



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage: <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



دانشگاه گرمسار

مقاله کامل پژوهشی

تحلیل ساختار شبکه هم‌تألفی پژوهشگران فیزیک هسته‌ای ایران

حسین مشتاق*، استادیار، گروه علوم کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

چکیده

در این تحقیق به تحلیل ساختار شبکه هم‌تألفی پژوهشگران فیزیک هسته‌ای در ۲۰ دانشگاه برتر ایران پرداخته می‌شود. گراف هم‌تألفی با ۱۴۷۰ راس و ۱۶۱۸ یال ساخته شد و ویژگی‌های ساختاری شامل قطر، شعاع، مرکز، کمر، میانگین طول مسیر، ضریب خوشه‌بندی، عدد استقلال و اندازه مؤلفه بیشینه هم‌بند محاسبه گردید. یافته‌ها نشان داد که ۹۴ درصد پژوهشگران در یک مؤلفه هم‌بند قرار دارند. قطر گراف ۱۱، شعاع گراف ۱۱، مرکز گراف شامل چهار راس، میانگین طول مسیر ۴/۹۱ و ضریب خوشه‌بندی متوسط ۰/۰۵۳۸ به‌دست آمد. درجه متوسط ۲/۲۰ و عدد استقلال گراف ۸۵۲ است. پنج خوشه اصلی در شبکه گراف شناسایی شد. شبکه هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران دارای ساختار پراکنده با همکاری‌های کوچک و محلی است و در مقایسه با شبکه‌های بین‌المللی قطر و میانگین طول مسیر بیش‌تری دارد. این نتایج نشان‌دهنده غلبه فرهنگ پژوهش انفرادی و ضرورت اتخاذ سیاست‌های تشویقی برای همکاری‌های گروهی بزرگ‌تر در ایران است.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

کلیدواژه‌ها:

هم‌تألفی،
فیزیک هسته‌ای،
شعاع گراف،
مرکز گراف،
ضریب خوشه‌بندی،
عدد استقلال.

عهده دار مکاتبات: حسین مشتاق

نشانی: ایران، سمنان، گرمسار، دانشگاه گرمسار

پیام نگار: h.moshtagh@fmgarmsar.ac.ir

۱- مقدمه

همکاری علمی در چند دهه اخیر به یکی از ارکان اصلی تولید دانش تبدیل شده است. افزایش پیچیدگی مسائل علمی، نیاز به تخصص‌های میان‌رشته‌ای و فشارهای نهادی برای افزایش بهره‌وری پژوهشی موجب رشد چشم‌گیر همکاری‌های علمی شده‌اند [۱]. هم‌تالیفی مقالات به عنوان ملموس‌ترین و قابل اندازه‌گیری‌ترین شکل این همکاری‌ها، همواره مورد توجه پژوهشگران حوزه علم‌سنجی و کتاب‌سنجی محسوب می‌شود [۲ و ۳].

شبکه‌های هم‌تالیفی را می‌توان به صورت گراف‌هایی مدل‌سازی کرد که در آن‌ها راس‌ها نمایانگر نویسندگان و یال‌ها نشان‌دهنده وجود حداقل یک مقاله مشترک بین دو نویسنده هستند [۲]. تحلیل ساختاری این گراف‌ها امکان شناسایی الگوهای همکاری، کشف جوامع علمی، تعیین نقش‌های کلیدی و درک پویایی‌های حاکم بر تولید علم را فراهم می‌سازد.

رشته فیزیک به عنوان یکی از بنیادی‌ترین علوم طبیعی، نقش محوری در پیشرفت فناوری و درک پدیده‌های طبیعی ایفا می‌کند. این رشته دارای گرایش‌های متعددی از جمله فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات، فیزیک حالت جامد، فیزیک محاسباتی و اختر فیزیک است. گرایش فیزیک هسته‌ای به عنوان یکی از گرایش‌های کاربردی و راهبردی فیزیک، به مطالعه ساختار هسته اتم، واکنش‌های هسته‌ای، پرتوزایی، و کاربردهای آن در حوزه‌هایی مانند پزشکی هسته‌ای، تولید انرژی، دوزیمتری، حفاظت پرتو و فناوری آشکارسازها می‌پردازد. با توجه به ماهیت کاربردی و میان‌رشته‌ای این گرایش، همکاری علمی میان پژوهشگران داخلی و همچنین ارتباط با شبکه‌های بین‌المللی از اهمیت

ویژه‌ای برخوردار است.

همکاری علمی میان پژوهشگران در حوزه فیزیک هسته‌ای ایران تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله با استفاده از اطلاعات اعضای هیات علمی درج شده در سایت ۲۰ دانشگاه برتر و اطلاعات علمی این اعضا در پایگاه‌های علمی وب آو ساینس^۱ و اسکوپوس^۲ در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، شبکه هم‌تالیفی ترسیم گردیده است. این داده‌ها امکان محاسبه دقیق ویژگی‌های گراف مانند قطر، شعاع، مرکز، کمر و میانگین طول مسیر را فراهم می‌کنند [۴]. اهداف این پژوهش عبارت از ساخت شبکه هم‌تالیفی و محاسبه ویژگی‌های ساختاری آن، شناسایی قوی‌ترین جفت‌های همکاری و خوشه‌های علمی و مقایسه شبکه ایران با شبکه‌های بین‌المللی فیزیک هسته‌ای است.

۱-۱- پیشینه تحقیق

مطالعات نظام‌مند در حوزه شبکه‌های هم‌تالیفی با کارهای پیشگام نیومن^۳ آغاز شد. وی با تحلیل پایگاه‌های داده نشان داد که شبکه‌های همکاری علمی دارای ساختار «جهان کوچک» هستند، به گونه‌ای که هر دو پژوهشگر به‌طور میانگین با شش واسطه به یکدیگر متصل می‌شوند. این مطالعه همچنین نشان داد که ضریب خوشه‌بندی در شبکه فیزیک به‌طور قابل توجهی بالاست [۲].

در ادامه، واتس^۴ و استروگات^۵ مدل ریاضی شبکه‌های جهان کوچک را ارائه دادند که در آن شبکه‌ها دارای میانگین طول مسیر کوتاه و ضریب خوشه‌بندی بالا هستند [۲].

باراباشی^۶ و آلبرت^۷ نیز مدل شبکه‌های بدون مقیاس را معرفی کردند که در آن توزیع درجه راس‌ها از قانون توان

^۱ Web of Science

^۲ Scopus

^۳ Newman

^۴ Watts

^۵ Strogatz

^۶ Barabási

^۷ Albert

مختلف فیزیک (اخترفیزیک، فیزیک ماده چگال، فیزیک نظری پرانرژی) پرداخت و نشان داد که ضریب خوشه‌بندی در فیزیک تجربی به $0/726$ می‌رسد که بسیار بالاتر از میانگین سایر علوم است [۲]. عباسی و همکاران شبکه‌های همکاری در فیزیک هسته‌ای را در سطح بین‌المللی بررسی کردند و نشان دادند که ساختار این شبکه‌ها به شدت تحت تأثیر پروژه‌های بزرگ تجربی (مانند همکاری‌های سرن) قرار دارد [۱۲]. چینچیللا-رودریگز^{۱۰} و همکاران نیز نقش همکاری بین‌المللی در علوم هسته‌ای را بررسی کردند [۱۳]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تحلیل شبکه‌های هم‌تألفی در سطح بین‌المللی انجام شده است، اما تاکنون مطالعه جامعی بر روی شبکه هم‌تألفی پژوهشگران فیزیک هسته‌ای ایران صورت نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر به تحلیل ساختاری شبکه هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران می‌پردازد.

۱-۲- معرفی گراف و شبکه هم‌تألفی

در این بخش به بیان مفاهیم نظریه گراف که در تحلیل شبکه هم‌تألفی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به اختصار بیان می‌شود. گراف یکی از مفاهیم بنیادی در ریاضیات و علوم کامپیوتر است که برای مدل‌سازی روابط بین اشیاء به‌کار می‌رود. یک گراف G به صورت زوج مرتب $G = (V, E)$ تعریف می‌شود، که در آن V مجموعه‌ای از راس‌ها یا گره‌ها و E مجموعه‌ای از یال‌ها یا پیوندها است که ارتباط بین دو راس را نشان می‌دهد. در این پژوهش از گراف ساده و

پیروی می‌کند و نشان می‌دهد که تعداد کمی از پژوهشگران دارای تعداد بسیار زیادی همکار هستند [۶].

گلنزل^۱ و شوبرت^۲ در مطالعه جامع خود به تحلیل شبکه‌های علمی از طریق هم‌تألفی پرداختند. آنها نشان دادند که سهم مقالات تکنویسنده از حدود ۲۵ درصد در سال ۱۹۸۰ به حدود ۱۰ درصد در سال ۲۰۰۰ کاهش یافته است و همکاری‌های بین‌المللی تأثیر استنادی بالاتری نسبت به مقالات داخلی دارند [۷].

کاتز^۳ و مارتین^۴ نیز به بررسی مفهوم همکاری علمی و چالش‌های اندازه‌گیری آن از طریق هم‌تألفی پرداختند [۸]. اکسنز^۵ و سیورتسن^۶ روندهای جهانی همکاری بین‌المللی را در بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان داد که سهم مقالات با همکاری بین‌المللی از $4/7$ درصد در سال ۱۹۸۰ به $25/7$ درصد در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است و در کشورهای پیشرفته این میزان به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد [۹].

واگنر^۷ و لیدسدورف^۸ با تحلیل شبکه جهانی همکاری علمی نشان دادند که یک هسته مرکزی فشرده از ۱۴ کشور پیشرفته صنعتی در حال شکل‌گیری است که نرخ همکاری بین‌المللی بالایی دارند [۱۰].

آدامز^۹ و همکاران در گزارش مؤسسه اطلاعات علمی به تحلیل الگوهای همکاری چندنویسنده پرداختند و نشان دادند که بیش از ۹۵ درصد مقالات دارای ۱۰ نویسنده یا کمتر هستند، اما مقالات با تعداد نویسندگان بالا تأثیر استنادی بسیار بیشتری دارند [۱۱].

نیومن در مطالعه خود به‌طور ویژه به زیرشاخه‌های

¹ Glänzel

² Schubert

³ Katz

⁴ Martin

⁵ Aksnes

⁶ Sivertsen

⁷ Wagner

⁸ Leydesdorff

⁹ Adams

¹⁰ Chinchilla-Rodríguez

غیرجهت‌دار استفاده شده است. گراف ساده به گرافی گفته می‌شود که بین هر دو راس حداکثر یک یال وجود دارد و هیچ حلقه‌ای ندارد. تعداد همسایگان یک راس را درجه راس می‌نامند. فاصله بین دو راس در گراف، برابر با طول کوتاه‌ترین مسیر بین آنها است. خروج از مرکز یک راس، بیشینه فاصله آن راس تا سایر راس‌های گراف است. به عبارت دیگر، اگر کوتاه‌ترین فاصله از یک راس به تمام راس‌های دیگر محاسبه شود، بزرگ‌ترین عددی که به دست می‌آید، خروج از مرکز آن راس نامیده می‌شود. به بیان ساده‌تر، خروج از مرکز یک راس نشان می‌دهد که دورترین راس از آن راس در چه فاصله‌ای قرار دارد. قطر گراف بیش‌ترین فاصله کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو راس در مؤلفه هم‌بند را نشان می‌دهد و با حداکثر خروج از مرکز در میان تمام راس‌ها برابر است. این شاخص نشان‌دهنده پراکندگی یا فشردگی شبکه است [۵].

شعاع گراف کمترین فاصله از مرکز گراف تا دورترین راس است و با حداقل خروج از مرکز در میان تمام راس‌ها برابر است. هرچه شعاع کوچک‌تر باشد، شبکه فشرده‌تر است. مرکز گراف مجموعه راس‌هایی است که خروج از مرکز آنها برابر با شعاع گراف باشد. این راس‌ها بهترین نقاط برای شروع انتشار اطلاعات در شبکه هستند. کمر گراف طول کوتاه‌ترین دور در گراف است و کوچک‌ترین حلقه بسته در شبکه همکاری را نشان می‌دهد. میانگین طول مسیر متوسط فاصله کوتاه‌ترین مسیر بین تمام جفت‌های راس و نشان‌دهنده سرعت انتشار اطلاعات است. ضریب خوشه‌بندی تمایل راس‌ها به تشکیل گروه‌های محلی را اندازه‌گیری می‌کند [۶].

عدد استقلال گراف اندازه بزرگ‌ترین مجموعه از راس‌ها است که هیچ یالی بین آنها وجود ندارد. چگالی شبکه نسبت تعداد یال‌های موجود به تعداد یال‌های ممکن

است. برای دریافت اطلاعات تکمیلی در مورد مفاهیم نظریه گراف، به کتاب وست^۱ مراجعه نمایید [۱۴]. شبکه هم‌تالیفی یک مدل ریاضی خاص از گراف است که برای نمایش و تحلیل روابط همکاری علمی بین پژوهشگران به کار می‌رود. در این مدل، راس‌ها نمایانگر پژوهشگران (نویسندگان) هستند و یال‌ها نشان‌دهنده وجود حداقل یک مقاله مشترک بین دو پژوهشگر می‌باشند. گراف‌های هم‌تالیفی معمولاً غیرجهت‌دار هستند، زیرا همکاری علمی یک رابطه دوسویه است [۲]. در این تحقیق، گراف هم‌تالیفی به صورت یک گراف ساده و غیروزن‌دار ساخته شده است. غیروزن‌دار بودن به این معنا است که تمام یال‌ها وزن یکسانی دارند و تنها نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود همکاری هستند و تعداد همکاری‌ها در وزن یال تأثیری ندارد. در این پژوهش، صرفاً به وجود رابطه همکاری (حداقل یک مقاله مشترک) توجه شده است و تعداد مقالات مشترک در وزن یال‌ها لحاظ نشده است. این انتخاب به دلیل ساده‌سازی تحلیل و تمرکز بر ساختار توپولوژیکی شبکه انجام شده است.

۲- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع علم‌سنجی و تحلیل شبکه اجتماعی است. جامعه آماری پژوهش شامل اعضای هیأت علمی گرایش فیزیک هسته‌ای در ۲۰ دانشگاه برتر ایران می‌باشد. داده‌های علمی این اعضا از پایگاه‌های معتبر بین‌المللی وب آو ساینس و اسکوپوس در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ جمع‌آوری گردید. تمام مراحل پردازش داده و ساخت گراف با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون^۲ انجام شد. کتابخانه اصلی مورد استفاده شبکه ایکس^۳ بود و برای پیش‌پردازش داده‌ها از کتابخانه پانداس^۴ استفاده گردید. برای شناسایی خوشه‌های همکاری در شبکه، از الگوریتم

^۱ West

^۲ Python

^۳ NetworkX

^۴ Pandas

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصات کلی شبکه هم‌تألفی

گراف هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران به صورت یک گراف ساده و غیروزن‌دار ساخته شده است، به این معنا که وجود یک یال فقط نشان‌دهنده حداقل یک مقاله مشترک بین دو پژوهشگر است و تعداد مقالات مشترک در وزن یال لحاظ نشده است. این گراف شامل ۱۴۷۰ راس (پژوهشگر) و ۱۶۱۸ یال (همکاری علمی) است. از میان تمام پژوهشگران، ۱۳۸۰ نفر (۹۴ درصد) در یک مؤلفه بیشینه هم‌بند قرار دارند که نشان‌دهنده اتصال نسبتاً خوب شبکه است. با این حال، ۹۰ پژوهشگر (شش درصد) از این مؤلفه اصلی جدا هستند که نشان‌دهنده وجود پژوهشگرانی با همکاری‌های بسیار محدود یا فقط تک‌نویسنده است. شکل ۱ نمایی از مؤلفه بیشینه هم‌بند این شبکه را نشان می‌دهد.

لوون^۱ استفاده شد. این الگوریتم که توسط بلوندل^۲ و همکاران معرفی گردید، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای تشخیص جوامع در گراف‌های بزرگ است [۱۵]. الگوریتم لوون براساس بهینه‌سازی معیار انسجام خوشه‌ای کار می‌کند. انسجام خوشه‌ای، کیفیت یک تقسیم‌بندی خوشه‌ای را می‌سنجد و مقداری بین منفی یک تا یک دارد؛ هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، ساختار خوشه‌ای قوی‌تر است اجرای این الگوریتم بر روی گراف هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران به شناسایی پنج خوشه اصلی منجر شد.

در این پژوهش، ویژگی‌های ساختاری استاندارد گراف بر روی مؤلفه بیشینه هم‌بند محاسبه شدند. این ویژگی‌ها عبارت از قطر گراف، شعاع گراف، مرکز گراف، کمر گراف، میانگین طول مسیر، ضریب خوشه‌بندی متوسط، عدد استقلال گراف، درجه متوسط، حداکثر درجه و چگالی شبکه هستند.

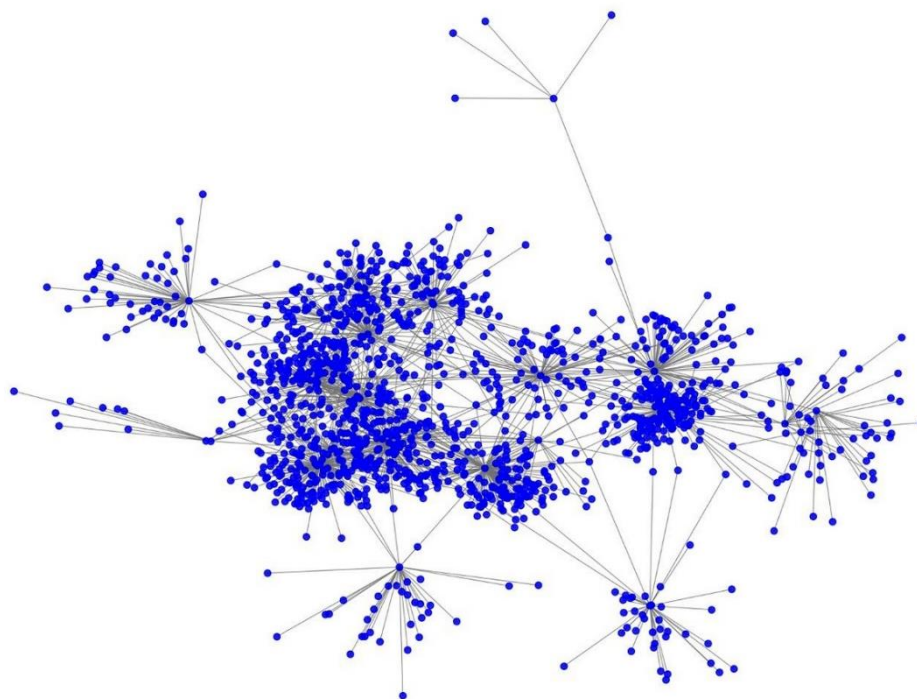
جدول ۱- ویژگی‌های ساختاری گراف هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران (۲۰۲۰-۲۰۲۵)

ویژگی شبکه	قطر	شعاع	مرکز	کمر	میانگین طول مسیر	ضریب خوشه‌بندی	درجه متوسط	حداکثر درجه	چگالی شبکه	عدد استقلال
مقدار	۱۱	۶	۴ راس	۶	۴/۹۱	۰/۰۵۳۸	۲/۲۰	۱۴۹	۰/۰۰۱۵	۸۵۲

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، قطر گراف برابر ۱۱ است؛ به این معنا که دو پژوهشی که بیش‌ترین فاصله را از یک‌دیگر دارند، برای ارتباط با یک‌دیگر باید از ۱۱ گام عبور کنند. شعاع گراف برابر شش محاسبه شده است که نشان می‌دهد از مرکز شبکه تا دورترین پژوهشگر شش گام فاصله وجود دارد. مرکز گراف شامل چهار راس است؛ این پژوهشگران دارای کمترین خروج از مرکز بوده و بهترین موقعیت را برای انتشار سریع اطلاعات در شبکه دارند. کمر گراف برابر شش است، یعنی کوچک‌ترین حلقه بسته همکاری در شبکه شامل شش پژوهشگر

می‌باشد که نشان‌دهنده وجود حداقل یک چرخه همکاری نسبتاً کوچک است. میانگین طول مسیر ۴/۹۱ نشان می‌دهد که هر دو پژوهشگر در شبکه به‌طور متوسط با حدود پنج گام ارتباطی از هم جدا هستند. قوی‌ترین جفت‌های همکاری (براساس تعداد مقالات مشترک) در شبکه شناسایی شدند که عمدتاً در خوشه پزشکی هسته‌ای و دوزیمتری متمرکز هستند. این جفت‌ها معمولاً شامل پژوهشگرانی می‌شوند که سال‌ها با یک‌دیگر همکاری مستمر داشته و مقالات متعددی را به صورت مشترک منتشر کرده‌اند.

^۱ Louvain^۲ Blondel



شکل ۱- مؤلفه پیشینه هم‌بند شبکه هم‌تالیفی پژوهشگران فیزیک هسته‌ای ایران

که هیچ همکاری مشترکی با یکدیگر ندارند؛ این امر تأکیدی بر پراکندگی بالای شبکه و غلبه پژوهش انفرادی است که بیش‌تر همکاری‌ها به صورت جفتی یا گروه‌های کوچک دو تا سه نفره است و تمایل به تشکیل خوشه‌های فشرده و بزرگ در شبکه وجود ندارد [۶].

قوی‌ترین جفت‌های همکاری در شبکه هم‌تالیفی فیزیک هسته‌ای ایران، عمدتاً در حوزه پزشکی هسته‌ای و دوزیمتری متمرکز هستند. قوی‌ترین جفت همکاری با ۵۶ مقاله مشترک، بیش‌ترین تعداد همکاری را در داده‌ها نشان می‌دهد. دو جفت دیگر با ۵۳ و ۵۲ مقاله مشترک در رتبه‌های بعدی قرار دارند. یکی از پژوهشگران کلیدی با حضور در چندین جفت برتر، نقش محوری در شبکه دارد. این الگو نشان‌دهنده وجود همکاری‌های پایدار و بلندمدت در برخی زیرحوزه‌های کاربردی است، در حالی که بیش‌تر جفت‌های قوی در خوشه پزشکی هسته‌ای و فیزیک ذرات متمرکز هستند. این یافته‌ها حاکی از آن است که قوی‌ترین همکاری‌ها بیش‌تر دوجانبه و متمرکز بر پژوهشگران کلیدی هستند تا تشکیل گروه‌های بزرگ.

با استفاده از الگوریتم لوون، پنج خوشه اصلی در شبکه شناسایی شد: (۱) پزشکی هسته‌ای و رادیوایزوتوپ (بیشترین تراکم داخلی)، (۲) فیزیک ذرات و شتاب‌دهنده‌ها (متمرکز بر مدل‌سازی نظری)، (۳) دوزیمتری و حفاظت پرتو (همکاری‌های کاربردی)، (۴) فیزیک محاسباتی و مدل‌سازی (شبیه‌سازی و الگوریتم‌های عددی) و (۵) فناوری آشکارساز و مواد (مرتبط با ساخت آشکارسازها). ضریب خوشه‌بندی پایین (۰/۰۵۳۸) تأیید می‌کند که بیش‌تر همکاری‌ها به صورت جفتی یا گروه‌های کوچک ضریب است و نشان می‌دهد که همکاری‌ها عمدتاً به صورت جفتی یا گروه‌های بسیار کوچک انجام می‌شود. درجه متوسط ۲/۲۰ به این معنا است که هر پژوهشگر به طور میانگین با دو تا سه نفر دیگر همکاری علمی دارد. حداکثر درجه ۱۴۹ نشان‌دهنده وجود یک پژوهشگر بسیار پرمکار در مرکز شبکه است که نقش گره مرکزی اصلی را ایفا می‌کند. چگالی ۰/۰۰۱۵ تأیید می‌کند که شبکه بسیار پراکنده است. عدد استقلال ۸۵۲ نشان می‌دهد که بیش از نیمی از پژوهشگران می‌توانند در مجموعه‌ای قرار گیرند

فرهنگ پژوهش از انفرادی به مشارکتی نیازمند آموزش و ایجاد انگیزه است. هم‌چنین، اصلاح آیین‌نامه ارتقا و استخدام با لحاظ شاخص‌هایی مانند تنوع مؤسسات همکار و تعداد همکاران بین‌المللی، نقش مهمی در نهادینه کردن فرهنگ همکاری خواهد داشت.

۳-۲- مقایسه با شبکه هم‌تألفی جهانی

برای درک دقیق‌تر جایگاه شبکه هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران، این شبکه با شبکه‌های بین‌المللی فیزیک ذرات و شبکه‌های علمی جهانی مقایسه شده است که در جدول ۲ مشاهده می‌شود. این مقایسه از جنبه‌های مختلف ساختاری از جمله قطر، میانگین طول مسیر، ضریب خوشه‌بندی، میزان تک‌نویسنندگی و نرخ همکاری بین‌المللی انجام گرفته است. قطر گراف شبکه ایران برابر ۱۱ محاسبه شده است. در مقایسه، نیومن در مطالعه شبکه‌های هم‌تألفی در پایگاه‌های مختلف از جمله فیزیک پرانرژی و فیزیک نظری نشان داده است که قطر شبکه در بخش‌های تجربی فیزیک به مراتب کمتر از این مقدار است [۲].

به عنوان نمونه، در پایگاه اسپیرس^۱ که عمدتاً مقالات فیزیک پرانرژی را پوشش می‌دهد، قطر گراف تنها ۱۹ و میانگین طول مسیر ۰/۴ گزارش شده است. با توجه به این که پایگاه شامل همکاری‌های عظیم تجربی (مانند همکاری‌های سرن^۲) می‌شود، قطر کمتر نمایانگر فشردگی بیش‌تر شبکه‌های جهانی فیزیک است. از سوی دیگر واتس و استروگات در مدل شبکه‌های جهان‌کوچک خود نشان داده‌اند که شبکه‌های با ساختار بهینه دارای میانگین طول مسیر کوتاهی هستند که امکان انتشار سریع اطلاعات را فراهم می‌آورد [۵]. در مقابل، میانگین طول مسیر ۴/۹۱ در شبکه ایران حاکی از سرعت پایین‌تر انتشار دانش در مقایسه با شبکه‌های جهانی است.

تحلیل عمیق خوشه‌ها براساس الگوریتم لوون و با بررسی تراکم داخلی، تعداد یال‌ها، درجه متوسط درون‌خوشه‌ای و کاربردهای عملی انجام شد. هر خوشه نه تنها از نظر ساختاری، بلکه از نظر موضوعی و سیاست‌گذاری نیز مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع، پنج خوشه شناسایی شده نشان‌دهنده تمرکز شبکه ایران بر کاربردهای عملی و محلی است. ضریب خوشه‌بندی پایین کلی شبکه (۰/۰۵۳۸) با وجود تراکم داخلی هر خوشه، حاکی از آن است که تعامل بین خوشه‌ها ضعیف بوده و شبکه فاقد «پل‌های بین‌خوشه‌ای» قوی است. این یافته مهم‌ترین پیام سیاستی پژوهش حاضر است. تقویت ارتباطات بین خوشه‌ها می‌تواند به ادغام دانش و افزایش تأثیر علمی کمک کند. برای ارتقای این شبکه، اتخاذ سیاست‌های جامع ضروری است. شبکه هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران با وجود ساختار پراکنده، پتانسیل بالایی در حوزه‌های کاربردی مانند پزشکی هسته‌ای و فناوری آشکارساز دارد. با اجرای سیاست‌های مناسب می‌توان این شبکه را به سمت فشردگی بیش‌تر، کاهش قطر و افزایش تأثیر علمی سوق داد. براساس یافته‌های این پژوهش، نخستین گام برای بهبود شبکه هم‌تألفی فیزیک هسته‌ای ایران، طراحی سیاست‌های تشویقی برای تشکیل گروه‌های تحقیقاتی بزرگ‌تر (بیش از پنج نفر) و انتشار مقالات چندنویسنده است. هم‌چنین، ایجاد پایگاه داده ملی هم‌تألفی با قابلیت بروزرسانی سالانه و دسترسی رایگان برای پژوهشگران، می‌تواند شفافیت وضعیت همکاری‌ها را افزایش دهد. با توجه به نرخ پایین همکاری بین‌المللی (کمتر از ۱۵ درصد)، حمایت مالی و ساختاری از پروژه‌های مشترک با مراکز معتبر جهانی ضروری است. علاوه بر این، تقویت پل‌های ارتباطی بین پنج خوشه شناسایی شده می‌تواند به ادغام دانش و افزایش نوآوری‌های کاربردی کمک کند. از سوی دیگر، تغییر

^۱ SPIRES

^۲ CERN

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های شبکه فیزیک هسته‌ای ایران با شبکه‌های جهانی

ویژگی	قطر گراف	میانگین طول مسیر	ضریب خوشه‌بندی	درصد تک‌نویسنده	همکاری بین‌المللی
شبکه ایران	۱۱	۴۹۱	۰/۰۵۳۸	۴۸/۵	پایین
شبکه جهانی	۶-۳	۴-۲	۰/۳۰-۰/۱۵	۱۰/۷	بیش از ۵۰٪

ضریب خوشه‌بندی متوسط شبکه ایران ۰/۰۵۳۸ محاسبه شده است. نیومن ضریب خوشه‌بندی را برای زیرشاخه‌های مختلف فیزیک به ترتیب زیر گزارش کرده است: اخت‌فیزیک ۰/۴۱۴، فیزیک ماده چگال ۰/۳۴۸، فیزیک نظری پرنرژری ۰/۳۲۷ و اسپیرس (فیزیک پرنرژری تجربی و نظری) ۰/۷۲۶. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب خوشه‌بندی در تمام این زیرشاخه‌ها به‌طور چشم‌گیری بالاتر از شبکه ایران است [۲]. به ویژه در پایگاه اسپیرس، این ضریب بیش از ۱۳ برابر مقدار ایران می‌باشد. این تفاوت فاحش نشان می‌دهد که در شبکه‌های جهانی فیزیک، همکاری‌ها به صورت گروه‌های فشرده و مترام انجام می‌شود، در حالی‌که در ایران همکاری‌ها بیش‌تر به شکل جفتی یا گروه‌های بسیار کوچک (دو تا سه نفره) است.

در شبکه ایران، ۴۸/۵ درصد از پژوهشگران به عنوان تک‌نویسنده محض شناسایی شدند. گلنزل و شویرت روند کاهش تک‌نویسندگی را در سطح جهانی نشان داده‌اند [۷]. بر اساس این مطالعه، سهم مقالات تک‌نویسنده در تمام رشته‌ها از ۲۴/۸ درصد در سال ۱۹۸۰ به ۱۰/۷ درصد در سال ۲۰۰۰ کاهش یافته است. این در حالی است که در شبکه ایران، نزدیک به نیمی از پژوهشگران هم‌چنان به صورت انفرادی فعالیت می‌کنند. این تفاوت آشکار، بیانگر غلبه فرهنگ پژوهش انفرادی در ایران و فاصله معنادار آن از روندهای جهانی همکاری علمی است.

نرخ همکاری بین‌المللی در شبکه فیزیک هسته‌ای ایران پایین است و کمتر از میانگین جهانی و کشورهای پیشرفته می‌باشد. در سطح جهانی، اکسنز و سیورتنس نشان داده‌اند که سهم مقالات با همکاری بین‌المللی در کشورهای پیشرفته از ۴۰- ۷۵ درصد متغیر است. برای نمونه، سوئیس

۷۵ درصد، بلژیک ۷۳ درصد، سوئد ۷۰ درصد، انگلستان ۶۵ درصد، آلمان ۵۸ درصد و فرانسه ۶۳ درصد از مقالات خود را با مشارکت بین‌المللی منتشر می‌کنند [۹]. هم‌چنین، واگنر و لیدسدورف نشان داده‌اند که شبکه جهانی همکاری علمی به سمت تشکیل یک هسته مرکزی فشرده از ۱۴ کشور پیشرفته صنعتی حرکت کرده است [۱۰].

در مجموع، شبکه هم‌تالیفی فیزیک هسته‌ای ایران از نظر فشرده‌گی، ضریب خوشه‌بندی، نرخ تک‌نویسندگی و همکاری بین‌المللی تفاوت معناداری با شبکه‌های جهانی دارد. این تفاوت‌ها ریشه در عواملی هم‌چون محدودیت‌های بودجه‌ای، فقدان پروژه‌های کلان ملی و غلبه فرهنگ پژوهش انفرادی دارد. با وجود این کاستی‌ها، وجود خوشه‌های تخصصی امیدوارکننده در شبکه ایران نشان می‌دهد که با اتخاذ سیاست‌های مناسب و تقویت تعاملات میان‌خوشه‌ای، می‌توان گام‌های مؤثری در جهت بهبود ساختار همکاری‌های علمی در این حوزه برداشت.

۴- نتیجه‌گیری

شبکه هم‌تالیفی فیزیک هسته‌ای ایران با ۱۴۷۰ راس و ۱۶۱۸ یال، ساختاری پراکنده و عمدتاً محلی دارد. ۹۴ درصد پژوهشگران در یک مؤلفه هم‌بند قرار دارند که نشان‌دهنده پیوستگی نسبی شبکه است. با این حال، قطر ۱۱، شعاع شش، میانگین طول مسیر ۴/۹۱ و ضریب خوشه‌بندی بسیار پایین (۰/۰۵۳۸) حاکی از عدم فشرده‌گی و سرعت پایین انتشار دانش در این شبکه می‌باشد. وجود چهار راس در مرکز گراف و عدد استقلال ۸۵۲ نیز تأیید می‌کند که بخش قابل توجهی از پژوهشگران هنوز به صورت انفرادی فعالیت می‌کنند.

- [6] A.L. Barabási, R. Albert, Emergence of scaling in random networks, *Science* 286 (1999) 509-512.
- [7] W. Glänzel, A. Schubert, Analysing scientific networks through co-authorship, in: H.F. Moed, W. Glänzel, U. Schmoch (Eds.), *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*, Springer, Dordrecht, 2005, pp. 257-276.
- [8] J.S. Katz, B.R. Martin, What is research collaboration?, *Res. Policy* 26 (1997) 1-18.
- [9] D.W. Aksnes, G. Sivertsen, Global trends in international research collaboration, 1980-2021, *J. Data Inf. Sci.* 8 (2023) 26-42.
- [10] C.S. Wagner, L. Leydesdorff, International collaboration in science and the formation of a core group, *arXiv preprint cs/0612016*, 2006.
- [11] J. Adams, D. Pendlebury, R. Potter, M. Szomszor, Global research report: Multi-authorship and research analytics, Institute for Scientific Information, Web of Science Group, 2020.
- [12] A. Abbasi, L. Hossain, L. Leydesdorff, Betweenness centrality as a driver of preferential attachment in the evolution of research collaboration networks, *J. Informetr.* 6 (2012) 403-412.
- [13] Z. Chinchilla-Rodríguez, B. Vargas-Quesada, F. Moya-Anegón, The role of international collaboration in nuclear science: A bibliometric analysis, *Scientometrics* 118 (2019) 1231-1250.
- [14] D.B. West, *Introduction to Graph Theory*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [15] V.D. Blondel, J.L. Guillaume, R. Lambiotte, E. Lefebvre, Fast unfolding of communities in large networks, *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 2008 (2008) P10008.

شناسایی پنج خوشه اصلی نشان‌دهنده تخصصی‌شدگی موضوعی شبکه است. با این حال، ضعف تعاملات میان‌خوشه‌ای یکی از مهم‌ترین چالش‌های ساختاری به‌شمار می‌رود.

مقایسه این شبکه با شبکه‌های جهانی تفاوت‌های معناداری را آشکار می‌سازد. این تفاوت‌ها ریشه در محدودیت‌های بودجه‌ای، تحریم‌های علمی، عدم وجود پروژه‌های کلان ملی و غلبه فرهنگ پژوهش انفرادی دارد. پژوهش حاضر با وجود محدودیت‌هایی مانند تمرکز بر ۲۰ دانشگاه برتر و بازه زمانی پنج ساله، تصویری روشن از وضعیت فعلی شبکه ارائه می‌دهد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسنده این مقاله لازم می‌داند از داوران محترم به خاطر پیشنهادات مفید آنها در راستای بهبود نگارش مقاله، مراتب سپاس و تشکر خود را اعلام نماید.

مراجع

- [1] A. Zeng, Y. Fan, Z. Di, Y. Wang, S. Havlin, Impactful scientists have higher tendency to involve collaborators in new topics, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 119 (2022) e2207436119.
- [2] M.E.J. Newman, The structure of scientific collaboration networks, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98 (2001) 404-409.
- [3] W. Wang, S. Yu, T.M. Bekele, X. Kong, F. Xia, Scientific collaboration patterns vary with scholars' academic ages, *Scientometrics* 112 (2017) 329-343.
- [4] D.E. Chebukov, A.M. Nwohiri, A.A. Pechnikov, E.A. Znamenskaya, Analysis of co-authorship pattern in mathematics-related fields, *J. High. Educ. Unit* 44 (2023) 1-11.
- [5] D.J. Watts, S.H. Strogatz, Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature* 393 (1998) 440-442.