: [۳۶]).

DMU	ورودی‌ها			محصولات بینابینی		خروجی‌ها			
	X_{3j}	X_{2j}	X_{1j}	Z_{2j}	Z_{1j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}
۱	۸۶	۱۲۴۲	۱۱	۲	-۲	۱	۱۵	۱۲	-۸
۲	۱۲۶	۲۱۴۵	۱۴	۱۲	۸	۴	۷۴	۱۶	۲۵
۳	۱۱۵	۲۰۲۵	۹	۱۰	۱۲	۴	۴۵	۱۵	۲۲
۴	۹۵	۱۶۸۰	۱۲	۵	-۵	۲	۳۴	-۸	۱۲
۵	۱۱۰	۱۸۶۰	۱۶	۷	-۱	۳	۴۱	۱۲	۸
۶	۸۵	۱۴۷۸	۱۳	۳	۱	۲	۱۲	۱۱	۲
۷	۷۵	۱۳۴۵	۱۱	۲	-۴	۲	۱۶	۱۱	-۲
۸	۹۳	۱۵۶۵	۱۰	۵	-۲	۳	۲۲	۱۱	۳
۹	۱۲۱	۱۸۶۰	۸	۷	۳	۴	۳۵	۱۲	۶
۱۰	۱۳۴	۲۱۱۲	۹	۱۲	۲	۴	۶۸	۱۱	۱۵
۱۱	۱۱۴	۱۴۵۶	۱۵	۴	۱	۱	۲۳	۱۱	۴
۱۲	۹۸	۱۷۲۴	۱۴	۶	۲	۲	۳۵	۱۱	۷
۱۳	۷۴	۱۳۸۶	۱۲	۳	-۵	۱	۱۶	-۱۲	-۳
۱۴	۸۳	۱۶۳۵	۱۲	۷	-۲	۲	۲۱	۸	۴
۱۵	۷۷	۱۴۹۴	۱۳	۲	-۴	۱	۳۱	-۷	۱
۱۶	۱۱۸	۱۸۹۷	۱۶	۸	۷	۳	۴۲	۱۵	۷
۱۷	۱۲۲	۱۹۸۲	۱۳	۱۰	۱۱	۳	۵۴	۱۲	۱۳

DMU	ورودی‌ها			محصولات بینابینی		خروجی‌ها			
	X_{1j}	X_{2j}	X_{3j}	Z_{1j}	Z_{2j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}
۱۸	۱۱	۱۳۴۴	۷۹	-۶	۴	۲	۱۴	-۱۰	-۶
۱۹	۱۰	۱۸۸۳	۱۲۶	۲	۵	۲	۳۲	۸	۱۸
۲۰	۹	۲۰۲۰	۱۲۵	۹	۱۱	۴	۶۸	۹	۲۱
۲۱	۸	۱۶۶۵	۱۰۵	-۸	۳	۲	۳۵	-۱۱	۵
۲۲	۱۲	۱۴۸۷	۸۴	-۴	۲	۲	۲۷	۵	۳
۲۳	۱۵	۱۵۶۸	۷۲	-۱	۵	۲	۱۸	۴	۶
۲۴	۱۲	۱۹۲۵	۱۰۸	۶	۸	۴	۴۸	۸	۱۷
۲۵	۱۴	۱۷۸۲	۱۰۲	۲	۹	۳	۲۴	۳	۸
۲۶	۱۰	۲۱۱۰	۱۱۶	۱۰	۶	۴	۷۵	۱۶	۲۳
۲۷	۱۲	۱۲۵۰	۸۶	-۸	۳	۱	۲۷	-۱۲	-۶
۲۸	۱۴	۱۹۵۴	۱۲۵	۴	۱۱	۳	۸۲	۲	۱۹
۲۹	۱۲	۱۶۸۰	۸۹	۱	۵	۲	۳۳	۵	۴

در گام نخست، با فرض پیوسته‌بودن داده‌ها، DMUها را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. نتایج حاصل از مدل (۵) در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در ستون‌های ۲ تا ۴ جدول ۲ مشاهده می‌شود، به ترتیب امتیازهای کارایی سیستم و نقاط تصویر محصولات بینابینی برای هر DMU گزارش شده است. بر اساس مدل (۵)، نُه DMU شامل DMUهای ۱، ۲، ۷، ۹، ۱۳، ۲۱، ۲۳، ۲۶ و ۲۸ به عنوان DMUهای کارا شناسایی شده‌اند. از آنجا که در مدل‌های DEA واحد کارا همواره بر مرز کارایی قرار می‌گیرد، داده‌های مشاهده‌شده‌ی این DMUها بدون هیچ‌گونه تغییر یا تعدیلی در نقاط تصویر حفظ شده‌اند. این ثبات داده‌ها بیانگر آن است که عملکرد هر یک از این DMUها در هر دو مرحله‌ی فرایند بهینه است و نیازی به بهبود یا اصلاح ندارند. افزون بر این، حضور این DMUها در مرز کارایی موجب می‌شود در ارزیابی سایر DMUهای ناکارا نقش DMUهای مرجع را ایفا کنند و جهت‌های بهبود آن DMUها بر اساس ترکیب این DMUهای کارا تعیین شود.

جدول ۲: امتیازهای کارایی سیستم و نقاط تصویر ۲۹ زنجیره‌ی تأمین.

DMU	نتایج حاصل از مدل (۷)				نتایج حاصل از مدل (۵)			
	$\tilde{y}_{2j}^{(2)*}$	$\tilde{y}_{1j}^{(2)*}$	\hat{z}_{2j}^*	\hat{z}_{1j}^*	کارایی	\hat{z}_{2j}^*	\hat{z}_{1j}^*	کارایی
۱	۱۵	۱	۲	-۲	۱,۰۰۰۰	۲	-۲	۱,۰۰۰۰
۲	۷۴	۴	۱۲	۸	۱,۰۰۰۰	۱۲	۸	۱,۰۰۰۰
۳	۴۶	۴	۹	۹.۴۶۹۳	۰.۹۷۳۰	۸.۵۶۰۱	۸.۱۷۰۳	۰.۹۲۴۶
۴	۳۴	۲	۵	۱.۱۰۶۷	۱,۰۰۰۰	۵.۳۴۱۹	۰.۱۶۶۶	۰.۷۰۸۲
۵	۴۱	۳	۶	۲	۱,۰۰۰۰	۵.۹۴۲۶	۴.۱۷۷۵	۰.۶۳۳۳
۶	۱۲	۲	۴	-۰.۳۹۵۲	۱,۰۰۰۰	۳.۷۹۸۳	-۰.۵۱۳۷	۰.۸۳۶۵
۷	۱۶	۲	۲	-۴	۱,۰۰۰۰	۲	-۴	۱,۰۰۰۰
۸	۲۲	۳	۵	۰.۷۹۷۳	۱,۰۰۰۰	۵.۰۱۲۸	-۱.۷۵۱۴	۰.۹۸۱۴
۹	۳۵	۴	۷	۳	۱,۰۰۰۰	۷	۳	۱,۰۰۰۰
۱۰	۷۱	۴	۸	۷.۰۹۰۱	۰.۷۸۵۷	۸.۰۸۲۹	۷.۰۷۴۳	۰.۷۴۶۳
۱۱	۲۳	۱	۳	۰.۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۳.۸۲۶۴	-۰.۹۶۷۹	۰.۷۸۹۴
۱۲	۳۵	۲	۴	۲.۲۸۷	۱,۰۰۰۰	۵.۳۷۷۴	۲.۵۶۷۵	۰.۷۰۷۰
۱۳	۱۶	۱	۳	-۵	۱,۰۰۰۰	۳	-۵	۱,۰۰۰۰
۱۴	۲۱	۲	۳	-۱.۴۱۶۳	۱,۰۰۰۰	۳.۷۹۶۶	-۰.۸۸۶۶	۰.۸۳۷۶
۱۵	۳۱	۱	۴	-۲.۵۴۵۵	۱,۰۰۰۰	۳.۴۶۶۱	-۳.۲۵۰۷	۰.۷۷۹۳
۱۶	۴۲	۳	۷	۷	۱,۰۰۰۰	۷.۱۶۵۱	۷.۰۳۸۹	۰.۷۷۱۸
۱۷	۵۴	۳	۷	۳	۱,۰۰۰۰	۶.۶۰۲۶	۶.۰۱۵۸	۰.۶۰۹۲
۱۸	۱۴	۲	۳	-۴.۹۹۰۳	۱,۰۰۰۰	۲.۲۹۵۴	-۴.۰۶۳۳	۰.۹۵۸۶
۱۹	۳۲	۲	۵	۵.۸۸۰۴	۱,۰۰۰۰	۶.۲۸۲۴	۴.۴۱۰۸	۰.۷۱۱۹
۲۰	۶۹	۴	۹	۹.۳۵۴۷	۰.۹۲۸۶	۸.۳۴۷۳	۷.۹۰۴۳	۰.۸۵۱۶
۲۱	۳۵	۲	۳	-۸	۱,۰۰۰۰	۳	-۸	۱,۰۰۰۰
۲۲	۲۷	۲	۳	-۱.۴۴۱۴	۱,۰۰۰۰	۳.۳۶۵۵	-۱.۲۶۸۵	۰.۸۰۴۵
۲۳	۱۸	۲	۵	-۱	۱,۰۰۰۰	۵	-۱	۱,۰۰۰۰
۲۴	۵۳	۴	۷	۷.۴۰۴۳	۰.۸۵۲۹	۷.۵۹۵۷	۶.۹۲۶۵	۰.۸۱۱۵
۲۵	۲۴	۳	۵	۱	۱,۰۰۰۰	۵.۴۶۴۸	۲.۸۳۳۴	۰.۶۴۵۳
۲۶	۷۵	۴	۶	۱۰	۱,۰۰۰۰	۶	۱۰	۱,۰۰۰۰
۲۷	۲۷	۱	۳	-۸	۱,۰۰۰۰	۲.۱۵۸۴	-۳.۰۷۳۷	۰.۹۵۱۶
۲۸	۸۲	۳	۱۱	۴	۱,۰۰۰۰	۱۱	۴	۱,۰۰۰۰

نتایج حاصل از مدل (۷)		نتایج حاصل از مدل (۵)		DMU
$\tilde{y}_{2j}^{(2)*}$	$\tilde{y}_{1j}^{(2)*}$	\hat{z}_{2j}^*	\hat{z}_{1j}^*	کارایی
۲۳	۲	۳	-۱.۰۷۶۹	۱,۰۰۰۰
				کارایی
				۴.۳۵۰۸
				۰.۳۴۸۰
				۰.۷۴۳۱
				۲۹

نقاط تصویر به دست آمده برای DMUها بیانگر آن هست که هر زنجیره‌ی تأمین برای رسیدن به مرز کارایی باید چه میزان تعدیل در مقادیر محصولات بینابینی انجام دهد. به بیان دیگر، این نقاط تصویر نسخه‌ی «بهینه‌سازی‌شده»ی داده‌های واقعی‌اند که دقیقاً روی مرز کارایی PPS قرار می‌گیرند. بنابراین، تحلیل این نقاط تصویر نقش مهمی در درک منشأ ناکارایی و تعیین مسیر اصلاح عملکرد زنجیره‌های تأمین دارد. بررسی مجموعه‌ی نقاط تصویر نشان می‌دهد که DMUهای ناکارا تغییرات قابل توجهی در نقاط تصویر خود تجربه کرده‌اند. در بسیاری موارد، یکی از مؤلفه‌های تصویر نسبت به مقدار واقعی افزایش یافته که بیانگر نیاز به ارتقای خروجی بخش اول یا بهبود کیفیت جریان انتقال یافته به بخش دوم است. برای نمونه، DMUهایی که ترکیب‌های محصولات بینابینی آنها افزایش یافته (مانند DMUهای ۴، ۸، ۱۵، ۱۹ و ۲۶)، نیازمند افزایش کارایی بخش اول جهت هم‌ترازی با عملکرد مرزی هستند. در نقطه‌ی مقابل، برخی DMUها کاهش محسوس در یکی از متغیرها نشان می‌دهند (نظیر کاهش معنادار در محصول بینابینی اول DMUهای ۶، ۱۷، ۲۰ و ۲۹)، که بیانگر وجود اضافه‌مصرف یا ناکارایی در بخش دوم و نیاز به تعدیل پایین‌دستی است. در مجموع، پراکندگی نقاط تصویر نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از ناکارایی زنجیره‌های تأمین ناشی از ناهماهنگی بین بخش‌های دوگانه‌ی سیستم سری است. مدل (۵) با ارائه‌ی نقاط تصویر نه تنها شدت و جهت ناکارایی را مشخص می‌کند، بلکه مسیر دقیق اصلاح را برای هر DMU ترسیم کرده و بنابراین می‌تواند مبنای معتبری برای تصمیم‌گیری مدیریتی در بهبود زنجیره‌های تأمین باشد.

با فرض پیوسته‌بودن داده‌ها، امتیازهای کارایی زنجیره‌های تأمین بر اساس مدل (۷) در شرایط وجود داده‌های منفی و متغیرهای مقدار صحیح در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول، افزون بر گزارش کارایی کلی سیستم در ستون پنجم، نقاط تصویر محصولات بینابینی و نیز مقادیر تصویر متغیرهای مقدار صحیح—شامل دو خروجی نخست—را برای هر زنجیره‌ی تأمین در ستون‌های ۶ تا ۹ ارائه می‌کند. ارائه‌ی هم‌زمان این دو نوع تصویر، امکان تحلیل دقیق ساختار درونی زنجیره‌ی تأمین را فراهم می‌سازد و مشخص می‌کند که هر زنجیره برای رسیدن به

مرز کارایی، چه بازتنظیم‌هایی در جریان مواد و تصمیمات گسسته‌ی عملیاتی نیاز دارد. بر اساس نتایج گزارش‌شده در جدول ۲، از میان ۲۹ زنجیره‌ی تأمین مورد بررسی، تنها چهار زنجیره‌ی تأمین ناکارایی کلی هستند. این نتیجه بیانگر آن است که ناکارایی این زنجیره‌های تأمین ریشه در یکی یا هر دو بخش سیستم دارد. برخی زنجیره‌های تأمین ممکن است در بخش اول کارا باشند اما در بخش دوم ناکارا. دلیل این امر آن است که چون این زنجیره‌های تأمین در بخش اول کارا هستند، حجم زیادی از محصولات بینابینی تولید می‌کنند که بخش دوم آن‌ها را مصرف می‌کند. این موضوع به افزایش مصرف ورودی‌ها در بخش دوم و کاهش کارایی آن بخش می‌انجامد. همین منطق برای زنجیره‌های تأمین ناکارا در بخش اول نیز صدق می‌کند. همچنین مقادیر تصویر گزارش‌شده، جهت‌گیری کمی لازم برای اصلاح عملکرد و بازآرایی فرآیندهای آن‌ها را به‌روشنی مشخص می‌کند.

نتایج حاصل از مدل (۵) و مدل (۷) نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی نه تنها قادر به ارزیابی کارایی سیستم‌های دوبرخشی با داده‌های پیوسته و گسسته است، بلکه امکان شناسایی دقیق منابع ناکارایی و ارائه راهکارهای بهبود کمی را فراهم می‌کند. مقایسه ستون‌های کارایی دو مدل در جدول ۲ نشان می‌دهد که در نظر گرفتن قیود صحیح در مدل (۷) منجر به تغییرات معناداری در امتیاز کارایی و نقاط تصویر شده است. برای مثال، DMU_۴ با بهبود کارایی از ۰/۷۰۸۲ به ۱/۰۰۰۰ و DMU_۵ از ۰/۶۳۳۳ به ۱/۰۰۰۰، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت مدل (۷) در دستیابی به مرز کارایی حتی در حضور داده‌های گسسته است. این بهبود عمدتاً ناشی از توانایی مدل در تنظیم بهینه‌ی متغیرهای صحیح (مانند تعداد محصولات) است که در مدل (۵) نادیده گرفته می‌شود.

نقاط تصویر محاسبه‌شده در ستون‌های ۶ تا ۹ جدول ۲، نقشه‌ی راه دقیقی برای مدیریت زنجیره‌ی تأمین ارائه می‌دهند. برای نمونه: DMU_۲ نیاز به کاهش محصول بینابینی دوم از ۱۰ به ۸/۵۶۰۱ (مدل (۵)) و تعدیل به مقدار صحیح ۹ (مدل (۷)) دارد تا به کارایی برسد. این نشان‌دهنده‌ی افزایش تولید در بخش اول است. DMU_۱ با کاهش محصول بینابینی اول از ۰/۵۱۲۷- به ۰/۳۹۵۲- (مدل (۷))، نیاز به کاهش ورودی‌های بخش دوم برای جلوگیری از اتلاف منابع دارد. DMU_{۱۷} بهبود چشمگیر کارایی از ۰/۶۰۹۲ به ۱/۰۰۰۰ با تنظیم محصول بینابینی اول از ۶/۶۰۲۶ به ۷ (مقدار صحیح) نشان می‌دهد که بهینه‌سازی متغیرهای گسسته می‌تواند

ناکارایی ساختاری را حل کند. بررسی الگوی نقاط تصویر نشان می‌دهد که ناکارایی در زنجیره‌های تأمین عمدتاً ناشی از دو عامل است:

(۱) عدم توازن بین بخش‌ها: در DMUهایی مانند DMU_{10} و DMU_{24} ، محصولات بینابینی بهینه‌شده نشان می‌دهند که بخش اول قادر به تأمین نیازهای بخش دوم نیست.

(۲) مدیریت ناکارای منابع گسسته: در DMU_{20} ، کارایی از ۰/۸۵۱۶ به ۰/۹۲۸۶ بهبود یافته اما به ۱ نرسیده که دلیل آن محدودیت‌های ذاتی در تنظیم متغیرهای صحیح (مانند تعداد نیروی انسانی یا ماشین‌آلات) است.

مدل پیشنهادی با یکپارچه‌سازی داده‌های پیوسته و گسسته، امکان شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از زنجیره‌ی تأمین را فراهم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که عدم توجه به ماهیت گسسته برخی متغیرها (مانند تعداد محصولات) می‌تواند منجر به برآورد نادرست کارایی و توصیه‌های غیرعملی شود. این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای شفاف‌سازی عملکرد و تعیین راهبردهای بهبود در صنایع مبتنی بر داده‌های ترکیبی (پیوسته و گسسته) به کار رود. این تحلیل نشان می‌دهد که پژوهش حاضر نه تنها به ارزیابی کارایی می‌پردازد، بلکه با ارائه بینش علی و کمی، زمینه را برای تصمیم‌گیری راهبردی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین فراهم می‌کند.

۵-۱- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت که گاهی آنالیز پس از بهینه‌سازی نیز نامیده می‌شود، ستون فقرات تصمیم‌گیری مستحکم در چارچوب برنامه‌ریزی خطی محسوب می‌شود. این تحلیل به بررسی پایداری و اعتبار جواب بهینه‌ی نهایی در برابر تغییرات احتمالی و اغلب اجتناب‌ناپذیر در پارامترهای مدل، شامل ضرایب تابع هدف، مقادیر سمت راست قیود و ضرایب فنی می‌پردازد. اهمیت حیاتی آن نه تنها در تعیین محدوده‌ی مجاز برای این پارامترها، که در آن ساختار جواب پایه‌ی بهینه بدون تغییر باقی می‌ماند، بلکه در شناسایی قیود فعال و پارامترهای حساس که بیشترین تأثیر را بر روی مقدار بهینه‌ی تابع هدف دارند، نهفته است. این تحلیل به تصمیم‌گیرنده امکان می‌دهد تا سنجش کمی ریسک ناشی از عدم قطعیت در داده‌ها را انجام دهد، قابلیت اطمینان مدل را ارزیابی کند و در نهایت، بینشی عمیق برای اتخاذ تصمیم‌های راهبردی و مدیریت منابع فراهم آورد.

تحلیل حساسیت در مدل DDF با هدف واکاوی میزان استواری و پایداری امتیازات کارایی

DMUها در برابر نوسانات پارامترهای هدایت‌کننده، یعنی بردارهای جهت، انجام می‌شود. از آنجا که ماهیت مدل DDF بر پروژه‌سازی ناکارایی در امتداد یک مسیر مشخص از نقطه مشاهده شده به سمت مرز PPS استوار است، انتخاب بردار جهت نقش یک پارامتر سیاستی کلیدی را ایفا می‌کند که مستقیماً بر نقاط تصویر و در نتیجه مقدار تابع هدف تأثیر می‌گذارد. پورتلا و همکاران [۳۰]، برای مدل DDF، بردار جهت را به شکل زیر مشخص نمودند:

$$\begin{cases} f_{io}^{(1)} = \max_{j=1,\dots,n} \{x_{ij}^{(1)}\} - \min_{j=1,\dots,n} \{x_{ij}^{(1)}\}, & i = 1, \dots, m, \\ g_{ro}^{(2)} = \max_{j=1,\dots,n} \{y_{rj}^{(2)}\} - \min_{j=1,\dots,n} \{y_{rj}^{(2)}\}, & r = 1, \dots, s. \end{cases} \quad (8)$$

بردار جهت (۸)، عملاً از دامنه‌ی تغییرات هر متغیر در کل مجموعه داده‌ها به‌عنوان معیار جهت استفاده می‌کند. این انتخاب، بردار را به مقیاس داده‌ها حساس کرده و آن را از مقیاس‌پذیری مدل مستقل می‌سازد، همچنین بر اهمیت نسبی هر متغیر در مجموعه مورد مطالعه تأکید دارد. با اجرای مدل (۵)، از بین ۲۹ DMU مورد بررسی، نتایج حاکی از آن است که ۱۳ DMU (حدود ۴۴٫۸۳٪) کاملاً کارا هستند. این DMUها تشکیل‌دهنده مرز تولید کارا هستند و به‌عنوان معیار مقایسه برای سایر DMUهای ناکارا عمل می‌کنند. عملکرد مابقی واحدها (۱۶ DMU، حدود ۵۵٫۱۷٪) درجاتی از ناکارایی را نشان می‌دهند. انتخاب بردار جهت مبتنی بر دامنه‌ی تغییرات، باعث می‌شود نتایج کارایی به تغییرات در مقادیر متغیرهای افراطی (ماکزیمم و مینیمم) حساس باشد. این حساسیت یک مزیت محسوب می‌شود، چرا که مرز کارایی را با در نظر گرفتن کامل گستره‌ی واقعی داده‌ها تعریف می‌کند. با مقایسه‌ی ستون دوم جدول ۲ و ستون دوم جدول ۳، نتایج زیر حاصل می‌شود:

(۱) میانگین کارایی در ستون دوم جدول ۳ به میزان قابل توجهی (حدود ۹٫۵ واحد درصد) بالاتر است. این نشان می‌دهد انتخاب بردار جهت دوم به طور کلی منجر به برآورد خوشبینانه‌تری از کارایی شده است.

(۲) پراکندگی داده‌های کارایی در ستون دوم جدول ۲ بسیار بیشتر است (انحراف معیار حدود دو برابر). این نشان می‌دهد بردار جهت (۶)، تمایز بیشتری بین DMUهای کارا و ناکارا قائل شده و نتایج را قطبی‌تر کرده است. ستون دوم جدول ۳ نتایج همگن‌تر و باثبات‌تری دارد.

۳) حداقل کارایی در ستون دوم جدول ۳ بالاتر است. این یک نقطه قوت کلیدی برای بردار جهت دوم محسوب می‌شود، زیرا نشان می‌دهد حتی ضعیف‌ترین DMUها تحت این جهت، عملکرد به مراتب بهتری دارند.

۴) تعداد DMUهای کاملاً کارا در ستون دوم جدول ۳ بیشتر است (۱۳ DMU در مقابل ۹ DMU). این نیز موید خوشبینانه‌تر بودن بردار جهت (۸) است.

۵) میانه ستون دوم جدول ۳ (یعنی ۰/۹۵۱) نیز بسیار نزدیک به ۱ است، که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر داده‌ها در اطراف مقادیر بالا است، در حالی که میانه ستون دوم جدول ۲ (یعنی ۰/۸۰۴) مقداری پایین‌تر را نشان می‌دهد.

این مقایسه به وضوح نشان می‌دهد که چگونه انتخاب بردار جهت در مدل DDF می‌تواند به طور رادیکال نتایج کارایی و رتبه‌بندی DMUها را تغییر دهد. این یک موضوع حیاتی در مطالعات DEA است.

جدول ۳: کارایی ۲۹ زنجیره‌ی تأمین مبتنی بر بردارهای جهت مختلف در چارچوب مدل DDF.

	نتایج مدل (۷) بر اساس جهت‌های				نتایج مدل (۵) بر اساس جهت‌های				DMU
	(۱۱)	(۱۰)	(۹)	(۸)	(۱۱)	(۱۰)	(۹)	(۸)	
۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱
۲	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۲
۳	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۳
۴	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۶۰	۰/۸۹۰۰	۰/۸۸۸۳	۰/۸۷۳۲	۴
۵	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۴۵	۰/۸۴۰۴	۰/۸۶۵۹	۰/۸۸۶۴	۵
۶	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۵	۰/۹۴۰۷	۰/۹۳۴۶	۰/۹۵۱۸	۶
۷	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۷
۸	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۵۷	۰/۹۹۴۵	۸
۹	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۹
۱۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱۰
۱۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۸۰	۰/۹۲۴۶	۰/۹۱۳۵	۰/۹۳۶۸	۱۱
۱۲	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۵۲	۰/۸۶۶۵	۰/۸۷۰۶	۰/۸۹۶۱	۱۲
۱۳	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱۳
۱۴	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۵۶	۰/۹۴۵۵	۰/۹۳۶۶	۰/۹۳۸۵	۱۴
۱۵	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۸	۰/۹۶۶۵	۰/۹۵۷۲	۰/۹۴۵۵	۱۵

DMU	نتایج مدل (۷) بر اساس جهت‌های				نتایج مدل (۵) بر اساس جهت‌های			
	(۱۱)	(۱۰)	(۹)	(۸)	(۱۱)	(۱۰)	(۹)	(۸)
۱۶	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۷۸	۰٫۹۲۹۲	۰٫۹۵۶۴	۰٫۹۶۵۰
۱۷	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۴۴	۰٫۸۰۳۲	۰٫۸۴۳۰	۰٫۸۶۰۱
۱۸	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۹۵	۰٫۹۹۲۹	۰٫۹۹۱۶	۰٫۹۸۸۴
۱۹	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۵۴	۰٫۹۰۴۲	۰٫۹۱۲۱	۰٫۸۹۷۲
۲۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۱	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۲	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۷۰	۰٫۹۳۰۸	۰٫۹۱۸۹	۰٫۹۱۹۷
۲۳	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۴	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۵	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۵۳	۰٫۸۶۷۴	۰٫۸۷۶۱	۰٫۸۳۰۴
۲۶	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۷	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۹۹	۰٫۹۹۷۴	۰٫۹۹۶۶	۰٫۹۹۵۳
۲۸	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰
۲۹	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۹۴۵	۰٫۹۰۷۷	۰٫۸۹۸۲	۰٫۸۹۰۸

محققان متعددی جهت‌های جایگزین و تخصصی‌تری را برای مدل DDF پیشنهاد داده‌اند که هر یک با اهداف تحلیلی خاصی طراحی شده‌اند. این جهت‌ها عموماً با هدف افزایش انعطاف‌پذیری مدل، انطباق با شرایط واقعی بازار، یا تمرکز بر بهبود بخش‌های خاصی از فرآیند تولید تعریف می‌شوند. به‌عنوان مثال، برخی از مطالعات از بردارهای جهتی استفاده می‌کنند که بر اساس مقادیر میانه یا انحراف معیار مجموعه داده‌ها تعیین می‌شوند تا اثر داده‌های پرت را کاهش دهند. این توسعه‌ها نشان‌دهنده غنای روش‌شناختی چارچوب DDF و توانایی آن در تطبیق با مسائل کاربردی پیچیده است. مطابق پژوهش چمبرز و همکاران [۲۸]، بردار جهت در مدل DDF به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{cases} f_{io}^{(1)} = x_{io}^{(1)}, & i = 1, \dots, m, \\ g_{ro}^{(2)} = y_{ro}^{(2)}, & r = 1, \dots, s. \end{cases} \quad (9)$$

نتایج حاصل از اعمال بردار جهت (۹) در ارزیابی کارایی، در ستون سوم جدول ۳ ارائه گردیده است.

با الهام از پژوهش آپاریسیو^۱ و همکاران [۵۱]، بردارهای جهت مورد استفاده در مدل DDF به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{cases} f_{io}^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(1)}, & i = 1, \dots, m, \\ g_{ro}^{(2)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{rj}^{(2)}, & r = 1, \dots, s. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_{io}^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^{(1)} - \bar{x}_i^{(1)})^2}, & i = 1, \dots, m, \\ g_{ro}^{(2)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{rj}^{(2)} - \bar{y}_r^{(2)})^2, & r = 1, \dots, s. \end{cases} \quad (11)$$

در تحلیل نهایی، انتخاب بردار جهت در مدل DDF نه تنها یک تصمیم تکنیکی، بلکه انعکاسی از اولویت‌های سیاستی و اهداف ارزیابی است. بردارهای جهت متفاوت، به عنوان معیارهای سنجش مسیر بهبود، دیدگاه‌های متمایزی را در سنجش کارایی ارائه می‌دهند. بردارهای مبتنی بر دامنه داده‌ها (مانند دامنه تغییرات) بهبود در مقیاس مطلق را هدف قرار می‌دهند و برای محیط‌های با ناهمگونی بالا مناسب هستند، در حالی که بردارهای مبتنی بر مقادیر خود DMU (مانند مقادیر مشاهده شده) بهبود نسبی و متناسب با اندازه‌ی هر DMU را مدنظر قرار می‌دهند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این انتخاب تأثیر معناداری بر توزیع کارایی، رتبه‌بندی DMUها و شناسایی الگوهای بهبود دارد. بنابراین، محققان و تصمیم‌گیرندگان باید با در نظرگیری ماهیت داده‌ها، زمینه صنعتی و هدف نهایی تحلیل، بردار جهت را به صورت آگاهانه انتخاب کنند تا نتایج به دست آمده هم از نظر تئوریک تاب‌آور باشد و هم از نظر عملیاتی قابل اجرا و معنادار.

۶- پیامدهای مدیریتی

مدل DEA شبکه‌ای پیشنهادی مبتنی بر DDF پیامدهای مهمی برای مدیران زنجیره‌ی تأمین، به ویژه در صنعت تجهیزات مصرفی پزشکی، به همراه دارد. نخست آن‌که امکان مدیریت

^۱ Aparicio

هم‌زمان داده‌های منفی و متغیرهای مقدار صحیح—که در عملیات واقعی به‌کرات مشاهده می‌شوند—سبب می‌شود برآوردهای کارایی به‌طور مستقیم با شرایط اجرایی و محدودیت‌های تصمیم‌گیری سازگار باشند. این ویژگی، خطاهای ناشی از مدل‌های سنتی DEA را که داده‌ها را پیوسته و نامنفی فرض می‌کنند از میان برداشته و اعتبار مدیریتی نتایج را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

دوم، توانایی مدل در ارائه‌ی نقاط تصویر برای هر بخش، مدیران را قادر می‌سازد منشأ ناکارایی را در سطح هر بخش با دقت شناسایی کنند. به‌جای اتکا به یک امتیاز کلی، مدیران می‌توانند تشخیص دهند که ناکارایی در بخش تأمین، بخش تولید، یا به‌سبب ناهماهنگی میان این دو رخ داده است. این نوع تشخیص مرحله‌ای امکان تدوین مداخلات هدفمند—تظیر افزایش کارایی برنامه‌های تولید سبز، بهبود تخصیص کارکنان آموزش‌دیده، یا بازتنظیم جریان محصولات بینابینی—را فراهم می‌سازد و از تصمیمات کلی و غیرموثر جلوگیری می‌کند. سوم، تعیین سازگار و مشترک مقدار محصول بینابی میان دو بخش، مدیران را به اتخاذ تصمیمات هماهنگ در سطح کل زنجیره‌ی تأمین هدایت می‌کند. این ویژگی از ارائه‌ی توصیه‌های بهبود متناقض جلوگیری کرده و اطمینان می‌دهد که اقدامات اصلاحی در یک بخش عملکرد بخش دیگر را مختل نخواهد کرد. چنین هماهنگی‌ای در زنجیره‌های تأمین تجهیزات پزشکی—که هم‌زمان با حساسیت بالا و پیچیدگی عملیاتی روبه‌رو هستند—برای جلوگیری از کمبود موجودی، حفظ کیفیت و تضمین تداوم خدمت حیاتی است.

در نهایت، نتایج مطالعه‌ی موردی نشان می‌دهد که منبع اصلی ناکارایی در بسیاری از زنجیره‌های مورد بررسی، نه کمبود منابع، بلکه عدم‌تعادل عملکردی میان دو بخش سیستم است. این یافته نگاه مدیران را از تمرکز صرف بر کاهش هزینه‌ها به سمت هم‌ترازی عملیات، بازطراحی فرایندها و بهبود هماهنگی درون‌زنجیره‌ای هدایت می‌کند. از این منظر، مدل پیشنهادی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری راهبردی، تخصیص بهینه‌ی منابع و افزایش تاب‌آوری زنجیره‌ی تأمین در صنایع حساس، به‌ویژه تجهیزات مصرفی پزشکی، باشد.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل جدید DEA برای سیستم‌های شبکه‌ای سری ارائه کرد که بر پایه‌ی DDF بنا شده و قابلیت پردازش هم‌زمان داده‌های منفی و متغیرهای مقدار صحیح را داراست. مدل

پیشنهادی با تعریف یک بردار جهت سازگار و انعطاف‌پذیر، نه تنها امکان برآورد کارایی را تحت هر دو فرض CRS و VRS فراهم می‌کند، بلکه محدودیت‌های روش شناختی مدل‌های پیشین—از جمله ناتوانی در مدیریت داده‌های مقدار صحیح و ناهماهنگی میان بخش‌های درونی سیستم—را نیز برطرف می‌سازد. ادغام سازوکار تعیین مشترک محصول بینابینی میان دو بخش، موجب شد مدل در مقایسه با رویکردهای کلاسیک شبکه‌ای، تصویری منسجم، سازگار و عملیاتی از ساختار درونی DMUها ارائه کند.

نتایج حاصل از مطالعه‌ی موردی ۲۹ زنجیره‌ی تأمین تجهیزات مصرفی پزشکی نشان داد که مدل پیشنهادی قدرت تفکیک بالایی در شناسایی DMUهای کارا و ناکارا دارد و از طریق نقاط تصویر، مسیر دقیق اصلاح عملکرد برای هر بخش را ترسیم می‌کند. این تحلیل بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از ناکارایی برخی زنجیره‌ها ناشی از ناهماهنگی میان دو بخش اصلی سیستم سری است؛ موضوعی که در مدل‌های متداول DEA معمولاً پنهان می‌ماند. افزون بر این، توجه هم‌زمان به داده‌های منفی و مقدار صحیح سبب شد برآورد کارایی منعکس‌کننده‌ی واقعیت‌های عملیاتی و محدودیت‌های تصمیم‌گیری در صنایع حساس باشد.

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری معتبر، انعطاف‌پذیر و کاربردی برای ارزیابی و بهبود عملکرد سیستم‌های چندبخشی مورد استفاده قرار گیرد؛ به‌ویژه در حوزه‌هایی که با جریان‌های متوالی، داده‌های منفی و متغیرهای ذاتاً مقدار صحیح مواجه‌اند. با این حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه است که زمینه‌ساز مطالعات آتی محسوب می‌شوند. نخست، مدل پیشنهادی بر سیستم‌های سری دوبخشی متمرکز است و تعمیم آن به شبکه‌های با ساختار پیچیده‌تر نیازمند توسعه‌ی نظری بیشتر است. دوم، مدل حاضر یک چارچوب ایستا ارائه می‌دهد و پویایی‌های زمانی و اثرات تغییر فناوری در طول زمان را در نظر نمی‌گیرد. به‌عنوان جهت‌های پژوهشی آینده، می‌توان تعمیم این مدل به ساختارهای شبکه‌ای پیچیده‌تر (مانند سیستم‌های موازی، ترکیبی یا شبکه‌های چندبخشی) یا نسخه‌های پویای مدل [۵۲] برای افق‌های زمانی چنددوره‌ای را پیشنهاد داد. همچنین، توسعه‌ی مدل در محیط‌های عدم قطعیت با استفاده از داده‌های فازی یا تصادفی، و نیز ادغام شاخص‌های پایداری و ریسک در چارچوب پیشنهادی، می‌تواند دامنه‌ی کاربردی آن را گسترش دهد [۵۳]. در نهایت، به‌کارگیری این چارچوب در سایر صنایع حساس و با ساختار شبکه‌ای مشابه (مانند

انرژی، بانکداری یا لجستیک) می‌تواند اعتبار و توان مدل را بیشتر محک زده و بینش‌های مدیریتی جدیدی ایجاد کند.

۸- منابع

- [۱] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. L. (۱۹۷۸). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, ۲(۶), ۴۲۹-۴۴۴. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [۲] Azizi, H. & Jahed, R. (۲۰۱۵). Supplier Selection in Volume Discount Environments in the Presence of Both Cardinal and Ordinal Data: A New Approach Based On Double Frontiers DEA. *Management Research in Iran*, 19(۳), ۱۹۱-۲۱۷. <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۳۲۲۲۰۰.۱۳۹۴.۱۹.۳.۸.۰>
- [۳] Azizi, H., Amirteimoori, A., & Kordrostami, S. (۲۰۱۸). Measurement of the worst practice of decision-making units: Incorporating both undesirable outputs and non-discretionary inputs into imprecise DEA. *Modern Researches in Decision Making*, 3(۲), ۱۹۷-۲۲۲. (In Persian)
- [۴] Azizi, H. (۲۰۲۰). New models for selecting third-party reverse logistics providers in the presence of multiple dual-role factors: Data envelopment analysis with double frontiers. *Decisions and Operations Research*, 5(۲), ۲۲۱-۲۳۲. (In Persian)
- [۵] Liu, J. S., Lu, L. Y. Y., Lu, W. M., & Lin, B. J. Y. (۲۰۱۳). A survey of DEA applications. *Omega*, ۴۱(۵), ۸۹۳-۹۰۲. <https://doi.org/10.1016/j.omega.۲۰۱۲.۱۱.۰۰۴>
- [۶] Azizi, H. (۲۰۱۲). Efficiency assessment in data envelopment analysis using efficient and inefficient frontiers. *Management Research in Iran*, 16(۳), ۱۵۳-۱۷۳. <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۳۲۲۲۰۰.۱۳۹۱.۱۶.۳.۸.۹>
- [۷] Mergoni, A., Camanho, A., Soncin, M., Agasisti, T., & De Witte, K. (۲۰۲۶). The influence of School principals' management on school efficiency: Evidence from Italian schools. *European Journal of Operational Research*, 329(۱), ۲۶۰-۲۷۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.۲۰۲۵.۰۶.۰۱۹>
- [۸] Färe, R., & Grosskopf, S. (۲۰۰۰). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, ۳۴(۱), ۳۵-۴۹. [https://doi.org/10.1016/S0038-0121\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0121(99)00122-1)
- [۹] Lovell, C. A. K., Walters, L. C., & Wood, L. L. (۱۹۹۴). Stratified models of education production using modified DEA and regression analysis. In A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, & L. M. Seiford (Eds.), *Data envelopment analysis: Theory, methodology and applications* (pp. ۳۲۹-۳۵۱). Kluwer.
- [۱۰] Seiford, L. M., & Zhu, J. (۱۹۹۹). Profitability and marketability of the top ۵۵ US commercial banks. *Management Science*, ۴۵(۹), ۱۲۷۰-۱۲۸۸. <https://doi.org/10.1287/mnsc.۴۵.۹.۱۲۷۰>
- [۱۱] Wang, C. H., Gopal, R., & Zions, S. (۱۹۹۷). Use of data envelopment analysis in assessing information technology impact on firm performance. *Annals of Operations Research*, ۷۳, ۱۹۱-۲۱۳. <https://doi.org/10.1023/A:10189771114۵۵>
- [۱۲] Färe, R. (۱۹۹۱). Measuring Farrell efficiency for a firm with intermediate inputs. *Academia Economic Papers*, ۱۹, ۳۲۹-۳۴۰.
- [۱۳] Färe, R., & Whittaker, G. (۱۹۹۵). An intermediate input model of dairy production using

- complex survey data. *Journal of Agricultural Economics*, ۴۶(۲), ۲۰۱-۲۱۳. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1995.tb00766.x>
- [۱۴] Färe, R., & Grosskopf, S. (۱۹۹۶). Productivity and intermediate products: A frontier approach. *Economics Letters*, ۵۰(۱), ۶۵-۷۰. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(95\)00729-6](https://doi.org/10.1016/0165-1765(95)00729-6)
- [۱۵] Löthgren, M., & Tambour, M. (۱۹۹۹). Productivity and customer satisfaction in Swedish pharmacies: A DEA network model. *European Journal of Operational Research*, ۱۱۵(۳), ۴۴۹-۴۵۸. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00177-5)
- [۱۶] Kao, C., & Hwang, S. N. (۲۰۰۸). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, ۱۸۵(۱), ۴۱۸-۴۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.041>
- [۱۷] Kao, C., & Liu, S. T. (۲۰۱۱). Efficiencies of two-stage systems with fuzzy data. *Fuzzy Sets and Systems*, ۱۷۶(۱), ۲۰-۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2011.03.003>
- [۱۸] Kao, C., & Hwang, S. N. (۲۰۱۱). Decomposition of technical and scale efficiencies in two-stage production systems. *European Journal of Operational Research*, ۲۱۱(۳), ۵۱۵-۵۱۹. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.010>
- [۱۹] Chen, Y., Cook, W. D., Li, N., & Zhu, J. (۲۰۰۹). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA. *European Journal of Operational Research*, ۱۹۶(۳), ۱۱۷۰-۱۱۷۶. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.011>
- [۲۰] Kao, C. (۲۰۱۴). Network data envelopment analysis: A review. *European Journal of Operational Research*, ۲۳۹(۱), ۱-۱۶. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.039>
- [۲۱] Liu, J. S., Lu, L. Y. Y., & Lu, W. M. (۲۰۱۶). Research fronts in data envelopment analysis. *Omega*, ۵۸, ۳۳-۴۵. <https://doi.org/j.omega.2015.04.004>
- [۲۲] An, Q. X., Wen, Y., Chu, J. F., & Chen, X. H. (۲۰۱۹). Profit inefficiency decomposition in a serial-structure system with resource sharing. *Journal of the Operational Research Society*, ۷۰(۱۲), ۲۱۱۲-۲۱۲۶. <https://doi.org/10.1080/01606682.2018.1510811>
- [۲۳] Lin, R., & Liu, Q. (۲۰۲۲). Directional distance based efficiency decomposition for series system in network data envelopment analysis. *Journal of the Operational Research Society*, ۷۳(۸), ۱۸۷۳-۱۸۸۸. <https://doi.org/10.1080/01606682.2021.1931498>
- [۲۴] Amirteimoori, A., Azizi, H., & Kordrostami, S. (۲۰۲۰). Double frontier two-stage fuzzy data envelopment analysis. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, ۲۸, ۱۱۷-۱۵۲. <https://doi.org/10.1142/S0218488520000673>
- [۲۵] Azadi, M., Azizi, H., & Farzipoor Saen, R. (۲۰۲۳). Coordination of public-private transport and sustainability measurement: A futuristic perspective in transport. *Journal of Cleaner Production*, ۴۲۰, ۱۳۸۴۶۴. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138464>
- [۲۶] Zhu, W. W., Miao, Z. Y., & Pu, X. J. (۲۰۲۰). Serial network DEA models with a single intermediate measure. *Journal of the Operational Research Society*, ۷۲(۵), ۱۱۶۸-۱۱۷۳. <https://doi.org/10.1080/01606682.2020.1750899>
- [۲۷] Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (۱۹۸۴). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, ۳۰(۹), ۱۰۷۸-۱۰۹۲. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- [۲۸] Chambers, R. G., Chung, Y., & Färe, R. (۱۹۹۸). Profit, directional distance functions,

- and Nerlovian efficiency. *Journal of Optimization Theory and Applications*, ۹۸(۲), ۳۵۱–۳۶۴. <https://doi.org/10.1007/A01023637001082>
- [۲۹] Tone, K. (۲۰۰۱). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, ۱۳۰(۳), ۴۹۸–۵۰۹. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-0)
- [۳۰] Portela, M. C. A. S., Thanassoulis, E., & Simpson, G. (۲۰۰۴). Negative data in DEA: A directional distance approach applied to bank branches. *Journal of the Operational Research Society*, ۵۵(۱۰), ۱۱۱۱–۱۱۲۱. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601768>
- [۳۱] Cheng, G., Zervopoulos, P., & Qian, Z. (۲۰۱۳). A variant of radial measure capable of dealing with negative inputs and outputs in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, ۲۲۵(۱), ۱۰۰–۱۰۵. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.031>
- [۳۲] Kerstens, K., & Van de Woestyne, I. (۲۰۱۴). A note on a variant of radial measure capable of dealing with negative inputs and outputs in DEA. *European Journal of Operational Research*, ۲۳۴(۱), ۳۴۱–۳۴۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.067>
- [۳۳] Lin, R., & Chen, Z. (۲۰۱۷). A directional distance based super-efficiency DEA model handling negative data. *Journal of the Operational Research Society*, ۶۸(۱۱), ۱۳۱۲–۱۳۲۲. <https://doi.org/10.1057/01443757160137-8>
- [۳۴] Lin, R., & Liu, Y. (۲۰۱۹). Super-efficiency based on the directional distance function in the presence of negative data. *Omega*, ۸۵, ۲۶–۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.009>
- [۳۵] Lu, Y. H., Chen, P. C., & Hsiao, T. Y. (۲۰۱۴). Operational efficiency in credit departments of farmers' associations with consideration of non-performing loans and negative values: Application of dynamic network DE. *The Macrotheme Review*, ۳(۱), ۱۵۰–۱۶۴.
- [۳۶] Izadikhah, M., & Farzipoor Saen, R. (۲۰۱۶). Evaluation sustainability of supply chains by two-stage range directional measure in the presence of negative data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, ۴۹, ۱۱۰–۱۲۶. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.003>
- [۳۷] Lin, R., Chen, Z., Hu, Q., & Li, Z. (۲۰۱۷). Dynamic network DEA approach with diversification to multi-period performance evaluation of funds. *OR Spectrum*, ۳۹(۳), ۸۲۱–۸۴۰. <https://doi.org/10.1007/s00291-017-0475-1>
- [۳۸] Tavana, M., Izadikhah, M., Caprio, D. D., & Farzipoor Saen, R. (۲۰۱۸). A new dynamic range directional measure for two-stage data envelopment analysis models with negative data. *Computers & Industrial Engineering*, ۱۱۵, ۴۲۷–۴۴۸. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.024>
- [۳۹] Wanke, P. F., Hadi-Vencheh, A., & Forghani, A. (۲۰۱۸). A DDF based model for efficiency evaluation in two-stage DEA. *Optimization Letters*, ۱۲(۵), ۱۰۲۹–۱۰۴۴. <https://doi.org/10.1007/s11590-017-1162-0>
- [۴۰] Zhang, Z., Liu, H., Gong, Y., & Niu, H. (۲۰۲۶). Evaluating and predicting green economic efficiency in Chinese cities: A three-stage network SBM and machine learning approach. *Expert Systems With Applications*, 298, ۱۲۹۵۸۹. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129589>
- [۴۱] Peykani, P., Mahmoodirad, A., & Amirteimoori, A. (۲۰۲۵). A novel adjustable



- intuitionistic fuzzy framework for two-stage data envelopment analysis: An application in the banking sector. *Information Sciences*, 718, ۱۲۲۳۷۲. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.122372>
- [۴۲] Chen, L., & Wang, Y.-M. (۲۰۲۰). Efficiency decomposition and frontier projection of two-stage network DEA under variable returns to scale. *European Journal of Operational Research*, 322(۱), ۱۰۷-۱۱۰. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.028>
- [۴۳] Zou, Z., & Lio, W. (۲۰۲۰). Efficiency decomposition for the relational two-stage data envelopment analysis approach with uncertain data. *Computers & Industrial Engineering*, 208, ۱۱۱۳۳۰. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.111330>
- [۴۴] Chambers, R. G., Chung, Y., & Färe, R. (۱۹۹۶). Benefit and distance functions. *Journal of Economic Theory*, ۷۰(۲), ۴۰۷-۴۱۹. <https://doi.org/10.1016/j.jeth.1996.09.016>
- [۴۵] Chen, Y., Li, Y., Liang, L., Salo, A., & Wu, H. (۲۰۱۶). Frontier projection and efficiency decomposition in two-stage processes with slacks-based measures. *European Journal of Operational Research*, ۲۵۰(۲), ۰۴۳-۰۵۴. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.052>
- [۴۶] Azizi, H. (۲۰۱۲). A new approach for supplier selection in the presence of imprecise data: DEA with double frontiers. *Management Research in Iran*, 16(۲), ۱۲۹-۱۵۰. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322200.1391.16.2.8.4>
- [۴۷] Azizi, H., Amirteimoori, A., & Kordrostami, S. (۲۰۱۶). A data envelopment analysis approach with efficient and inefficient frontiers for supplier selection in the presence of both undesirable outputs and imprecise data. *Modern Researches in Decision Making*, 1(۲), ۱۳۹-۱۷۰. (In Persian)
- [۴۸] Azizi, H., Farzipoor Saen, R., & Azadi, M. (۲۰۲۰). Obviating some of the theoretical barriers of analytical hierarchy process by a revised eigenvector method: A case study in sustainable supplier selection. *Annals of Operations Research*, ۳۰۰(۲), ۲۴۲۳-۲۴۷۷. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-06888-6>
- [۴۹] Khodakarami, M., Shabani, A., Farzipoor Saen, R., & Azadi, M. (۲۰۱۰). Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management. *Measurement*, ۷۰, ۶۲-۷۴. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.03.024>
- [۵۰] Shaverdi, M., Heshmati, M. R., Eskandaripour, E., & Tabar, A. A. A. (۲۰۱۳). Developing sustainable SCM evaluation model using fuzzy AHP in publishing industry. *Procedia Computer Science*, ۱۷, ۳۴۰-۳۴۹. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.044>
- [۵۱] Aparicio, J., Pastor, J. T., & Ray, S. C. (۲۰۱۳). An overall measure of technical inefficiency at the firm and at the industry level: The 'lost profit on outlay'. *European Journal of Operational Research*, 226(۱), ۱۰۴-۱۶۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.10.032>
- [۵۲] Lin, R., & Liu, Q. (۲۰۲۱). Multiplier dynamic data envelopment analysis based on directional distance function: An application to mutual funds. *European Journal of Operational Research*, ۲۹۳(۳), ۱۰۴۳-۱۰۵۷. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.000>
- [۵۳] Azizi, H., & Amirteimoori, A. (۲۰۱۷). Flexible Measures in Production Process: A New Approach Based On Double-Frontier DEA. *Modern Researches in Decision Making*, 2(۲), ۱۹۷-۲۱۶. (In Persian)