

چارچوب تحلیل و بهینه‌سازی چندهدفه الگوهای غذایی حساس به آب و محیط‌زیست با رویکرد اقتصادی و محیط‌زیستی

پارسا متینی^۱، مطهره سعادت پور^۲، محمد جواد امامی اسکاردی^{۳*}

۱ دانشجوی ارشد عمران مدیریت منابع آب، دانشگاه علم و صنعت تهران، تهران، ایمیل: parsamatini007@gmail.com

۲ دانشیار دانشگاه علم و صنعت تهران، دانشکده عمران، گروه آب و محیط‌زیست، تهران. ایمیل: msaadatpour@iust.ac.ir

۳ استادیار دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی و فناوری، گروه مهندسی عمران، مازندران، بابلسر. ایمیل: mje.skardi@umz.ac.ir

چکیده

تغییرات رژیم‌های غذایی در دهه‌های گذشته فشار قابل توجهی بر محیط‌زیست و منابع طبیعی وارد کرده است؛ از این رو یک چارچوب تحلیل رژیم‌های غذایی پایدار که بتوانند هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های اقتصادی را کاهش دهند، ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه برای نخستین بار، با استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، اهدافی شامل کاهش مصرف آب، استفاده از زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن خاک و آب، آسیب به تنوع زیستی، پتانسیل تغذیه‌گرایی، هزینه تمام‌شده و هدررفت غذایی، در کنار تأمین حداقل نیازهای تغذیه‌ای بدن برای ۱۲ گروه سنی و جنسیتی مورد بررسی قرار گرفته است. راه‌حل‌های به‌دست آمده برای هر گروه سنی و جنسیتی به صورت یک جبهه پارتو ارائه شده‌اند که نشان‌دهنده وجود مجموعه‌ای از رژیم‌های بهینه با اثرگذاری‌های متفاوت بر اهداف مورد نظر هستند. با توجه به ماهیت چندهدفه مسئله و وضعیت فعلی قیمت‌های مواد غذایی، دستیابی به یک راه‌حل واحد که تمامی اهداف را به‌طور هم‌زمان و مطابق با نیازهای بدنی بهینه کند امکان‌پذیر نیست. بنابراین، سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران می‌توانند با توجه به اولویت‌های خود در میان اهداف مختلف، از میان رژیم‌های پیشنهادی الگوی مصرف مناسب را انتخاب کنند. نتایج این مطالعه که یک راهنما برای بهبود تغذیه و آسیب به محیط‌زیست است، نشان می‌دهد اصلاح برخی سیاست‌ها، از جمله حمایت بیشتر از غذاهای دریایی، میوه‌ها، سبزیجات و حبوبات، می‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش فشار بر منابع آب و محیط‌زیست داشته باشد؛ در حالی که سیاست‌های فعلی قیمت‌گذاری برخی گروه‌های غذایی لزوماً همسو با حفاظت از منابع طبیعی و محیط‌زیست نیستند.

کلمات کلیدی: الگویی غذایی حساس به آب و محیط‌زیست، رژیم‌های غذایی، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوی غذایی پایدار، توسعه پایدار.

باتوجه به نقش ۳۴ درصدی کشاورزی در تولید گازهای گلخانه‌ای در جهان (Pendrill et al., 2019) و مصرف ۷۰ درصد از منابع آب شیرین برای تولیدات کشاورزی (Viala, 2008)، همچنین اشغال ۴۰ درصد از مساحت جهان برای تولیدات کشاورزی (Foley et al., 2005)، می‌توان گفت تهیه مواد غذایی بزرگ‌ترین پل ارتباطی بین انسان و محیط‌زیست خود است (Filippin et al., 2023). از دیدگاه متخصصان منابع آب، بخش کشاورزی بیشترین سهم را در مصرف دارد (Madani, 2014) و الگوهای غذایی نقشی کلیدی در جهت‌دهی به فعالیت‌های آن ایفا می‌کند. افزایش مصرف غذا در نتیجه شهرنشینی و پیشرفت فناوری (Tilman & Clark, 2014)، همچنین همگرایی این رژیم‌ها در جهان (Khoury et al., 2019) و مصرف بیشتر پروتئین‌های حیوانی و مواد غذایی غیر فصلی از مهم‌ترین نکات مرتبط با الگوهای غذایی فعلی در جهان است (Tilman et al., 2011). در ایران نیز افزایش جمعیت و افزایش مصرف در کنار مصرف بیشتر کالری‌های حیوانی و گذار به رژیم‌های غذایی شهری نشینی مشاهده می‌شود (Sobhani et al., 2021).

به نظر می‌رسد که چالش‌های محیط‌زیستی، از جمله تغییرات آب‌وهوایی به طور فزاینده‌ای ناشی از الگوهای ناپایدار فعالیت‌های انسانی خواهند بود و حل این چالش‌ها مستلزم تغییرات بنیادین در شیوه‌های زندگی در تمام بخش‌های جامعه است (UNEP, 2007). یکی از مهم‌ترین بخش‌ها برای بهبود تغییر اقلیم؛ اصلاح الگوی غذایی جوامع است (Gussow & Clancy, 1986; Scarborough et al., 2014). تغییرات اقلیمی که سیستم‌های غذایی با آن مواجه هستند گرسنگی، فقر، نابرابری اقتصادی (Adekunle Stephen Toromade et al., 2024; Assoua et al., 2024) و تنش‌های اجتماعی را تشدید کرده است (Juan & Wegenast, 2020).

جهان برای رسیدن به پایداری سیستم‌های غذایی راه درازی را در پیش دارد (Walter Willett & Johan Rockström, 2019). درحالی‌که به موضوع رژیم‌های پایدار کمتر توجه شده است (Tilman et al., 2011). با این وجود توصیه‌های شدیدی بر تغییر الگوی غذایی (Foley et al., 2011) و اصلاح مصرف فعلی کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته بوده است (Tilman & Clark, 2014).

توجه به امنیت غذایی و چالش‌های آینده آن (Godfray et al., 2010; Godfray & Garnett, 2014)، همچنین بهبود شاخص‌های محیط‌زیستی با دنبال کردن رژیم‌های گیاهی و رژیم‌های مدیترانه‌ای و محلی (Castaldi et al., 2022; Chai et al., 2019) از راه‌کارهای پیشنهاد شده بوده است. برای مثال در سال‌های اخیر تلاش شده است با مقایسه ابعاد ردپای رژیم‌های غذایی کشورهای توسعه یافته با رژیم‌های پیشین خود و یا الگوی غذایی کشورهای دیگر به مطالعه رژیم‌های کم اثرتر بر شاخص‌های گازهای گلخانه‌ای و ردپای آب مانند رژیم‌های مدیترانه‌ای در مقابل رژیم‌های غربی مطالعه کنند (Castaldi et al., 2022; Camporesi & Bordoni, 2025). باید توجه داشت در اغلب مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته همه جنبه‌های مساله لحاظ و بررسی نشده است که نیازمند بررسی آن با استفاده از رویکردهای نوین خواهد بود.

همچنین مطالعات پیشین، کمتر به مدل سازی و بهینه سازی الگوهای غذایی با بهره گیری از الگوریتم های نوین برای دستیابی به پاسخ های مناسب تر در اهداف چندگانه و فضاهای ناشناخته پرداخته شده است؛ تمرکز اصلی این مطالعات بیشتر بر مقایسه رژیم های موجود با یکدیگر بوده است (Sobhani SR et al., 2022; Springmann et al., 2018; Tepper et al., 2022; Willett et al., 2019; Xian et al., 2021)؛ با وجود این که در مواردی محدود بر بهینه سازی های تک هدفه تأکید شده است (Chaudhary & Krishna, 2019; Gephart et al., 2016). وجود رژیم های غذایی که تمامی ابعاد محیط زیستی را در نظر بگیرد، درحالی که با کاهش هدررفت غذا، هزینه های غذایی را نیز مدیریت کرده و هم زمان نیازهای تغذیه ای انسان را تأمین کند، ضرورت توسعه الگوریتم های چندهدفه را بیش از پیش آشکار می سازد درحالی که این موضوع مسیر دستیابی به پایداری را هموارتر می کند.

هدف این مطالعه، برای اولین بار توسعه یک چارچوب تحلیل و تصمیم یار برای شناسایی رژیم های غذایی پایداری است که جنبه های محیط زیستی و اقتصادی را پوشش دهد، تا به راه حل های بهینه در چند بعد به صورت هم زمان و در قالب یک مسئله چند هدفه بررسی بشوند؛ از جمله این اهداف کاهش مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه ای، استفاده از زمین، اسیدی شدن خاک و آب، تغذیه گرای، شاخص هدررفت غذا و همچنین به صرفه بودن اقتصادی رژیم غذایی است. همچنین الگوهای غذایی پیشنهادی باید قیود مرتبط با سلامت و الزامات ناشی از جنسیت و سن را نیز برآورده سازد. که در نتیجه یک چارچوب پروتوی از راه حل های ممکن برای سیاست گذاران با توجه به مسائل درگیر در محیط زیستی و اقتصادی ارائه می کند.

با استفاده از داده های موجود درباره مصرف محصولات خوراکی طی دوازده گذشته (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲) هزینه پرداختی با استفاده از میانگین هزینه پرداخت شده توسط هر فرد نسبت به ماده غذایی در دوده به دست آمد و اثرات محیط زیستی رژیم غذایی ارزیابی شد که با استفاده از داده های ارزیابی چرخه حیات (LCA) هر محصول برآورد شد. با استفاده از داده های قیمت محصولات، هدر رفت محصولات و اثرات محیط زیستی به عنوان داده های اولیه و نیازهای بدنی هر گروه سنی و جنسی به عنوان قید؛ به کمک الگوریتم NSGA-II، سبدهای غذایی ای طراحی شد که از طریق بهینه سازی چندهدفه بتواند هم اثرات زیست محیطی و اقتصادی را کاهش دهند و هم نیازهای بدن را تأمین کنند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- دسته بندی و جمع آوری داده ها

برای طراحی رژیم های غذایی پایدار متناسب با الگوی مصرف ایرانیان، ابتدا داده های مصرف مواد غذایی در ایران استخراج و در قالب ۳۵ گروه غذایی دسته بندی شدند. به منظور ارزیابی ترکیبات تغذیه ای هر گروه سنی و جنسی، از پایگاه داده وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) استفاده شد و اطلاعات مربوط به ریزمغذی ها و درشت مغذی ها برای هر ماده غذایی استخراج شد.

در کنار آن، به منظور سنجش اثرات زیست محیطی هر ماده غذایی، از داده های موجود ارزیابی چرخه حیات مواد غذایی، مهم ترین شاخص های آسیب به محیط زیست که به موارد مانند انتشار گازهای اسیدی مانند SO_2 ، NO_x و NH_3 بر اساس پتانسیل اسیدی شدن آنها به معادل های

دی اکسید گوگرد (SO_2eq)؛ انتشار مواد مغذی مانند فسفات (PO_4^{3-})، نیتрат (NO_3^-) و آمونیوم (NH_4^+) بر اساس پتانسیل تغذیه‌گرایی،
 محتوای آب مجازی بر اساس آب مصرف شده در فرایند رشد و مصرف ماده غذایی، انتشار هر گاز گلخانه‌ای بر اساس پتانسیل گرمایش
 جهانی (GWP) به معادل‌های دی‌اکسیدکربن (CO_2eq)، کل مساحت زمین استفاده شده (بر حسب مترمربع) در مدت‌زمان استفاده (بر حسب
 سال)، تعداد احتمالی گونه‌های تحت آسیب در یک منطقه مشخص و تغییرات آنها در طول زمان یک سال باتوجه‌به محصول غذایی استفاده
 شد شایان‌ذکر است که داده‌های موجود (Scarborough et al., 2023) در نتیجه، یک پایگاه‌داده جامع شامل ویژگی‌های تغذیه‌ای و
 زیست‌محیطی مواد غذایی مصرفی ایرانیان ایجاد شد (Scarborough et al., 2023) (اطلاع بیشتر از مقادیر LCA & Nutritionals به
 پیوست ۲ مراجعه کنید).

الگوی مصرف روزانه مواد غذایی نیز بر اساس میانگین داده‌های در دسترس از دو دهه گذشته (۲۰ سال اخیر) در سطح ملی تخمین زده شد.
 باتوجه‌به این موضوع که گروه‌های سنی و جنسی نیازهای تغذیه‌ای متفاوتی مانند نیاز به کالری و یا نیاز به مواد ریزمغذی و درشت‌مغذی‌ها
 متفاوت را دارند، نیازهای تغذیه‌ای افراد نیز به تفکیک گروه‌های سنی و جنسی که تفاوت‌هایی در حداقل نیازهای خود دارند، بر اساس مقادیر
 مرجع ارائه‌شده توسط USDA تعیین شد (اطلاعات بیشتر در پیوست ۱).

۲-۲- هزینه سبدهای غذایی

برای محاسبه قیمت محصولات غذایی، از داده‌های پرسش‌نامه‌های هزینه - درآمد خانوار استفاده شد (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲). این داده‌ها
 که شامل خریدهای ماهانه خانوارها و قیمت واحد محصولات غذایی در مناطق مختلف ایران است، به‌عنوان نمونه‌ای معرف از کل جامعه در
 نظر گرفته شد. داده‌های مذکور برای سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲ موجود بوده و قیمت واحد هر محصول غذایی در آن‌ها ثبت شده است. فرایند
 تحلیل قیمت‌ها به شرح زیر انجام شد:

۱. محاسبه میانگین قیمت سالانه: ابتدا برای هر محصول، مجموع قیمت‌های واحد گزارش شده توسط تمام خانوارهای خریدار، بر تعداد
 خانوارها تقسیم شد تا میانگین قیمت خرید آن محصول در هر سال به دست آید.

۲. نرمال‌سازی قیمت‌ها: سپس، میانگین قیمت هر محصول در هر سال، بر بیشترین میانگین قیمت در میان تمام محصولات غذایی همان
 سال تقسیم شد تا مقادیر نرمال‌سازی شوند.

۳. محاسبه شاخص قیمت نهایی: در نهایت، برای هر محصول، مقادیر نرمال‌شده در طول دوره بیست‌ساله با یکدیگر جمع و بر تعداد سال‌هایی
 که داده قیمتی برای آن محصول موجود بود، تقسیم شد. این کار باعث می‌شود یک شاخص قیمتی برای هر محصول به‌دست‌آید و مدل از
 جهش‌های قیمتی در سال‌های خاص پیروی نکند.

همچنین به‌منظور کاهش اختلاف قیمت بین مناطق شهری و روستایی، از داده‌های مربوط به خرید محصولات در سراسر کشور استفاده شد.
 در پایان، برای همگام‌سازی ۲۲۲ قلم خوراکی موجود در پرسش‌نامه‌ها با محصولاتی که داده‌های ردپای محیط‌زیستی آن‌ها در دسترس بود،
 این اقلام در ۳۵ گروه غذایی قرار گرفت. از این داده‌های نرمال شده قیمت برای توسعه رژیم‌های بهینه و پایدار در ایران استفاده شد.

Table 1 Normalized prices of food products in Iran

جدول ۱- قیمت‌های نرمال شده مواد غذایی در ایران

code	Product	Normalized (C)
101	Eggs	0.15
102	Milk	0.19
103	Butter, Cream & Ghee	0.23
104	Cheese	0.21
105	Beef (red Meat)	0.47
106	Poultry Meat	0.22
107	Sweeteners & Honey	0.56
108	Fish (capture)	0.43
109	Oils Misc.	0.52
110	Sunflower Oil	0.13
111	Rapeseed Oil	0.13
112	Soybean Oil	0.12
113	Other Fruit	0.24
114	Citrus Fruit	0.07
115	Bananas	0.12
116	Apples	0.09
117	Berries & Grapes	0.11
118	Olives and dates	0.18
119	avr(Canesugar, Beetsugar)	0.07
120	Other Vegetables	0.12
121	Watermelon, Melon	0.03
122	Tomatoes	0.05
123	Mixed Nuts	0.60
124	Beans	0.15
125	Peas and Lentils	0.19
126	Other Pulses	0.12
127	Potatoes	0.07
128	Rice	0.14
129	Wheat & Rye (Bread)	0.10
130	Barley	0.06
131	Maize (Meal)	0.09
132	Coffee	1.00
133	Dark Chocolate	0.24
134	Tea	0.61
135	Olive Oil	0.51

هدف اصلی مدل ارائه شده، شناسایی ترکیب بهینه‌ای از مواد غذایی برای طراحی سبدهایی است که به طور هم‌زمان نیازهای تغذیه‌ای و ملاحظات زیست‌محیطی را برآورده سازند. این مدل به طور ویژه بر دو بُعد اصلی توسعه پایدار تمرکز دارد:

- اهداف زیست‌محیطی: شامل کاهش مصرف آب، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش کاربری زمین، کاهش آسیب به تنوع زیستی، و کاهش پدیده‌های اسیدی شدن خاک و آب، و در نهایت کاهش تغذیه‌گرایی.
- اهداف اقتصادی: شامل کاهش هزینه نهایی سبد غذایی و به حداقل رساندن اتلاف منابع غذایی.

این مدل با در نظر گرفتن این سه محور کلیدی، راهکارهایی چندمعیاره ارائه می‌کند که پاسخ‌های بهینه آن در قالب جبهه پرتو (Pareto front) قابل مشاهده است.

$$\text{Minimize (WF, GH, LU, BD, AC, EU, C, WL)} \quad (1)$$

که در آن: C مجموع هزینه‌های سبد غذایی، WL مجموع دورریز و از دست رفت مواد غذایی در فرایند تولید تا مصرف که در اینجا شاخص هدررفت غذایی نام گذاری کرده‌ایم، WF ردپای آب مصرف شده از تولید تا مصرف، GH گازهای گلخانه‌ای معادل شده (CH_4 , N_2O , CO_2)، به کربن دی‌اکسید است، LU شامل زمین‌های استفاده شده برای یک محصول غذایی، BD نیز مشخصه تنوع زیستی است، AC برای اسیدی شدن خاک و آب به وسیله کودهای شیمیایی که از گوگرد استفاده شده در فرایند تولید محصولات و EU اثر تغذیه‌گرایی که افزایش فسفات در منطقه این محصولات است.

ترکیب این مجموعه اهداف، چارچوب مدل را قادر می‌سازد تا رژیم‌های غذایی‌ای پیشنهاد دهد که نه تنها از نظر تغذیه‌ای کامل و پایدار باشند، بلکه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه، از نظر فرهنگی سازگار با الگوی غذایی جامعه و از نظر زیست‌محیطی کم‌اثر باشند.

برای ارزیابی بُعد اقتصادی، از دو معادله (۲) و (۳) استفاده شد. معادله (۲) هزینه کل اقتصادی و معادله (۳) میزان اتلاف و دورریز مواد غذایی که با ترکیب این دو شاخص هدررفت را محاسبه می‌کنند که در مجموع به ما معیاری برای سنجش میزان هدر رفت یک سبد غذایی را برای مقایسه با سبدهای غذایی دیگر می‌دهد.

$$C^g = \sum_{i=1}^I C_i \times X_i^g \quad (2)$$

در این رابطه، g بیانگر گروه سنی و جنسی مورد بررسی، i نمایانگر هر یک از مواد غذایی موجود در مجموعه مورد مطالعه، C_i قیمت نرمال شده هر کیلوگرم ماده غذایی و X_i^g مقدار مصرفی آن ماده غذایی در گروه سنی و جنسی g است. در نتیجه، C^g مجموع هزینه‌های سبد غذایی گروه مورد نظر را ارائه می‌کند، به طوری که مقادیر کمتر نشان‌دهنده کارایی اقتصادی بالاتر است.

$$WL^g = \sum_1^i (W_i + L_i) \times X_i^g \quad (3)$$

128 در این رابطه، W_i میزان اتلاف ماده غذایی i در سطح خرده‌فروشی یا مصرف‌کننده و L_i میزان اتلاف در مراحل ابتدایی زنجیره تأمین است.
 129 مجموع این دو، شاخص هدررفت غذایی WL^g را تشکیل می‌دهد. مقادیر پایین‌تر این شاخص، نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر رژیم غذایی از
 130 منظر کاهش هزینه‌های ناشی از اتلاف منابع غذایی است.

131 برای محاسبه مؤلفه‌های زیست‌محیطی، از معادلات (۴) تا (۹) استفاده شد. هر یک از این معادلات نمایانگر یکی از اهداف زیست‌محیطی و
 132 شاخص‌های اثرگذاری انسانی بر محیط‌زیست است و میزان اثر یک رژیم غذایی مشخص، متناسب با گروه سنی و جنسی فرد، را بر
 133 محیط‌زیست برآورد می‌کند.

$$WF^g = \sum_1^i WF_i \times X_i^g \quad (4)$$

134 در این رابطه، WF_i بیانگر حجم آب مصرفی (به لیتر) برای تولید هر کیلوگرم از ماده غذایی i است. این مقدار در X_i^g ، یعنی میزان مصرف آن
 135 ماده غذایی در گروه g ، ضرب می‌شود. در نتیجه، WF^g مجموع کل آب مصرف‌شده برای تأمین رژیم غذایی گروه موردنظر را نشان می‌دهد.

$$GH^g = \sum_1^i GH_i \times X_i^g \quad (5)$$

136 در این معادله، GH_i بیانگر انتشار گازهای گلخانه‌ای معادل شده به دی‌اکسید کربن برای تولید هر کیلوگرم از ماده غذایی i است
 137 که در مقدار مصرف آن، X_i^g ، ضرب می‌شود. GH^g مجموع کل انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از رژیم غذایی را نشان می‌دهد.

$$LU^g = \sum_1^i LU_i \times X_i^g \quad (6)$$

138 در این رابطه، LU_i سطح زمین مورد استفاده (برحسب مترمربع-سال) برای تولید هر کیلوگرم از ماده غذایی i را نشان می‌دهد. این مقدار در
 139 میزان مصرف X_i^g ضرب شده و مجموع آن‌ها مساحت کل زمین استفاده‌شده برای تأمین رژیم غذایی را برآورد می‌کند.

$$BD^g = \sum_1^i BD_i \times X_i^g \quad (7)$$

140 در این معادله، BD_i بیانگر اثر کاهش تنوع زیستی ناشی از تولید هر کیلوگرم ماده غذایی i است؛ این شاخص شامل تأثیر بر گونه‌های گیاهی،
 141 جانوری، میکروبی و زیست‌بوم‌های وابسته به آن‌ها است. با ضرب این مقدار در مصرف واقعی و جمع نتایج برای تمام اقلام غذایی، اثر کل
 142 رژیم غذایی بر تنوع زیستی برآورد می‌شود.

$$AC^g = \sum_1^i AC_i \times X_i^g \quad (8)$$

143 در این رابطه، AC_i میزان اسیدی‌شدن خاک و آب (g SO₂-eq) ناشی از تولید هر کیلوگرم ماده غذایی i است که با ضرب در مقدار مصرف
 144 آن، میزان کل اسیدی‌شدن مرتبط با رژیم غذایی محاسبه می‌شود.

$$EU^g = \sum_{i=1}^i EU_i \times X_i^g \quad (9)$$

در این معادله، EU_i اثر تغذیه‌گرایی (Eutrophication) ناشی از تولید هر کیلوگرم ماده غذایی i را نشان می‌دهد. ضرب این مقدار در مصرف واقعی و جمع نتایج، میزان کل تغذیه‌گرایی ناشی از رژیم غذایی را تعیین می‌کند.

۲-۴- قیدها

برای اینکه رژیم غذایی از مرزهای تغذیه‌ای و سلامت عبور نکند و همچنین یک رژیم سالم از منظر بهداشت و سلامت عمومی باشد باید از قید محدودکننده زیر استفاده شود:

$$RDA_N^g \leq \sum_{i=1}^i n_{i,N} \times X_i^g \quad (11)$$

که در آن RDA جدول مواد غذایی موردنیاز بدن است که در آن محدودیت‌های موردنیاز بدن برای گروه‌های سنی و جنسی متفاوت آورده شده است. $n_{i,N}$ مقدار مواد مغذی N در غذای i به ازای هر کیلوگرم از ماده غذایی است که با ضرب شدن در X_i^g مقدار مواد مغذی مصرف شده به دست می‌آید که این مقدار برای تمامی غذاهای مصرف شده جمع شده باید حدود نیازهای بدنی را تأمین کند تا مورد قبول باشد. لازم به ذکر است که در نسخه حاضر مدل، تنها حدود حداقلی دریافت مواد مغذی بر اساس مقادیر مرجع نیازهای تغذیه‌ای (RDA) برای گروه‌های مختلف سنی و جنسی اعمال شده است. به عبارت دیگر، راه‌حل‌های قابل قبول باید حداقل نیازهای تغذیه‌ای بدن را تأمین کنند، اما محدودیت‌های حداکثری برای برخی مؤلفه‌های تغذیه‌ای نظیر چربی‌های اشباع، قند افزوده، سدیم، کلسترول و سایر عوامل مرتبط با بیماری‌های غیرواگیر در این مرحله از تحلیل در نظر گرفته نشده‌اند (برای اطلاع از قیدهای تغذیه برای گروه‌های سنی و جنسی به پیوست ۱ مراجعه کنید).

۲-۵- بهینه‌سازی برحسب گروه‌های سنی و جنسی

کدنویسی مدل با بهره‌گیری از کتابخانه‌های NumPy، Pandas و Pymoo در محیط پایتون انجام گرفت و از الگوریتم NSGA-II برای یافتن مجموعه جواب‌های بهینه استفاده شد. باتوجه به الگوریتم ژنتیک و مشابهت رفتاری این الگوریتم با مسئله موجود که هر کروموزوم مانند یک رژیم غذایی بوده و هر ژن یکی از سبدهای غذایی موجود بوده است تلاش شد تا این ژن‌ها به بهینه‌ترین حالت خود برسند و کروموزوم‌ها یا جواب‌های بهینه در کنار یکدیگر که توانایی بقا یا به عبارتی دیگر توانایی ارضای تمامی قیدها را دارد ایجاد کنند، با توجه به شکل ۱ برای تحلیل حساسیت الگوریتم بارها با پارامترهای متفاوت ارزیابی شد. به طور مثال جمعیت‌ها بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰۰ تغییر کرد، همچنین برای اطمینان از داده‌های رندوم وارد شده از seedهای متفاوت برای ارزیابی استفاده شد و محدوده جواب‌ها تکرار شد. همچنین NSGA-II به صورت پیش فرض از crowding distance و selection چندهدفه استفاده می‌کند تا روی کل فضا جواب پخش شود، نه یک نقطه، همین باعث می‌شود جمعیت خیلی زود روی یک نقطه گیر نکند. عملگر تقاطع (SBX) (Simulated Binary Crossover) با احتمال ۰.۹ ترکیب راه‌حل‌ها و پارامتر توزیع ۱۰ که میزان شباهت یا تفاوت فرزندان نسبت به والدین را کنترل می‌کند در نظر گرفته شد که باعث گسترش در فضای جستجو شده و عملگر جهش از نوع PM (Polynomial Mutation) با احتمال ۰.۷ نسبتاً جهش زیاد و شدت جهش ۲۰

در نظر گرفته شد، همچنین راه‌حل‌های تکراری در جمعیت هر نسل حذف می‌شوند تا تنوع حفظ بشود و الگوریتم در دام راه‌حل‌های مشابه قرار نگیرد.

در نهایت، برای هر گروه سنی و جنسی، تعداد ۵۰۰ راه‌حل بهینه به صورت جبهه پرتو (Pareto front) برای تمامی اهداف هم زمان به دست آمد.

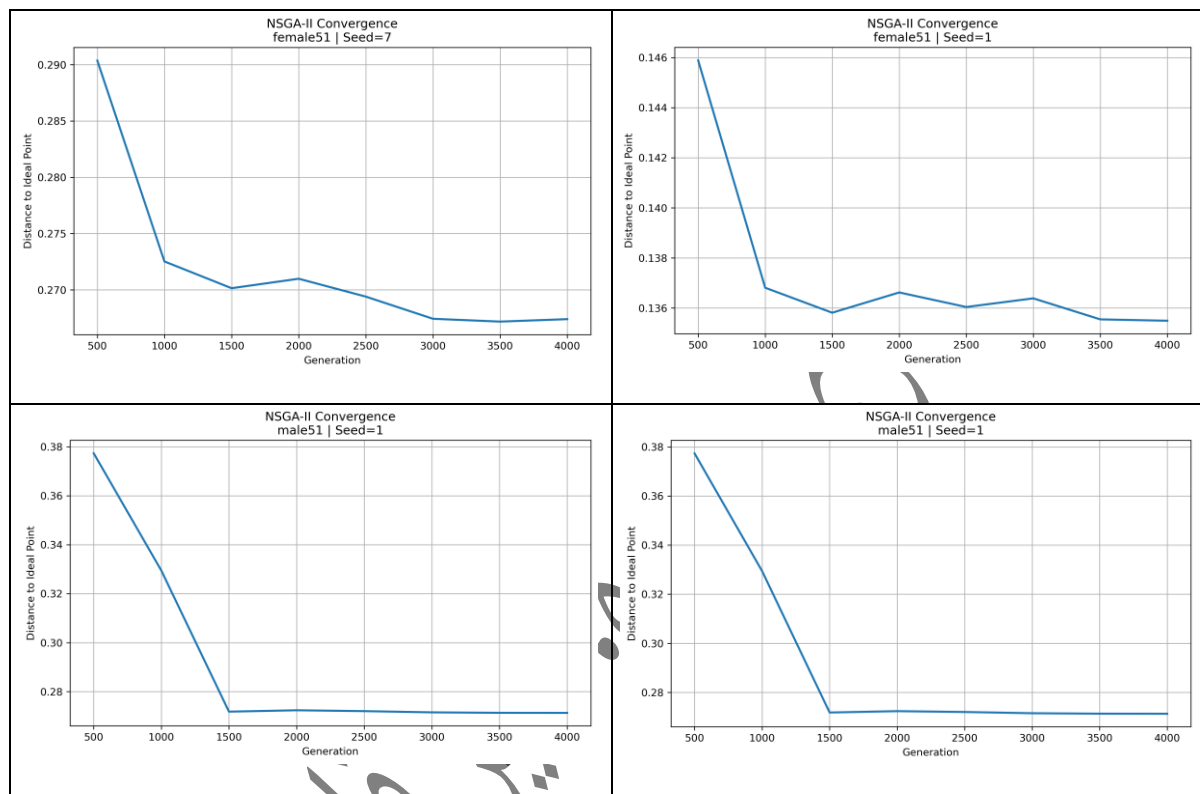


Fig. ۱- Evolution of the distance-to-ideal-point metric during the optimization process. The stabilization of this metric in the final generations indicates that the algorithm has converged to a stable region of the Pareto front.

شکل ۱ روند تغییرات معیار فاصله تا نقطه ایده‌آل در طول اجرای الگوریتم. تثبیت مقدار این معیار در نسل‌های پایانی نشان‌دهنده دستیابی الگوریتم به ناحیه‌ای پایدار از جبهه پارتو است.

۲-۶- دسته‌بندی و نمایش جواب‌ها

با توجه به اینکه راه‌حل‌های به دست آمده توسط الگوریتم بسیار به یکدیگر نزدیک بودند و تعداد غیر قابل نمایشی از آن‌ها وجود داشت، فرایند خوشه‌بندی نتایج با استفاده از روش K-means انجام شد. برای هر گروه سنی و جنسی، ۵ خوشه ایجاد شد و سپس به صورت تصادفی از هر خوشه یک راه‌حل انتخاب شد. در ادامه، به منظور ارائه نتایج، از هر گروه سنی یک خوشه به صورت تصادفی انتخاب و نمایش داده شد.

۳- نتایج و بحث

یک رژیم بهینه و پایدار، روندی کاهشی در شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی از خود نشان می‌دهد. اگرچه این رژیم‌ها با فرض صفر بودن هدررفت غذایی بهینه‌سازی شده‌اند، مقادیر احتمالی شاخص هدررفت هر سبد غذایی نیز محاسبه شده است. این امر امکان مقایسه رژیم‌های پیشنهادی با یکدیگر و نیز با رژیم غذایی منتخب را فراهم می‌آورد تا بتوان به جمع‌بندی دقیق‌تری دست یافت. در این پژوهش، رژیم‌های غذایی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم با رژیم غذایی فعلی ایرانیان (شکل ۲) مقایسه شده‌اند تا عملکرد الگوریتم نسبت به شرایط کنونی سنجیده شود و نمایی واضح و قابل‌فهم از نتایج ارائه شود.

شکل ۲، رژیم غذایی مصرف شده توسط ایرانیان به‌صورت متوسط در بازه سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲ است، این رژیم غذایی متوسط مصرف تمامی گروه‌های سنی است و مصرف هر گروه سنی را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار نداده است و نمایی کلی از رژیم غذایی ایرانیان با گروه‌های سنی و جنسی متفاوت است.

رژیم غذایی رایج در ایران عمدتاً مبتنی بر غلات و لبنیات است. به طور مشخص، گندم ۲۰ درصد، جو ۶ درصد، برنج ۶ درصد و ذرت ۵ درصد از کل رژیم غذایی را تشکیل می‌دهند. شیر با سهم ۱۴ درصدی جایگاه ویژه‌ای دارد و سیب‌زمینی، سبزیجات و محصولات جالیزی هرکدام حدود ۶ درصد را به خود اختصاص می‌دهند. میوه‌ها سهمی حدود ۲ درصد دارند و گوشت ماکیان با ۴ درصد بیشترین مصرف را در بین گوشت حیوانات داراست. در مقابل، ماهی و فرآورده‌های دریایی، گوشت قرمز، انواع پنیر و روغن سویا هر یک تنها حدود ۱ درصد از رژیم را تشکیل می‌دهند.

حبوبات نظیر نخود، عدس و لوبیا کمتر از ۱ درصد در سبد غذایی روزانه جای دارند که باتوجه به اهمیت این محصول از نظر زیست‌محیطی و امنیت غذایی قابل توجه است. مصرف تخم‌مرغ نیز در حدود ۱ درصد است. شکر سفید با مصرف روزانه تقریبی ۰.۰۷ کیلوگرم به‌ازای هر نفر در روز، سهمی حدود ۴ درصد از کل رژیم را شامل می‌شود که رقم بالایی به شمار می‌آید. روغن‌های گیاهی (ترکیبی از سویا، کلزا، آفتاب‌گردان و سایر دانه‌های روغنی) در مجموع ۲ درصد از کل رژیم را تشکیل می‌دهند که باتوجه به نیاز واقعی، مصرف آن‌ها بیش از حد ارزیابی می‌شود. وابستگی بیشتر رژیم غذایی به گندم در مقایسه با سایر غلات، می‌تواند یکی از چالش‌های احتمالی برای امنیت غذایی باشد، زیرا در شرایط تغییرات عرضه یا بحران‌های تولید، انعطاف‌پذیری سیستم غذایی را کاهش می‌دهد. همچنین وابستگی به محصولات کشاورزی و مصرف کمتر محصولات باغی در رژیم غذایی ایرانیان قابل توجه است و رژیم غذایی را به‌شدت با تغییرات اقلیمی درگیر می‌کند.

از منظر شاخص‌های کمی، هزینه این رژیم غذایی معادل ۰.۲۳ (بر اساس مقادیر نرمال‌شده قیمت مواد غذایی) برآورد شده است. زمین مورد استفاده برای تأمین آن سالانه حدود ۱۴.۶ مترمربع بوده و شاخص اثر بر تنوع زیستی به 10^{14} sp.yr. می‌رسد. انتشار گازهای گلخانه‌ای معادل ۵.۷ کیلوگرم، اسیدی شدن خاک و آب معادل ۴۴ گرم، و پدیده یوتروفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) معادل ۲۸ گرم گزارش شده است. همچنین، مصرف آب این رژیم حدود ۲۹۶۰ لیتر برآورد می‌شود (بدون احتساب هدررفت غذایی). با در نظر گرفتن شاخص هدررفت حدود

۶۰ درصد، کلیه مقادیر ذکر شده می توانند تقریباً دوبرابر شوند که این امر، رژیم غذایی فعلی ایرانیان را در دسته رژیم هایی با اثرات محیط زیستی قابل توجه و بالقوه نگران کننده قرار می دهد.

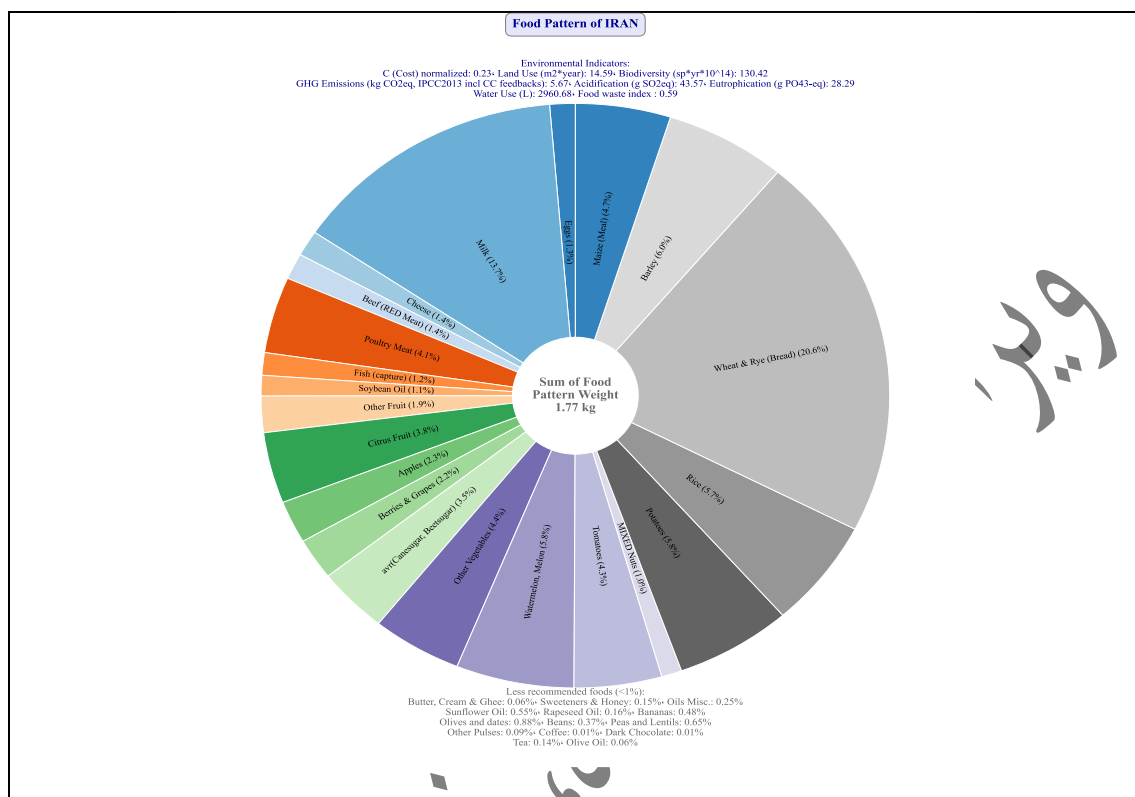


Fig.۲- Average Dietary Intake of Iranians during 2003–2023

شکل ۲ متوسط رژیم غذایی مصرف شده توسط ایرانیان در بازه سال های ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲

۲-۳- سبدهای بهینه (شاخص ها)

در این بخش، نتایج حاصل از جبهه پارتوی به دست آمده برای هر گروه سنی و جنسی ارائه می شود. لازم به تأکید است که پاسخ های نمایش داده شده صرفاً نمونه هایی از میان صدها راه حل غیر مغلوب تولید شده توسط الگوریتم هستند. همچنین باید توجه داشت که پاسخ های حاصل از مدل الزاماً نشان دهنده رژیم های غذایی مطلوب از تمامی ابعاد سلامت عمومی نیستند. از این رو، برخی پاسخ ها ممکن است شامل مقادیر بالایی از برخی گروه های غذایی باشند که در صورت اعمال قیود تکمیلی مانند چربی اشباع، قند افزوده یا سایر توصیه های تغذیه ای، ساختار متفاوتی پیدا کنند. بنابراین نتایج حاضر باید در چارچوب یک تحلیل چند هدفه و نه به عنوان توصیه های نهایی تغذیه ای تفسیر شوند.

در این مرحله نتایج خوشه بندی رژیم های بهینه برای هر گروه سنی ارائه می شود و در هر گروه، حدود ۵۰۰ پاسخ حاصل از فرایند بهینه سازی در پنج خوشه تقسیم شده اند. نمونه های نمایش داده شده از هر خوشه به صورت تصادفی انتخاب شده اند و نماینده یکی از رژیم های غذایی بهینه در آن خوشه است و نه یک رژیم منتخب نهایی قابل اجرا (شکل های ۲ تا ۵). مطابق انتظار، نتایج نشان می دهد که رژیم های بهینه که در عمل تقریباً غیر ممکن هستند؛ برای پیاده سازی رفتار متفاوتی در توابع هدف دارند.

- در شکل ۳، به طور نمونه رژیم s2، متعلق به گروه سنی زنان ۴ تا ۸ سال در شاخص‌های اسیدی شدن (۳۴ گرم در روز) و انتشار گازهای گلخانه‌ای (۰.۵۸ کیلوگرم در روز) عملکرد مطلوبی دارد؛ با این حال، آسیب به تنوع زیستی در این رژیم ۷۶ درصد بیش‌تر از رژیم فعلی است. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که با وجود بهبود در شاخص‌های اسیدی شدن، انتشار گازهای گلخانه‌ای، زمین استفاده‌شده، تغذیه‌گرایی و شاخص هدررفت غذایی، مقادیر شاخص‌های آب مصرفی، هزینه رژیم و آسیب به تنوع زیستی نسبت به وضعیت فعلی افزایش یافته‌اند. نمونه s6، که برای گروه سنی زنان ۹ تا ۱۳ سال است، کاهش قابل توجه در مصرف آب، زمین، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن و تغذیه‌گرایی را نشان می‌دهد؛ با این حال، هزینه رژیم غذایی و میزان شاخص هدررفت غذا در مقایسه با رژیم‌های فعلی بیش‌تر است. نمونه s11، برای گروه زنان ۱۴ تا ۱۸ سال، مقادیر هزینه، آب مصرفی، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن و تغذیه‌گرایی را کاهش داده است؛ اما زمین استفاده‌شده در این رژیم حدود ۲ متر مربع در سال بیش‌تر از رژیم فعلی بوده که می‌تواند به‌عنوان نقطه‌ضعف آن تلقی بشود.
- طبق شکل ۴، به طور نمونه رژیم s34 که برای گروه مردان ۴ تا ۸ سال است. موجب کاهش در شاخص‌های زمین استفاده‌شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن، تغذیه‌گرایی و هدررفت غذایی شده است؛ در مقابل، هزینه رژیم، آسیب به تنوع زیستی و آب مصرفی افزایش یافته‌اند. نمونه رژیم s38، متعلق به مردان ۹ تا ۱۳ سال است، شاخص‌های هدررفت غذا، اسیدی شدن، تغذیه‌گرایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه رژیم را کاهش داده، اما مصرف زمین، آسیب به تنوع زیستی و آب مصرفی در آن بیش‌تر از رژیم فعلی است. همچنین در نمونه رژیم s43، که مربوط به مردان ۱۴ تا ۱۸ سال است، شاخص‌های هدررفت غذا، اسیدی شدن، تغذیه‌گرایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و زمین استفاده‌شده کمتر از رژیم فعلی‌اند، در حالی که آب مصرفی، آسیب به تنوع زیستی و هزینه رژیم افزایش یافته‌اند.
- طبق شکل ۵، در میان گروه‌های سنی زنان بزرگسال، رژیم s19 که از جواب‌های گروه ۱۹ تا ۳۰ سال است. با کاهش در شاخص‌های زمین استفاده‌شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن و تغذیه‌گرایی همراه بوده است؛ اما هزینه رژیم، آسیب به تنوع زیستی، آب مصرفی و شاخص هدررفت غذا بیش‌تر از رژیم فعلی‌اند. در رژیم s22، که از جواب‌های گروه ۳۱ تا ۵۰ سال است، مقادیر آب مصرفی، زمین استفاده‌شده و آسیب به تنوع زیستی کاهش یافته‌اند، اما در مقابل، هزینه رژیم، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن و شاخص هدررفت غذا به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌اند. برای گروه سنی ۵۱ سال و بالاتر نمونه s28، شاخص‌های زمین استفاده‌شده، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغذیه‌گرایی، آب مصرفی و شاخص هدررفت غذا نسبت به رژیم فعلی کاهش یافته‌اند، در حالی که اسیدی شدن و هزینه رژیم غذایی اندکی افزایش یافته است.
- طبق شکل ۶، در گروه مردان بزرگسال، رژیم s50 که برای گروه سنی ۱۹ تا ۳۰ سال است، منجر به کاهش در شاخص‌های هزینه رژیم، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن، تغذیه‌گرایی، آب مصرفی و شاخص هدررفت غذا شده است، اما زمین استفاده‌شده در آن بیش‌تر از رژیم کنونی است. در رژیم s55، که برای گروه سنی ۳۱ تا ۵۰ سال است، شاخص‌های زمین استفاده‌شده، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن، تغذیه‌گرایی و آب مصرفی کاهش یافته‌اند، در حالی که هزینه رژیم و شاخص هدررفت غذا نسبت به رژیم فعلی افزایش نشان می‌دهند. در نهایت، رژیم s60، که برای گروه سنی بالای ۵۰ سال است، نیز در اغلب شاخص‌ها از

243 جمله زمین استفاده شده، آسیب به تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اسیدی شدن، تغذیه گرایشی و آب مصرفی عملکرد بهتری نسبت به

244 رژیم فعلی دارد، اما هزینه رژیم غذایی و میزان شاخص هدررفت غذا در آن بیش‌تر است (برای مطالعه جزئیات به پیوست ۳ مراجعه کنید).

Age & Sex	Female 4-8	Female 4-8	Female 4-8	Female 4-8	Female 4-8	Female 9-13	Female 9-13	Female 9-13	Female 9-13	Female 9-13	Female 14-18	Female 14-18	Female 14-18	Female 14-18	Female 14-18	Food Pattern of IRAN
C (Cost) normalized	1.22	9.46	1.07	0.30	0.47	0.68	0.45	0.52	0.25	0.62	0.18	0.60	0.24	0.54	0.25	0.23
Land Use (m ² /year)	0.52	9.77	1.65	6.90	6.76	1.90	9.92	11.19	5.98	13.11	16.05	12.34	3.63	11.23	8.83	14.59
Biodiversity (sp ² yr ² 10 ¹⁴)	8.78	229.27	10.03	169.41	57.04	45.53	239.29	265.64	151.73	305.41	63.04	288.04	85.57	265.10	107.30	130.42
GHG Emissions (kg CO ₂ e/eq)	4.17	0.58	4.17	0.62	2.75	2.75	0.81	0.80	1.00	0.77	3.01	0.82	1.79	0.84	2.34	5.67
Acidification (g SO ₂ e/eq)	111.00	34.18	98.61	22.58	45.01	58.23	33.71	38.80	19.36	46.68	40.22	44.57	20.71	40.11	20.79	43.57
Eutrophication (g PO ₄ -e/eq)	8.43	15.02	9.92	10.73	13.05	7.85	15.51	17.40	9.55	20.27	21.26	19.29	7.60	17.65	14.72	28.29
Water Use (L)	273.06	6531.24	854.29	4039.45	2121.80	387.66	6126.55	7215.96	2578.03	8884.66	1964.45	8271.02	1010.39	7313.79	2875.77	2960.68
Food waste index	0.87	0.49	0.91	0.34	0.43	0.95	0.52	0.58	0.30	0.69	0.53	0.69	0.46	0.63	0.26	0.59
S	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15	

Fig. 3- Clustered samples of female age groups 4–8, 9–13, and 14–18 years.

شکل ۳- نمونه‌های خوشه بندی شده گروه سنی ۴ تا ۸ سال، ۹ تا ۱۳ سال، ۱۴ تا ۱۸ سال زنان

Age & Sex	Male 4-8	Male 4-8	Male 4-8	Male 4-8	Male 4-8	Male 9-13	Male 9-13	Male 9-13	Male 9-13	Male 9-13	Male 14-18	Male 14-18	Male 14-18	Male 14-18	Male 14-18	Food Pattern of IRAN
C (Cost) normalized	0.28	1.09	0.33	0.47	0.33	1.26	0.59	0.20	0.17	0.47	0.29	0.21	0.48	0.23	0.72	0.23
Land Use (m ² /year)	2.14	0.70	7.41	10.10	2.42	2.62	12.59	21.57	6.93	10.39	12.14	2.66	10.26	26.24	14.86	14.59
Biodiversity (sp ² yr ² 10 ¹⁴)	26.47	19.19	180.30	236.04	34.37	11.01	294.85	137.91	129.86	249.04	191.82	66.93	243.11	156.69	338.61	130.42
GHG Emissions (kg CO ₂ e/eq)	3.22	3.78	0.61	0.57	1.41	5.08	0.78	3.11	1.57	0.81	4.37	1.62	0.90	3.34	0.84	5.67
Acidification (g SO ₂ e/eq)	27.84	98.88	24.62	35.44	20.22	118.46	44.28	39.23	13.44	35.47	44.77	15.45	35.78	54.14	54.26	43.57
Eutrophication (g PO ₄ -e/eq)	9.09	7.77	11.49	15.50	7.85	12.32	19.48	27.60	10.99	16.20	24.34	6.83	16.49	30.21	23.34	28.29
Water Use (L)	2316.30	223.96	4488.18	6809.20	1238.97	923.01	8415.96	3530.48	1949.27	6520.78	3909.75	864.39	6522.60	1902.51	10489.95	2960.68
Food waste index	0.82	0.76	0.36	0.50	1.37	1.12	0.65	0.12	0.21	0.53	0.27	0.74	0.58	0.28	0.83	0.59
S	s31	s32	s33	s34	s35	s36	s37	s38	s39	s40	s41	s42	s43	s44	s45	

Fig.4- Clustered samples of male age groups 4–8, 9–13, and 14–18 years.

شکل ۴- نمونه‌های خوشه بندی شده گروه سنی ۴ تا ۸ سال، ۹ تا ۱۳ سال، ۱۴ تا ۱۸ مردان

Age & Sex	Female 19-30	Female 19-30	Female 19-30	Female 19-30	Female 19-30	Female 31-50	Female 31-50	Female 31-50	Female 31-50	Female 31-50	Female 51+	Female 51+	Female 51+	Female 51+	Female 51+	Food Pattern of IRAN
C (Cost) normalized	0.84	0.41	0.67	0.56	0.30	0.25	3.47	0.46	0.18	0.35	0.16	0.58	0.53	1.78	0.34	0.23
Land Use (m ² *year)	2.44	8.32	5.82	11.35	11.24	18.33	0.13	8.79	16.30	7.17	14.96	11.13	8.15	0.15	7.46	14.59
Biodiversity (sp*yr*10 ¹⁴)	11.86	195.02	58.51	258.65	118.47	133.36	0.92	203.73	99.90	169.12	145.29	257.75	66.90	1.08	110.98	130.42
GHG Emissions (kg CO ₂ eqs)	3.61	0.70	3.07	0.66	2.79	2.75	11.42	0.70	2.23	0.74	2.11	0.79	3.20	5.94	2.88	5.67
Acidification (g SO ₂ eq)	79.35	30.59	61.09	42.00	24.09	39.31	315.92	33.89	37.23	26.16	28.85	42.81	49.23	161.60	18.51	43.57
Eutrophication (g PO ₄ -eq)	9.51	13.36	12.32	17.86	18.78	22.91	21.28	14.11	19.25	11.70	17.95	17.58	15.53	11.25	16.27	28.29
Water Use (L)	857.81	5421.47	1755.01	8008.34	4223.00	2432.12	184.11	5890.02	1314.07	4397.55	1225.29	7533.32	2746.44	172.61	4682.70	2960.68
Food waste index	0.88	0.52	0.48	0.64	0.17	0.20	2.33	0.63	0.26	0.49	0.25	0.78	0.45	1.26	0.28	0.59
S	s16	s17	s18	s19	s20	s21	s22	s23	s24	s25	s26	s27	s28	s29	s30	

Fig.5- Clustered samples of female age groups 19–30, 31–50, and 51+ years.

شکل ۵- نمونه‌های خوشه بندی شده گروه سنی ۱۹ تا ۳۰ سال، ۳۱ تا ۵۰ سال و بالای ۵۱ سال زنان

Age & Sex	Male 19-30	Male 19-30	Male 19-30	Male 19-30	Male 19-30	Male 31-50	Male 31-50	Male 31-50	Male 31-50	Male 31-50	Male 51+	Male 51+	Male 51+	Male 51+	Male 51+	Food Pattern of IRAN
C (Cost) normalized	1.45	0.54	0.47	0.38	0.16	0.31	0.55	0.39	0.22	0.38	0.30	0.98	0.61	0.42	1.07	0.23
Land Use (m ² *year)	0.18	10.97	5.19	8.47	15.86	15.85	11.14	8.12	25.67	0.95	18.68	3.45	12.60	9.00	2.51	14.59
Biodiversity (sp*yr*10 ¹⁴)	1.32	247.62	75.41	123.07	130.39	104.83	251.74	186.78	193.17	7.39	152.91	22.48	288.30	213.36	43.38	130.42
GHG Emissions (kg CO ₂ eqs)	4.90	0.79	2.84	3.70	2.24	2.86	0.79	0.93	3.32	1.85	3.24	3.85	0.81	0.93	4.10	5.67
Acidification (g SO ₂ eq)	131.66	41.37	33.75	28.54	33.46	45.53	41.90	30.56	45.76	27.18	39.78	92.61	45.94	31.66	93.13	43.57
Eutrophication (g PO ₄ -eq)	9.43	17.77	12.86	19.99	19.30	19.11	18.04	13.78	30.60	6.21	25.14	10.81	20.01	14.79	11.14	28.29
Water Use (L)	191.70	7723.83	3356.39	5390.10	1278.67	1068.04	7855.85	5231.40	2690.62	522.60	3431.22	584.07	8751.60	5565.53	1423.09	2960.68
Food waste index	1.07	0.66	0.37	0.26	0.27	0.35	0.66	0.54	0.16	1.27	0.20	0.87	0.73	0.54	0.77	0.59
S	s46	s47	s48	s49	s50	s51	s52	s53	s54	s55	s56	s57	s58	s59	s60	

Fig.6- Clustered samples of male age groups 19–30, 31–50, and 51+ years.

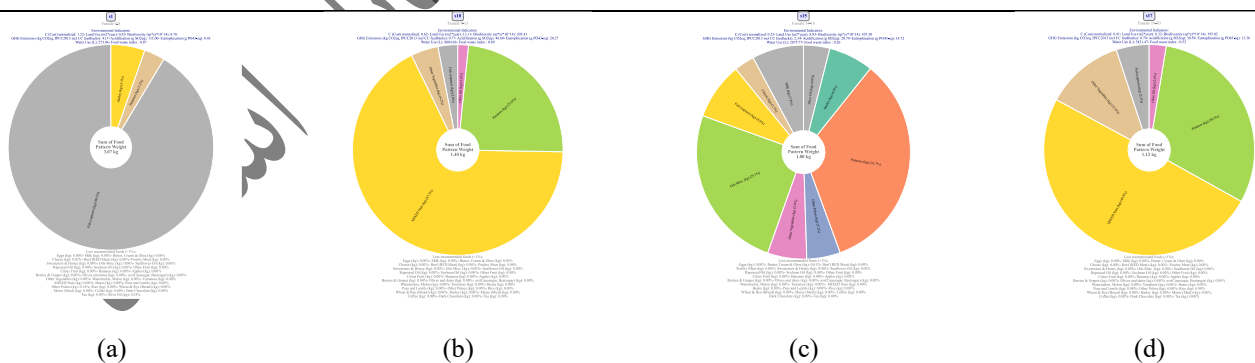
شکل ۶- نمونه‌های خوشه بندی شده گروه سنی ۱۹ تا ۳۰ سال، ۳۱ تا ۵۰ سال و بالای ۵۱ سال مردان

۳-۳- سبدهای بهینه (توزیع مواد غذایی)

در این بخش رژیم‌های غذایی نمایش داده شده است که نماینده استخراج شده از جبهه پارتو هستند و به صورت تصادفی از میان مجموعه راه‌حل‌های که در بخش قبلی توضیح داده شده است انتخاب شده است. بنابراین این رژیم‌ها تنها برای نمایش ویژگی‌های غالب هر خوشه و بررسی رفتار مدل در شرایط مختلف ارائه شده‌اند. در نتیجه، مقادیر بسیار بالای برخی گروه‌های غذایی در بعضی پاسخ‌ها لزوماً به معنای توصیه مصرف آن مواد غذایی نیست، بلکه نشان‌دهنده جهت‌گیری مدل در بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف مورد بررسی است.

بر اساس شکل ۷، رژیم‌های منتخب نمایانگر پاسخ‌های بهینه در راستای کاهش شش شاخص زیست‌محیطی و دو شاخص اقتصادی هدف‌گذاری شده هستند. این رژیم‌ها از میان نتایج خوشه‌بندی شده برای ۱۲ گروه مختلف سنی و جنسی استخراج شده‌اند. در نتیجه، ۱۲ سبد غذایی متفاوت معرفی شده است که هر یک ویژگی‌های منحصربه‌فردی از نظر ترکیب تغذیه‌ای و تأثیرات زیست‌محیطی دارا هستند (برای اطلاع از جواب‌های جبهه پارتو می‌توانید به فایل پیوست ۴ مراجعه کنید).

در شکل ۷، (a) از مجموعه جواب‌های گروه سنی ۴ تا ۸ سال زنان است. شکل ۷، (b) برای گروه سنی ۹ تا ۱۳ سال زنان است. شکل ۷، (c) برای گروه سنی ۱۴ تا ۱۸ سال زنان است. شکل ۷، (d) برای گروه سنی ۱۹ تا ۳۰ سال زنان است. شکل ۷، (e) برای گروه سنی ۳۱ تا ۵۰ سال زنان است. شکل ۷، (f) برای گروه سنی زنان بیشتر از ۵۱ سال است. شکل ۷، (g) برای گروه سنی مردان ۴ تا ۸ سال است. شکل ۷، (h) برای گروه سنی مردان ۹ تا ۱۳ سال است. شکل ۷، (i) برای گروه سنی مردان ۱۴ تا ۱۸ سال است. شکل ۷، (j) برای گروه سنی مردان ۱۹ تا ۳۰ سال است. شکل ۷، (k) برای گروه سنی مردان ۳۱ تا ۵۰ سال است و در آخر شکل ۷، (l) برای گروه سنی مردان بیشتر از ۵۱ سال



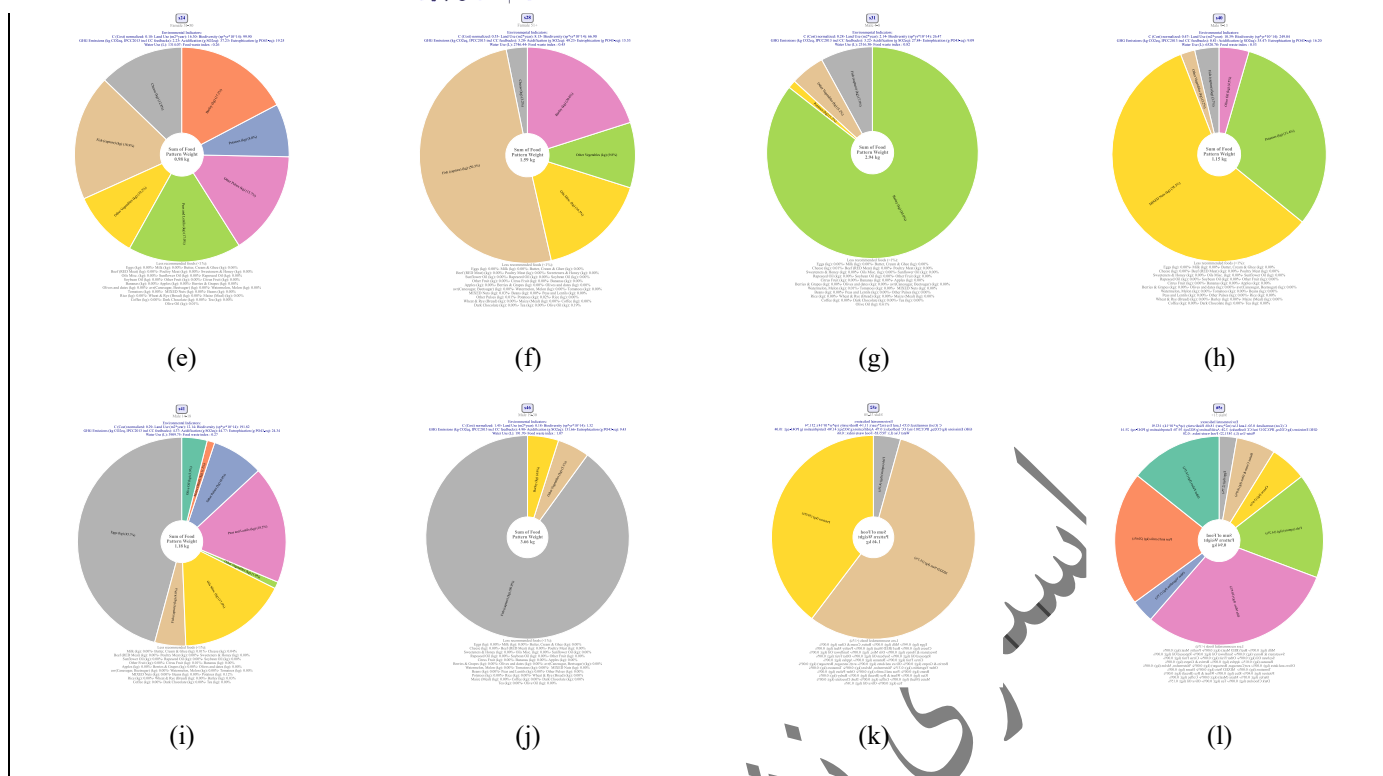


Fig.7- Algorithm-Recommended Diets for Age and Gender Groups

شکل ۷- نمونه‌هایی از پاسخ‌های منتخب جبهه پارتو برای گروه‌های سنی و جنسی (نماینده خوشه‌های استخراج‌شده از فضای پاسخ)

است.

شکل ۷ (a) رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان ۴ تا ۸ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۳ کیلوگرم بوده که در آن، حدود ۹۰ درصد سهم به غذاهای دریایی و ماهی، ۳ درصد به سیب‌زمینی و ۵ درصد به جو و سایر غلات اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۱.۲۲ بوده و هزینه آن بیش از ۵ برابر رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. نیاز سالانه به زمین برای این رژیم حدود ۰.۵۲ مترمربع است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی در این الگو برابر با 8.78×10^{-4} (sp.yr.10⁴) است که معادل یک سیزدهم مقدار رژیم غذایی فعلی است. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای این رژیم حدود ۴.۱۷ کیلوگرم معادل CO₂ در روز است که ۲۷ درصد کمتر از رژیم کنونی گزارش شده است. در مقابل، شاخص اسیدی‌شدن خاک و آب برابر با ۱۱۱ گرم معادل SO₂ برآورد شده که ۱۵۴ درصد بیشتر از مقدار مشابه در رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) این رژیم برابر با ۸.۴۳ گرم معادل PO₄³⁻eq بوده که حدود ۷۰ درصد کمتر از مقدار رژیم فعلی است. مصرف آب روزانه نیز ۲۷۳ لیتر برآورد شده که تنها معادل ۹ درصد از مصرف آب در رژیم فعلی است. با این حال، میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۸۷ بوده که نسبت به رژیم کنونی، ۲۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که گرایش به سمت محصولات غذایی دریایی می‌تواند به کاهش فشار قابل‌توجه بر منابع آب و حفاظت از تنوع زیستی کمک کند. با این حال، این محصولات اثرات قابل‌ملاحظه‌ای بر اسیدی شدن آب‌وخاک دارند. در ایران، قیمت بسیار بالای محصولات غذایی دریایی می‌تواند یکی از عوامل اصلی کاهش مصرف آن‌ها در رژیم غذایی فعلی جامعه باشد. همچنین باید توجه داشت که

این محصولات دارای نرخ بالای هدررفت هستند؛ با این وجود، تمرکز بر کاهش هدررفت در زنجیره تأمین آن‌ها می‌تواند تأثیر چشمگیری بر حفظ منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک‌تر کشور، داشته باشد.

شکل ۷ (b) رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان ۹ تا ۱۳ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۱۰۴ کیلوگرم است که در آن، ۶۷٫۵ درصد سهم به آجیل‌ها و خشکبار، ۲۳ درصد به سیب‌زمینی، ۴ درصد به سبزیجات، ۳ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی و ۱۶ درصد به روغن‌زیتون اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰٫۶۲ بوده و هزینه آن حدود سه برابر رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. میزان زمین موردنیاز سالانه این الگو حدود ۱۳۰۱۱ مترمربع است که اختلاف چندانی با رژیم فعلی ندارد. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با $30.541 (sp.yr.10^{14})$ بوده که معادل ۲۳۴ درصد بیش از مقدار رژیم کنونی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای در این رژیم حدود ۰٫۷۷ کیلوگرم معادل CO_2 برآورد شده که ۸۷ درصد کمتر از رژیم فعلی است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب نیز برابر با ۴۶۶۸ گرم معادل SO_2 بوده و تفاوتی با رژیم کنونی ندارد. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) این الگو ۲۰٫۲۷ گرم معادل $PO_4^{3-}eq$ است که حدود ۳۰ درصد کمتر از رژیم فعلی است. مصرف آب روزانه برابر با ۸۸۸۴ لیتر بوده که سه برابر میزان مصرف در رژیم فعلی است. با این حال، میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰٫۶۹ بوده که نسبت به رژیم کنونی ۱۰ درصد افزایش دارد.

این الگوی غذایی می‌تواند تأثیر چشمگیری بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. با این حال، با توجه به آنکه محصولاتی نظیر خشکبار و آجیل‌ها دارای مصرف آب قابل توجهی هستند، استفاده از چنین رژیمی برای کشورهایی که با بحران یا تنش آبی مواجه‌اند، توصیه نمی‌شود. همچنین، رژیم‌های غذایی مشابه که متکی بر مصرف بالای آجیل‌ها و سیب‌زمینی هستند، می‌توانند تهدیدی بالقوه برای تنوع زیستی محسوب شوند. با وجود این ملاحظات، به نظر می‌رسد قیمت بالای این محصولات در ایران عاملی محدودکننده برای مصرف بیش از حد آن‌ها بوده و در نتیجه می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آب و حفظ تنوع زیستی کمک کند. از این منظر، گرانی این اقلام غذایی می‌تواند به طور غیرمستقیم به نفع پایداری زیست‌محیطی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران باشد.

شکل ۷ (c)، رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان ۱۴ تا ۱۸ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۱ کیلوگرم بوده که ۳۳٫۷ درصد آن به سیب‌زمینی، ۲۵ درصد به روغن‌های گیاهی، ۸۶ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۶ درصد به سبزیجات، ۵ درصد به حبوبات، ۴ درصد به روغن‌زیتون، ۳٫۱ درصد به پنیر، ۷٫۸ درصد به شیر و ۶٫۸ درصد به غلات جو اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰٫۲۵ بوده و هزینه آن تقریباً با رژیم غذایی فعلی برابر است. میزان زمین موردنیاز سالانه برای این الگو حدود ۸۸۳ مترمربع برآورد می‌شود که ۴۰ درصد کمتر از رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با $107.30 (sp.yr.10^{14})$ بوده که حدود ۲۰ درصد کمتر از مقدار رژیم فعلی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای در این رژیم حدود ۲۰۳۴ کیلوگرم معادل CO_2 است که ۶۰ درصد کمتر از رژیم کنونی گزارش شده است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب نیز ۲۰٫۷۹ گرم معادل SO_2 برآورد شده که معادل نیمی از مقدار در رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) برابر با ۱۴٫۷۲ گرم معادل $PO_4^{3-}eq$ بوده که ۴۸

درصد کمتر از رژیم کنونی است. مصرف آب روزانه این رژیم ۲۸۷۵ لیتر برآورد شده که تقریباً برابر با مقدار مصرف در رژیم فعلی است. همچنین، میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۲۶ بوده که نسبت به رژیم فعلی ۳۰ درصد کاهش داشته است. این سبد غذایی که از تنوع قابل توجهی برخوردار است، توانسته در کاهش تمامی شاخص‌های محیط‌زیستی عملکرد موفقی داشته باشد، هرچند هزینه آن اندکی بیش از رژیم‌های فعلی است. می‌توان گفت این رژیم غذایی برای مناطقی که ترکیبی از اثرات محیط‌زیستی برای آن‌ها اهمیت دارد، گزینه‌ای مناسب به حساب می‌آید. باین‌حال، میزان بالای مصرف روغن‌های گیاهی در این الگو می‌تواند برای سلامت افراد نامطلوب بوده و خطراتی را به همراه داشته باشد، هرچند این محصولات منبع غنی کالری و انرژی روزانه به شمار می‌آیند.

شکل ۷ (d)، رژیم غذایی رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان ۱۹ تا ۳۰ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۱۰۱۲ کیلوگرم بوده که ۵۰ درصد آن به آجیل و خشکبار، ۳۰ درصد به سیب‌زمینی، ۱۲ درصد به سبزیجات، ۵.۱ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی و ۲.۶ درصد به روغن‌زیتون اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰.۴۱ بوده و هزینه آن تقریباً دوبرابر رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. میزان زمین موردنیاز سالانه برای این الگو حدود ۸.۳۲ مترمربع است که ۴۳ درصد کمتر از رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با ۱۹۵.۰۲ (sp.yr.10¹⁴) بوده که حدود ۵۰ درصد بیشتر از مقدار رژیم فعلی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای این رژیم حدود ۰.۷ کیلوگرم معادل CO₂ برآورد شده که ۸۸ درصد کمتر از رژیم کنونی است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب نیز ۳۰.۵۹ گرم معادل SO₂ بوده که معادل دو سوم مقدار رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون این الگو برابر با ۱۳.۳۶ گرم معادل PO₄³⁻-eq بوده که ۵۳ درصد کمتر از مقدار در رژیم فعلی است. مصرف آب روزانه این رژیم حدود ۵۴۲۱ لیتر است که ۸۳ درصد بیشتر از میزان مصرف در رژیم فعلی گزارش می‌شود. همچنین، میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۵۲ بوده که نسبت به رژیم فعلی ۷ درصد کاهش داشته است.

این رژیم غذایی که با مصرف قابل توجه خشکبار همراه است و در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نتایج چشمگیری نشان می‌دهد، مشابه خوشه‌های هم‌گروه خود در سایر سنین، در بهینه‌سازی مصرف منابع آب و کاهش قیمت محصولات عملکرد مطلوبی ندارد. علاوه بر این، آسیب قابل توجه آن به تنوع زیستی می‌تواند برای بخش‌های گسترده‌ای از ایران اهمیت زیست‌محیطی ویژه‌ای داشته باشد.

شکل ۷ (e)، رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان ۳۱ تا ۵۰ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۰.۹۸ کیلوگرم بوده که ۸ درصد آن به سیب‌زمینی، ۱۰.۲ درصد به سبزیجات، ۱۸.۹ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۱۷ درصد به عدس و نخود، ۱۵.۷ درصد به انواع لوبیا، ۱۷ درصد به جو و سایر غلات و ۱۲.۸ درصد به پنیر اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰.۱۸ بوده و هزینه آن حدود ۲۰ درصد کمتر از رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. میزان زمین موردنیاز سالانه برای این الگو حدود ۱۶.۳۰ مترمربع است که ۱۰ درصد بیشتر از رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با ۹۹.۹ (sp.yr.10¹⁴) بوده که حدود ۲۵ درصد کمتر از مقدار رژیم فعلی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای این رژیم حدود ۲.۲۳ کیلوگرم معادل CO₂ برآورد شده که ۶۰ درصد کمتر از رژیم کنونی است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب نیز ۳۷.۲۳ گرم معادل SO₂ گزارش شده که

تنها ۱۵ درصد کمتر از مقدار در رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون این الگو برابر با ۱۹.۲۵ گرم معادل $PO_4^{3-}eq$ بوده که ۳۰ درصد
 کمتر از رژیم فعلی است. مصرف آب روزانه این رژیم حدود ۱۳۱۴ لیتر بوده که ۵۶ درصد کمتر از میزان مصرف در رژیم فعلی برآورد می‌شود.
 همچنین، میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۲۶ است که نسبت به رژیم کنونی با ۳۳ درصد کاهش روبرو است.
 باتوجه به رژیم غذایی پیشنهادی برای این گروه سنی، مشاهده می‌شود که در میان دسته‌های خوشه‌بندی، الگوهایی وجود دارند که می‌توانند
 اکثر شاخص‌ها را تا حد قابل قبولی بهینه کنند. اگرچه شاخص اشغال زمین در این رژیم بهینه نیست، اما از نظر بهبود مصرف آب و کاهش
 انتشار گازهای گلخانه‌ای عملکرد قابل توجهی دارد. مصرف محصولات دریایی، سبزیجات، حبوبات، غلاتی مانند جو و لبنیات می‌تواند
 گزینه‌های مناسبی برای یک سبد غذایی سازگار با شرایط اقلیمی ایران باشد. همچنین کاهش هزینه‌ها در این رژیم می‌تواند بر کارآمدی و
 اثرگذاری آن بیفزاید. این رژیم به دلیل نیاز کمتر به کاهش هدررفت غذایی، به تمرکز و سرمایه‌گذاری کمتری در بهبود سیستم‌های تولید و
 مصرف احتیاج دارد.
 شکل ۷ (f)، رژیم غذایی منتخب برای گروه زنان بالای ۵۱ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۰.۹۱ کیلوگرم بوده که ۲۲
 درصد آن به نخود و عدس، ۹.۶ درصد به سیب‌زمینی، ۱۴.۷ درصد به سبزیجات، ۵.۶ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۶.۹ درصد به
 روغن‌زیتون، ۱۲.۴ درصد به سایر حبوبات، ۱۶.۷ درصد به جو و غلات، ۵.۵ درصد به کره و خامه، ۴.۶ درصد به پنیر و ۱.۸ درصد به موز
 اختصاص یافته است.
 مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰.۱۶ بوده و هزینه آن حدود ۳۰ درصد کمتر از رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت
 زمین موردنیاز برای این الگو حدود ۱۴.۹۶ مترمربع در سال است که تقریباً برابر با رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با
 ۱۴۵.۲۹ ($sp.yr.10^{14}$) بوده که ۱۰ درصد بیشتر از مقدار رژیم فعلی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای در این الگو حدود ۲.۱۱ کیلوگرم
 معادل CO_2 است که ۶۶ درصد کمتر از رژیم کنونی گزارش شده است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب برابر با ۲۸.۸۵ گرم معادل SO_2
 است که ۳۴ درصد کمتر از مقدار در رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) برابر با ۱۷.۹۵ گرم معادل $PO_4^{3-}eq$ بوده که ۳۷
 درصد کمتر از رژیم فعلی است. مصرف آب روزانه این رژیم حدود ۱۲۲۵ لیتر است که کاهش ۵۹ درصدی نسبت به رژیم کنونی دارد.
 همچنین، شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۲۵ برآورد شده است که ۳۴ درصد کمتر از رژیم فعلی است.
 این رژیم پیشنهادی، علی‌رغم اثرات منفی بر تنوع زیستی و اشغال زمین، در اکثر شاخص‌ها؛ اثر بهینه‌سازی قابل توجهی را نشان می‌دهد.
 نتایج حاکی از آن است که باهدف حفاظت از منابع آب و کاهش اسیدی شدن خاک و آب، و باتوجه به کاهش پدیده تغذیه‌گرایی، می‌توان از
 این الگوی غذایی بهره‌برداری بیشتری داشت. این الگو که نمایانگر ویژگی‌های خوشه متناظر خود است، نشان می‌دهد که مصرف حبوبات،
 سبزیجات، سیب‌زمینی و غلات جو، حدود ۷۰ درصد از نیازهای روزانه بدن را تأمین نماید، درحالی‌که کاهش چشمگیری در اثرات
 زیست‌محیطی حاصل می‌شود.

علاوه بر این، باوجود استفاده از روغن زیتون و محصولات دریایی، این رژیم از منظر اقتصادی هزینه‌ای به مراتب کمتر از الگوی غذایی کنونی دارد. تمرکز بر کاهش قیمت اقلام موجود در این سبد غذایی می‌تواند موجب ارتقای کارایی آن شود و این خوشه را به یکی از گزینه‌های قابل اعتماد برای تدوین رژیم‌های غذایی پایدار آینده تبدیل کند.

شکل ۷ (g)، رژیم غذایی منتخب برای گروه پسران ۴ تا ۸ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۲۰۹۴ کیلوگرم بوده که ۸۵ درصد آن به غلات جو، ۷۰۹ درصد به ماهی‌ها، ۵۰۲ درصد به سبزیجات و ۱۰۲ درصد به سیب‌زمینی اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم ۰۰۲۸ بوده و هزینه آن حدود ۲۱ درصد بیشتر از رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت زمین مورد نیاز برای این الگو حدود ۲۰۱۴ مترمربع در سال است که ۸۶ درصد کمتر از رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی در این رژیم برابر با ۲۶۰۴۷ (sp.yr.10¹⁴) بوده که کاهش ۸۰ درصدی نسبت به رژیم فعلی نشان می‌دهد. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای حدود ۲۰۲۳ کیلوگرم معادل CO₂ است که ۶۰ درصد کمتر از مقدار کنونی گزارش شده است.

شاخص اسیدی شدن خاک و آب برابر با ۲۷۰۸۴ گرم معادل SO₂ است که نسبت به رژیم فعلی ۳۷ درصد کاهش دارد. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) برابر با ۹۰۱ گرم معادل PO₄³⁻eq بوده که ۶۸ درصد کمتر از رژیم فعلی است. مصرف روزانه آب این الگو حدود ۲۳۱۶ لیتر برآورد شده که ۲۲ درصد کمتر از مقدار مصرف در رژیم کنونی است. همچنین، شاخص هدررفت غذایی در این رژیم حدود ۰۰۸۲ بوده که ۲۳ درصد بیشتر از رژیم فعلی است.

مصرف قابل توجه محصولاتی نظیر جو می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف تمامی شاخص‌های زیست‌محیطی ایفا کند. درحالی که نیازهای تغذیه‌ای انسان به طور کامل تأمین می‌شود، می‌توان رژیم‌هایی را که عمدتاً بر منابع دریایی، جو و مقدار محدودی سبزیجات تمرکز دارند، به عنوان رویکردی کارآمد برای کاهش آسیب‌های محیط‌زیستی و کاهش هزینه‌ها معرفی کرد. علاوه بر این، کاهش هدررفت مواد غذایی در زنجیره مصرف این الگوی غذایی می‌تواند بهبود چشمگیری در پایداری سیستم غذایی ایجاد کند.

شکل ۷ (h)، رژیم غذایی منتخب برای گروه پسران ۹ تا ۱۳ سال را نمایش می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۱۰۱۵ کیلوگرم بوده که ۵۸ درصد آن به آجیل‌ها و مغزها، ۳۱۰۴ درصد به سیب‌زمینی، ۴۰۵ درصد به روغن زیتون، ۳۰۷ درصد به ماهی‌ها و غذاهای دریایی، و ۲۰۲ درصد به سبزیجات اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰۰۴۷ بوده و تقریباً دوبرابر هزینه رژیم غذایی فعلی است. مساحت زمین مورد نیاز برای این الگو حدود ۱۰۰۳۹ مترمربع در سال برآورد می‌شود که ۲۹ درصد کمتر از مقدار زمین مصرفی در رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با ۲۴۹۰۰۴ (sp.yr.10¹⁴) بوده که افزایشی حدود ۹۰ درصد نسبت به رژیم فعلی دارد. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای معادل ۰۰۸۱ کیلوگرم CO₂ است که ۸۶ درصد کمتر از مقدار کنونی گزارش شده است. شاخص اسیدی شدن خاک و آب برابر با ۳۵۰۴۷ گرم معادل SO₂ بوده و نسبت به رژیم فعلی ۱۹ درصد کاهش یافته است. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) معادل ۱۶۰۲ گرم PO₄³⁻eq بوده و

کاهش ۴۳ درصدی نسبت به رژیم کنونی نشان می‌دهد. مصرف آب در این رژیم حدود ۶۵۲۰ لیتر در روز برآورد شده که ۱۲۰ درصد بیشتر
 از مقدار مصرف در رژیم فعلی است. همچنین، شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰.۵۳ است که ۶ درصد کمتر از رژیم کنونی است.
 افزایش مصرف آجیل‌ها و خشکبار، هرچند به طور کامل نیازهای تغذیه‌ای بدن را تأمین می‌کند، اما با مصرف بسیار بالای آب همراه است.
 ترکیب این گروه غذایی با سیب‌زمینی، ماهی و سبزیجات توانسته است به شکل قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد؛
 باین‌حال، از نظر بهره‌وری مصرف آب چندان بهینه نبوده و اثرات منفی قابل توجهی بر تنوع زیستی دارد. به نظر می‌رسد چنین الگوهای
 غذایی بیشتر برای مناطقی مناسب باشند که منابع آب کافی در دسترس دارند.

شکل ۷ (i)، رژیم غذایی منتخب برای گروه پسران ۱۴ تا ۱۸ سال را نشان می‌دهد. وزن این سبد غذایی حدود ۱۰.۱۸ کیلوگرم بوده که شامل
 ۴۵.۷ درصد تخم پرندگان، ۱۸.۲ درصد نخود و عدس، ۱۷ درصد روغن‌های حیوانی، ۸ درصد حبوبات، ۴ درصد ماهی‌ها و غذاهای دریایی،
 ۳.۹ درصد روغن‌زیتون، ۱.۲ درصد ذرت و ۱ درصد سبزیجات است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر ۰.۲۹ بوده و حدود ۲۶ درصد بیشتر از هزینه رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت زمین
 موردنیاز برای این الگو حدود ۱۲ مترمربع در سال است که نسبت به رژیم کنونی ۱۷ درصد کاهش دارد. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با
 ۱۹۲ (sp.yr.10¹⁴) است که افزایشی معادل ۴۷ درصد نسبت به رژیم فعلی نشان می‌دهد. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای این رژیم برابر با
 ۴.۳۷ کیلوگرم معادل CO₂ است که ۲۵ درصد کمتر از رژیم فعلی است. شاخص اسیدی‌شدن خاک و آب ۴۴.۷۷ گرم معادل SO₂ برآورد شده
 که ۲ درصد بیشتر از رژیم کنونی است. شاخص یوتریفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) معادل ۲۴.۳۴ گرم PO₄³⁻ eq بوده و کاهش ۱۴ درصدی نسبت
 به رژیم فعلی را نشان می‌دهد. مصرف آب این الگو حدود ۳۹۰۹ لیتر در روز است که ۳۲ درصد بیشتر از رژیم کنونی گزارش شده است.
 میزان شاخص هدررفت غذا در این رژیم حدود ۰.۲۷ بوده که نسبت به الگوی فعلی ۳۲ درصد کاهش دارد.

رژیم‌های این دسته به طور قابل توجهی از نظر کاهش هدررفت غذایی بهینه هستند. افزایش مصرف تخم‌مرغ، به‌عنوان منبعی مناسب برای
 تأمین نیازهای تغذیه‌ای، می‌تواند نقش مهمی در کاهش هدررفت غذایی ایفا کند. همچنین، در این خوشه، روغن‌های گیاهی و میوه‌ها به‌عنوان
 منابع اصلی تأمین انرژی شناسایی شده‌اند و مصرف حبوبات نیز به طور قابل توجهی توصیه می‌شود که این امر در مقایسه با رژیم غذایی فعلی
 تفاوت چشمگیری دارد. باتوجه‌به این رژیم، به نظر می‌رسد در مناطقی که ذخیره و نگهداری مواد غذایی و مدیریت دفع ضایعات اهمیت دارد،
 بهره‌گیری از چنین الگوهایی مناسب باشد. همچنین، این یافته‌ها می‌تواند راهنمایی برای الگوهای کشت و افزایش تولید حبوبات باشد.

شکل ۷ (j)، رژیم غذایی منتخب برای گروه مردان ۱۹ تا ۳۰ سال را نشان می‌دهد. وزن این سبد غذایی حدود ۳.۶۶ کیلوگرم بوده و ترکیب
 آن شامل ۹۰ درصد ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۵.۱ درصد سبزیجات و ۴.۹ درصد غلات جو است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۱.۴۵ بوده و حدود شش برابر هزینه رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت زمین موردنیاز
 برای این الگو ۰.۱۸ مترمربع در سال است که کاهش چشمگیری معادل ۹۹ درصد نسبت به رژیم فعلی دارد. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی
 برابر با ۱.۳۳ (sp.yr.10¹⁴) بوده که ۹۹ درصد کمتر از مقدار متناظر در رژیم کنونی است. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای در این رژیم ۴.۹

کیلوگرم معادل CO_2 است که ۱۴ درصد کمتر از رژیم فعلی گزارش می‌شود. شاخص اسیدی‌شدن خاک و آب معادل ۱۳۱۶۶ گرم SO_2 برآورد شده که سه برابر مقدار موجود در رژیم غذایی کنونی است. شاخص یوتریفیکاسیون برابر با ۹۰۴۳ گرم معادل $\text{PO}_4^{3-}\text{eq}$ بوده و کاهشی معادل ۶۷ درصد نسبت به رژیم فعلی را نشان می‌دهد. مصرف آب روزانه این رژیم ۱۹۱ لیتر است که ۹۴ درصد کمتر از رژیم کنونی است. میزان شاخص هدررفت غذا در این الگو حدود ۱۰۰۷ برآورد شده که ۴۳ درصد بیشتر از رژیم فعلی است.

این رژیم غذایی که نماینده خوشه مربوط به گروه سنی شکل ۳ (a) است. در کاهش مصرف منابع آب عملکرد بسیار مناسبی دارد. با این وجود، هزینه اقتصادی بالای آن می‌تواند محدودیت‌زا باشد، به‌ویژه در مناطقی که با تنش‌های شدید آبی مواجه هستند؛ بنابراین، توصیه می‌شود استفاده از این سبد غذایی ترویج شود و هم‌زمان تمرکز ویژه‌ای بر کاهش هزینه‌های مرتبط با این خوراکی‌ها صورت گیرد. همچنین باید تمرکز شدیدی در هنگام اجرای چنین رژیمی بر روی سیستم‌های غذایی باشد تا میزان هدررفت غذایی تا حد ممکن کاهش یابد.

شکل ۷ (k)، رژیم غذایی منتخب برای گروه مردان ۳۱ تا ۵۰ سال را نشان می‌دهد. وزن کل این سبد غذایی حدود ۱۰۴۶ کیلوگرم است که ۴۰۲ درصد آن به ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۵۵ درصد به آجیل‌ها و مغزها و ۳۹ درصد به سیب‌زمینی اختصاص یافته است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰۰۵۵ بوده و بیش از دوبرابر هزینه رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت زمین موردنیاز برای این الگو حدود ۱۱ مترمربع در سال است که ۲۵ درصد کمتر از مقدار زمین مصرفی در رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع زیستی برابر با ۲۵۲ (sp.yr.10^{14}) بوده که افزایشی معادل ۹۳ درصد نسبت به رژیم فعلی نشان می‌دهد. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای حدود ۰۰۷۹ کیلوگرم معادل CO_2 است که ۸۷ درصد کمتر از مقدار گزارش شده در رژیم کنونی است. شاخص اسیدی‌شدن خاک و آب معادل ۴۱۰۹ گرم SO_2 بوده که ۴ درصد کمتر از مقدار موجود در رژیم فعلی است. شاخص یوتریفیکاسیون برابر با ۱۸ گرم معادل $\text{PO}_4^{3-}\text{eq}$ بوده که حدود ۳۷ درصد کاهش نسبت به رژیم کنونی دارد. مصرف آب در این رژیم حدود ۷۸۵۵ لیتر در روز است که بیش از دو برابر میزان مصرف در رژیم فعلی گزارش شده است. میزان شاخص هدررفت غذایی در این الگو حدود ۰۰۶۶ برآورد شده که ۷ درصد بیشتر از رژیم غذایی کنونی است.

در این سبد غذایی مشاهده می‌شود که مصرف آجیل‌ها و غذاهای دریایی در کنار سیب‌زمینی می‌تواند نیازهای اساسی بخش بزرگی از جامعه را تأمین کند. با توجه به وابستگی شدید رژیم غذایی فعلی به غلات گندم و جو، می‌توان با تمرکز بر افزایش تولید و ظرفیت‌های کاشت مغزها، سبزیجات و محصولات کشاورزی مانند سیب‌زمینی، فشار بر منابع آب و زمین‌های کشاورزی را کاهش داد و در عین حال اثر گازهای گلخانه‌ای را کمتر از وضعیت فعلی کرد، بدون اینکه امنیت غذایی در خطر جدی قرار بگیرد.

شکل ۷ (l)، رژیم غذایی منتخب برای گروه مردان بالای ۵۱ سال را نشان می‌دهد. وزن این سبد غذایی حدود ۰۰۹۴ کیلوگرم است که شامل ۳۰ درصد چربی‌های حیوانی، ۲۰ درصد عدس و نخود، ۱۶ درصد ماهی‌ها و غذاهای دریایی، ۱۴۰۲ درصد حبوبات، ۳۰۵ درصد سبزیجات، ۲۰۷ درصد تخم‌مرغ، ۶ درصد کره و خامه لبنیات و ۵۰۶ درصد پنیر است.

مقدار نرمال شده هزینه روزانه این رژیم برابر با ۰۰۳ بوده و حدود ۳۰ درصد بیشتر از هزینه رژیم غذایی فعلی برآورد می‌شود. مساحت زمین موردنیاز این الگو حدود ۱۸۶۸ مترمربع در سال است که ۲۸ درصد بیشتر از میزان زمین مصرفی در رژیم کنونی است. شاخص تأثیر بر تنوع

زیستی برابر با ۱۵۳ (sp.yr.10¹⁴) بوده که افزایشی تقریباً ۱۷ درصدی نسبت به رژیم فعلی نشان می‌دهد. انتشار روزانه گازهای گلخانه‌ای حدود ۳.۲۴ کیلوگرم معادل CO₂ است که ۴۳ درصد کمتر از مقدار گزارش شده برای رژیم کنونی است. شاخص اسیدی‌شدن خاک و آب معادل ۳۹.۸ گرم SO₂ بوده که تنها ۹ درصد کمتر از مقدار در رژیم فعلی است. شاخص یوتروفیکاسیون (تغذیه‌گرایی) برابر با ۲۵ گرم معادل PO₄³⁻eq است که ۱۲ درصد کاهش نسبت به رژیم فعلی دارد. مصرف آب روزانه این رژیم حدود ۳۴۳۱ لیتر است که ۱۵ درصد بیشتر از مصرف آب در رژیم کنونی است. همچنین، میزان شاخص هدررفت غذا در این الگو حدود ۰.۲ است که ۳۹ درصد کمتر از میزان هدررفت در رژیم غذایی فعلی است.

این سبد غذایی که نماینده خوشه خود است، باتوجه به تنوع غذایی بالای آن، می‌تواند به طور قابل توجهی در کاهش شاخص هدررفت غذایی مؤثر باشد. اگرچه مصرف منابع آب در این رژیم نسبتاً بالا به نظر می‌رسد، اما با در نظر گرفتن کاهش شاخص هدررفت، می‌توان گفت که این رژیم نسبت به رژیم فعلی، مصرف آب و آسیب‌های محیطی کمتری به همراه خواهد داشت. این یافته بیان می‌کند، کاهش هدررفت غذایی در یک سیستم، می‌تواند تأثیر بیشتری بر کاهش مصرف منابع و اثرات محیطی داشته باشد.

در تمامی رژیم‌های معرفی شده مدل بهینه‌سازی که نماینده خوشه‌های خود بودند، مشاهده شد که مصرف مشتقات حیوانی به شدت کم توصیه شده است. همچنین مصرف روغن‌های سویا، کلزا و تخم آفتاب‌گردان به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در گروه میوه‌ها، توصیه به مصرف میوه‌های درختی کمتر شده است، درحالی که مصرف غلات کامل، به‌ویژه جو، نسبت به گندم توصیه شده است.

مصرف حبوبات در برخی رژیم‌ها به شدت توصیه شده است، درحالی که در رژیم‌های غذایی فعلی کمتر دیده می‌شود. همچنین توصیه به مصرف سبزیجات در تقریباً تمامی اهداف محیط‌زیستی وجود دارد که اهمیت این محصول را در کنار غذاهای دریایی و آجیل‌ها و مغزها نشان می‌دهد.

باوجود کاهش توصیه به مصرف روغن‌های گیاهی رایج، مصرف روغن‌هایی با منشأ غیر از کلزا، سویا و آفتاب‌گردان، مانند کنجد، بادام، نارگیل و میوه‌های روغنی دیگر، برای تأمین انرژی به شدت توصیه شده است. در گروه لبنیات، پنیر بیشتر از سایر مشتقات شیر توصیه شده و خود شیر نیز در بیشتر رژیم‌ها جایگاه ویژه‌ای دارد و بسیاری از نیازهای مغذی بدن را تأمین می‌کند.

به‌طور کلی، محصولات غذایی مانند غلات جو، سیب‌زمینی، سبزیجات، آجیل‌ها، حبوبات، ماهی‌ها و غذاهای دریایی، پنیر، روغن‌های زیتون و میوه‌های روغنی، از جمله مواد غذایی کلیدی هستند که می‌توانند نیازهای بدن را تأمین کرده و درعین حال آسیب‌های محیط‌زیستی را در سطحی قابل قبول و با هزینه اقتصادی معقول کاهش دهند.

(برای اطلاع از جزئیات نیازهای تغذیه‌ای گروه‌های سنی و جنسی، به پیوست ۱ مراجعه شود. همچنین، اطلاعات کامل مواد غذایی و شاخص‌های محیط‌زیستی در پیوست ۲ و مجموعه راه‌حل‌های حاصل از جبهه پارتو برای سناریوهای مختلف در پیوست‌های ۳ و ۴ ارائه شده است)

این پژوهش که یک چارچوب تحلیلی بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی رژیم غذایی پایدار ارائه می‌کند که مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه در فضای جستجوی مدل هستند که می‌توانند به عنوان ابزار تحلیل و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرند؛ این مدل به صورت هم زمان ابعاد زیست محیطی از جمله مصرف آب، گازهای گلخانه‌ای، کاربری زمین، تنوع زیستی، اسیدی‌شدن و تغذیه‌گرایی و ابعاد اقتصادی هزینه و هدر رفت را هم‌زمان در موازات قیود تغذیه‌ای قرار داده است. مقایسه جواب‌های جبهه پرتوی الگوریتم NSGA-II با متوسط الگوی غذایی ایرانیان در ۲۰ سال گذشته مشاهده شد که می‌توان با چه تغییراتی آسیب‌های محیطی و اقتصادی را کاهش دهیم.

با وجود اینکه انتخاب یا توسعه رژیم‌های غذایی قابل اجرا نیازمند تلفیق این نتایج با ملاحظات فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی است که در نسخه حاضر مدل لحاظ نشده‌اند، این رژیم‌های یافت شده از جبهه پرتوی بهینه به ما نشان داد که ایران، باتوجه به تنوع اقلیمی خود، می‌تواند با بازتعریف الگوی مصرف و بهره‌گیری بهینه از منابع، فشار ناشی از تنش‌های آبی و محیط‌زیستی را با استفاده از جواب‌های متنوع یافت شده کاهش داد و هم‌زمان نیازهای اقتصادی را تأمین کرد. الگوریتم بهینه‌سازی رژیم‌های غذایی پایدار نشان داد که اهداف محیط‌زیستی، مانند کاهش گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع آب، گاهی در تضاد با یکدیگر قرار دارند و بهبود یک هدف لزوماً به بهینه‌تر شدن هدف دیگر منجر نخواهد شد. همچنین مشاهده شد که رژیم‌هایی که شاخص هدررفت غذایی بیشتری دارند (مثلاً رژیم‌هایی که از محصولات با قیمت پایین‌تر استفاده می‌کنند مانند میوه‌ها و سبزیجات)، در مصرف منابع بهینه‌تر عمل می‌کنند؛ این امر نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر کاهش هدررفت در مواد غذایی با قیمت بیشتر است و توجه ناکافی به گروه‌های غذایی سبزیجات و میوه‌ها که می‌توانند با اصلاح سیستم‌های غذایی شاخص‌های هدر رفت را در سیستم‌های غذایی به مقدار قابل توجهی کاهش دهند.

باتوجه به توزیع نامتوازن منابع در ایران، برنامه‌ریزی بلندمدت بر روی الگوی مصرف و الگوی کشت می‌تواند فشار محیطی را در مناطق حساس کاهش دهد. بهره‌گیری از ظرفیت‌های مناطق خاص برای تولید محصولات ویژه، می‌تواند نیازهای سایر مناطق را تأمین کند. در این راستا، توصیه به تغییر رژیم غذایی متناسب با شرایط منطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای نیز پیدا می‌کند که باتوجه به نتایج در دسترس از جبهه پرتوهای یافت شده در گروه‌های سنی و جنسی متفاوت، سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران در هر منطقه می‌توانند الگوی بهینه خود را برای توسعه کشاورزی در منطقه باتوجه به نیازهای اولیه تثبیت کنند.

نتایج نشان داد که تغییر سبد غذایی به سمت محصولات توصیه شده (مانند غذاهای دریایی، سبزیجات)، اگرچه می‌تواند مصرف منابع را بهینه کند، اغلب با افزایش هزینه‌های سبد غذایی همراه شده است؛ بنابراین، سیاست‌گذاران و نهادهای قیمت‌گذاری می‌توانند در سطح کلان با تمرکز بر کاهش هزینه‌های مواد غذایی کم‌خطر از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی، مصرف این محصولات را افزایش داده و پایداری اقتصادی را نیز تقویت کنند. همچنین افزایش قیمت محصولات کم‌تر توصیه شده، می‌تواند به کاهش مصرف آن‌ها کمک کرده و در طولانی‌مدت با تمرکز بخش کشاورزی بر محصولات پر مصرف اصلاح شده الگوی کشت را با شرایط اقلیمی سازگار سازد.

باوجود محدودیت‌هایی از جمله نبود داده‌های مصرف غذایی دقیق برای گروه‌های سنی و جنسی و مقایسه جواب‌ها با میانگین مصرف جمعیت و همچنین نبود قیدهای متناسب مواد مغذی در کشور و نداشتن تنوع کافی در بیشتر جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی؛ جواب‌های یافت شده می‌تواند در بستر بهبود وضعیت محیط‌زیست مسیری مشخص را نمایش دهد و نه یک رژیم غذایی قابل اجرا در اصل یک توصیه بهبود

رژیم غذایی است. از آنجایی که جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم از گستره بالایی برای هر گروه سنی و جنسی برخوردار است و محدودیت‌های این مبحث به ما اجازه نمایش تمامی الگوهای یافت شده را نمی‌دهد، تلاش شده است تا تمامی جواب‌ها به شکل پیوست در اختیار علاقه‌مندان قرار بگیرد تا بتوانند بنابر اهمیت خود به یکی از اهداف محیط‌زیستی رژیم‌های مورد توجه خود را برای بهبود وضعیت محیطی مشاهده کنند؛ همچنین سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران بتوانند الگوی کشت خود و توصیه‌های آموزشی برای بهبود رژیم غذایی با توجه به محدودیت‌های منطقه‌ای و فرهنگی- اجتماعی را از بین جواب‌های یافت شده برگزینند. باین حال در این تحقیق ما تلاش بر روی ایجاد یک توصیه واحد برای مصرف غذا نداشته‌ایم و تنها برای ارزیابی رژیم‌های نه چندان ممکن بلکه قابل رویت برای بهبود وضعیت محیط زیست و آشنایی افراد علاقه مند به روش جدیدی برای یافتن ارتباط‌های نزدیک تر انسان با محیط‌زیست و اثر گذاری قابل لمس بوده است.

در نهایت، مشاهده شد که تعدادی از اهداف با وضعیت موجود در راستای یکدیگر نیستند، (مانند هزینه و شاخص هدررفت و یا شاخص هدر رفت و مصرف آب) با این حال با تغییرات در سیستم‌های غذایی مانند بهبود وضعیت هدر رفت میوه‌ها و سبزیجات در سیستم‌های غذایی می‌توان این اهداف را نیز هم راسا کرد. همچنین ضرورت همگام‌سازی سیاست‌های آینده با رژیم غذایی پایدار با توجه به اثرات قابل توجه رژیم کنونی مشاهده شد؛ و ضرورت وجود یک رژیمی که هم مبتنی بر توصیه‌های تغذیه‌ای بهداشتی باشد و هم با وضعیت محیطی هماهنگ باشد بیشتر از پیش اهمیت پیدا کرده است. سرمایه‌گذاری بر روی چنین الگوهایی و کاهش هدررفت محصولات غذایی می‌تواند تأثیر مثبتی بر تغییرات الگوی کشت و حفاظت از محیط‌زیست داشته باشد در حالی که به افزایش هزینه‌های مصرف منجر نشود. این مطالعه بر اهمیت طراحی الگوهای غذایی منطقه‌ای متناسب با شرایط اقلیمی و نیازهای انسان، با حداقل آسیب به محیط‌زیست، تأکید می‌کند که از نیازهای آینده ایران با توجه به متفاوت بودن اقلیم مناطق و دسترسی‌ها است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات پیش‌رو بر روی بهبود موارد همچون تامین تمامی مواد ریز مغذی و درشت مغذی به صورت گسترده‌تر و همچنین تحلیل دقیق و منطقه‌ای برای اثرات محیط‌زیستی هر گروه غذایی در سبدهای غذایی بیشتر و جزئی‌تر تحقیقات صورت گیرد، تا بتوان بسته‌ای از جواب‌های بهینه برای سیاست‌گذاران و عموم مردم لحاظ شود. همچنین توصیه می‌شود تا روش‌های گسترش این رژیم‌ها در مناطق و عموم مردم به صورت اجتماعی، سیاسی و فرهنگی مورد بررسی قرار گیرد تا بهبود توسعه این رژیم‌ها برای آینده بهتر و پایداری محقق شود.

۵- مراجع:

- Adekunle Stephen Toromade, Deborah Aanuoluwa Soyombo, Eseoghene Kupa, & Tochukwu Ignatius Ijomah. (2024). Reviewing the impact of climate change on global food security: Challenges and solutions. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(7), 1403–1416.
<https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i7.1300>
- Assoua, J. E., Bomdzele, E., Omosehin, O., Binuomote, S. O., Osabuohien, E., Enwa, S., & Okunade, S. O. (2024). Integrating climate change, food safety, nutrition, and health outcomes in food systems policies and programs in Africa. *World Food Policy*, 10(1), 86–110.
<https://doi.org/10.1002/wfp2.12068>

- Camporesi, G., & Bordon, A. (2025). Balancing Nutritional and Environmental Sustainability Through the Evaluation of the Water Footprint of the Recommended Italian, Spanish, and American Diets. *Nutrients*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/nu17010023>
- Castaldi, S., Dembska, K., Antonelli, M., Petersson, T., Piccolo, M. G., & Valentini, R. (2022). The positive climate impact of the Mediterranean diet and current divergence of Mediterranean countries towards less climate sustainable food consumption patterns. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12916-9>
- Chai, B. C., van der Voort, J. R., Grofelnik, K., Eliasdottir, H. G., Klöss, I., & Perez-Cueto, F. J. A. (2019). Which Diet Has the Least Environmental Impact on Our Planet? A Systematic Review of Vegan, Vegetarian and Omnivorous Diets. *Sustainability*, 11(15), 4110. <https://doi.org/10.3390/su11154110>
- Chaudhary, A., & Krishna, V. (2019). Country-Specific Sustainable Diets Using Optimization Algorithm. *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7694–7703. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06923>
- Filippin, D., Sarni, A. R., Rizzo, G., & Baroni, L. (2023). Environmental Impact of Two Plant-Based, Isocaloric and Isoproteic Diets: The Vegan Diet vs. the Mediterranean Diet. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph20053797>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gephart, J. A., Davis, K. F., Emery, K. A., Leach, A. M., Galloway, J. N., & Pace, M. L. (2016). The environmental cost of subsistence: Optimizing diets to minimize footprints. *Science of The Total Environment*, 553, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.050>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Godfray, H. C. J., & Garnett, T. (2014). Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), 20120273. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0273>
- Gussow, J. D., & Clancy, K. L. (1986). Dietary guidelines for sustainability. *Journal of Nutrition Education*, 18(1), 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0022-3182\(86\)80255-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3182(86)80255-2)

- Juan, A. De, & Wegenast, T. (2020). Temperatures, food riots, and adaptation: A long-term historical analysis of England. *Journal of Peace Research*, 57, 265–280.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:202101393>
- Khoury, C. K., Mockshell, J., & Béné, C. (2019). *Changing diets and transforming food systems*.
<https://www.researchgate.net/publication/336371093>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., Kastner, T., Moran, D., Schmidt, S., & Wood, R. (2019). Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change*, 56, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002>
- Scarborough, P., Appleby, P. N., Mizdrak, A., Briggs, A. D. M., Travis, R. C., Bradbury, K. E., & Key, T. J. (2014). Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change*, 125(2), 179–192. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1169-1>
- Scarborough, P., Clark, M., Cobiac, L., Papier, K., Knuppel, A., Lynch, J., Harrington, R., Key, T., & Springmann, M. (2023). *Dataset for 'Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts'*.
- Sobhani, S. R., Omidvar, N., Abdollahi, Z., & Al Jawaldeh, A. (2021). Shifting to a Sustainable Dietary Pattern in Iranian Population: Current Evidence and Future Directions. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.789692>
- Sobhani SR, Edalati S, Eini-Zinab H, Kennedy G, & Omidvar N. (2022). A comparative analysis of sustainability of the usual food intakes of the Iranian population, Iranian food-based dietary guidelines, and optimized dietary models. *Frontiers in Sustainable Food Systems*.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.838741>
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaledda, L., de Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., ... Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519–525.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Statistical Center of Iran. (1402). *Statistical Center of Iran*. Data and Statistical Information.
<https://amar.org.ir/cost-and-income>
- Tepper, S., Kissinger, M., Avital, K., & Shahar, D. R. (2022). The Environmental Footprint Associated With the Mediterranean Diet, EAT-Lancet Diet, and the Sustainable Healthy Diet Index: A Population-Based Study. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.870883>

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- UNEP. (2007). Global Environment Outlook (GEO4): Environment for Development. Nairobi. *United Nations Environment Programme*.
- Viala, E. (2008). Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(1), 127–129. <https://doi.org/10.1007/s10795-008-9044-8>
- Walter Willett, & Johan Rockström. (2019). *Food Planet Health Healthy Diets From Sustainable Food Systems Summary Report of the EAT-Lancet Commission*.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Xian, C. F., Gong, C., Lu, F., Zhang, L., & Ouyang, Z. Y. (2021). Linking Dietary Patterns to Environmental Degradation: The Spatiotemporal Analysis of Rural Food Nitrogen Footprints in China. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.717640>

A Multi-Objective Framework for the Analysis and Optimization of Water- and Environment-Sensitive Dietary Patterns Using an Economic and Environmental Approach

Abstract

Changes in dietary patterns over recent decades have imposed substantial pressure on the environment and natural resources. Consequently, developing a sustainable diet assessment framework capable of simultaneously reducing environmental impacts and economic costs has become increasingly important. In this study, for the first time, the NSGA-II multi-objective optimization algorithm was employed to optimize multiple objectives, including reductions in water consumption, land use, greenhouse gas emissions, terrestrial and freshwater acidification, biodiversity damage, eutrophication potential, total dietary cost, and food waste, while simultaneously satisfying the minimum nutritional requirements for 12 age and sex groups. The optimization results for each age and sex group were presented as a Pareto front, demonstrating the existence of a set of optimal dietary solutions with

different trade-offs among the considered objectives. Owing to the inherently multi-objective nature of the problem and the current structure of food prices, identifying a single solution that simultaneously optimizes all objectives while fully meeting nutritional requirements is not feasible. Therefore, policymakers and decision-makers can select the most appropriate dietary pattern from the proposed Pareto-optimal solutions according to their specific priorities and policy objectives. The findings of this study provide a practical framework for improving both human nutrition and environmental sustainability. The results suggest that revising certain policies, particularly by increasing support for seafood, fruits, vegetables, and legumes, could substantially reduce pressure on water resources and the environment. In contrast, current pricing policies for some food groups are not necessarily aligned with the long-term conservation of natural resources and environmental sustainability.

Keywords: Water and Environment Sensitive Dietary (WESD) pattern, dietary regimes, multi-objective optimization, sustainable dietary pattern, sustainable development.