باسمه تعالی

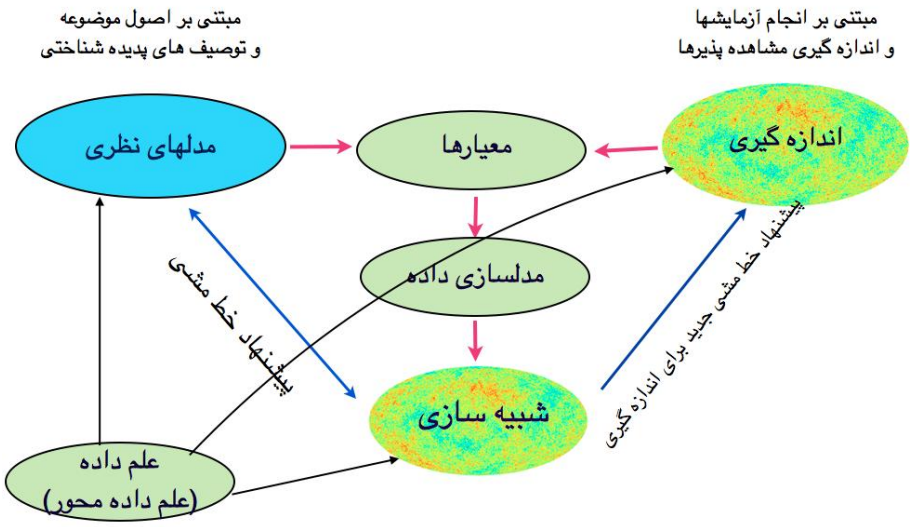
نظام موضوعات تحقیقاتی (فیزیک سامانه‌های پیچیده - کیهان شناسی)

در گروه علمی CCG-SBU and Ibn-Sina Lab

نظام روش و روش‌شناسی علمی در علوم و خاصه در علم فیزیک از یک سو مرتبط به نظریه‌پردازی و مدلسازی مبتنی بر اصول موضوعه و پدیدارشناسانه[1] است و از سویی دیگر ارایه چارچوب‌های خودسازگار نظری برای توصیف کمّی جهان طبیعت، آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها به منظور تایید، رد یا برطرف ساختن واگنی‌های ذاتی مدل‌های نظری انجام می‌گیرد. دستکاری ساختارها با کمک شبیه‌سازی‌ها به منظور ارایه شیوه‌ها و اصول‌های[2] تکمیلی برای انجام آزمایش و حتی ارتقای نگرش بنیادی ما از نظریه‌ها نیز بخش دیگری از این نظام روش‌شناسی علمی به حساب می‌آید. با در دست داشتن این روش‌شناسی، سال‌های متمادی تحولات متعددی در مقیاس‌های مختلف زمانی و فضایی رخ داده است. اما امروزه با پارادایم جدیدی مواجه شده‌ایم که در امتداد کلان داده[3] (به نحوی که حجم، نرخ تولید و تنوع در داده‌ها به صورت بی‌سابقه‌ای بزرگ باشد) پدید آمده است و به نام علم‌داده[4] یا دقیقتر علم داده‌محور[5] مشهور شده است. طی دو دهه اخیر به مدد فناوری‌های مختلف و نوظهور، مجموعه بسیار بزرگی از داده‌ها از مجراهای مختلف مانند اندازه‌گیریها توسط ابزارهای اندازه‌گیری در آزمایش‌های مختلف گرفته تا داده‌های تولید شده در بستر اینترنت ناشی از مراودات در شبکه‌های اجتماعی، تجارت، کسب‌وکار اینترنتی، داده‌های بیولوژیک و غیره فراهم شده است. در این میان، مفهومی به نام علم‌داده ظهور یافته است و به نظر می‌رسد که می‌توان آنرا به عنوان پارادایم جدید و جزو نظام روش‌شناسی علمی در قرن حاضر، محسوب نمود. این پارادایم ضمن ارتباط تعاملی با مواردی همچون داده، آمار، ریاضیات و علوم رایانه توانسته بر روی سه محور روش‌شناسی علمی مرسوم اثرات مستقیم و غیرمستقیمی داشته‌باشد. علم‌داده به معنای جستجو در داده‌ها به منظور اکتشاف و ارایه مدل‌های پیش‌بینی کننده و استخراج علم به صورت مستقیم از داده‌ها وقتی که در بزرگ‌مقیاس به داده‌ها نگریسته شود، تعریف می‌گردد. لذا یک وجه دیگر علم‌داده وجود کلان داده است که به مثابه حد ترمودینامیک بوده و می‌توان انتظار داشت که رفتارهایی را مشاهده کرد که پیش از این ظهور و بروز پیدا نکرده‌اند. همچنین علم‌داده شامل روش‌هایی برای داده‌کاهی و داده‌کاوی در داده‌های ساختارمند و بدون‌ساختار است. آنچه که از این مطالعات استخراج می‌شود علم داده‌محور نیز نام دارد. همانطور که قابل استنباط است، یکی دیگر از درگاه‌هایی که می‌تواند به شناخت علمی کمک‌کند، علم‌داده است. اما آیا این رویکرد در علم‌داده در تقابل با فقدان وجه تبیین چیستی و چرایی نیست؟ اگر پاسخ به این سوال مثبت باشد، نمی‌توان انتظار داشت که بتوان از پارادایم جدیدی برای رسیدن به معرفت علمی سخن گفت. چه نسبتی بین علم‌داده و روش‌شناسی علمی سنتی است؟ اهمیت علم‌داده در روش‌شناسی علمی چیست؟ چه بازآرایی در رویکرد روش‌شناسی علمی مرسوم به سبب این پدیده نوظهور وجود خواهد داشت؟ با تکیه بر تعدادی از مطالعات اخیر در فیزیک و پزشکی، می‌توان نشان داد که الگوریتم‌های داده‌محور می‌تواند منجر به مشاهده‌پذیرهایی شوند که پیش از این انتظار نمی‌رفت که شامل مفهوم خاصی باشند ضمن اینکه در صورت عدم استفاده از موهبت علم داده، با هزینه بالا و به سختی می‌توانستیم به صورت سیستماتیک خط‌مشی‌های[6] مناسبی برای مطالعات آن فرآیندها فراهم کنیم. نظریه‌پردازی، یافتن مشاهده‌پذیرها و مقایسه با موارد به دست آمده از مشاهده و اندازه‌گیری‌ها به همراه انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌های

[1] Phenomenological
[2] Protocols
[3] Big Data
[4] Data Science
[5] Data-Driven Science
[6] Pipeline

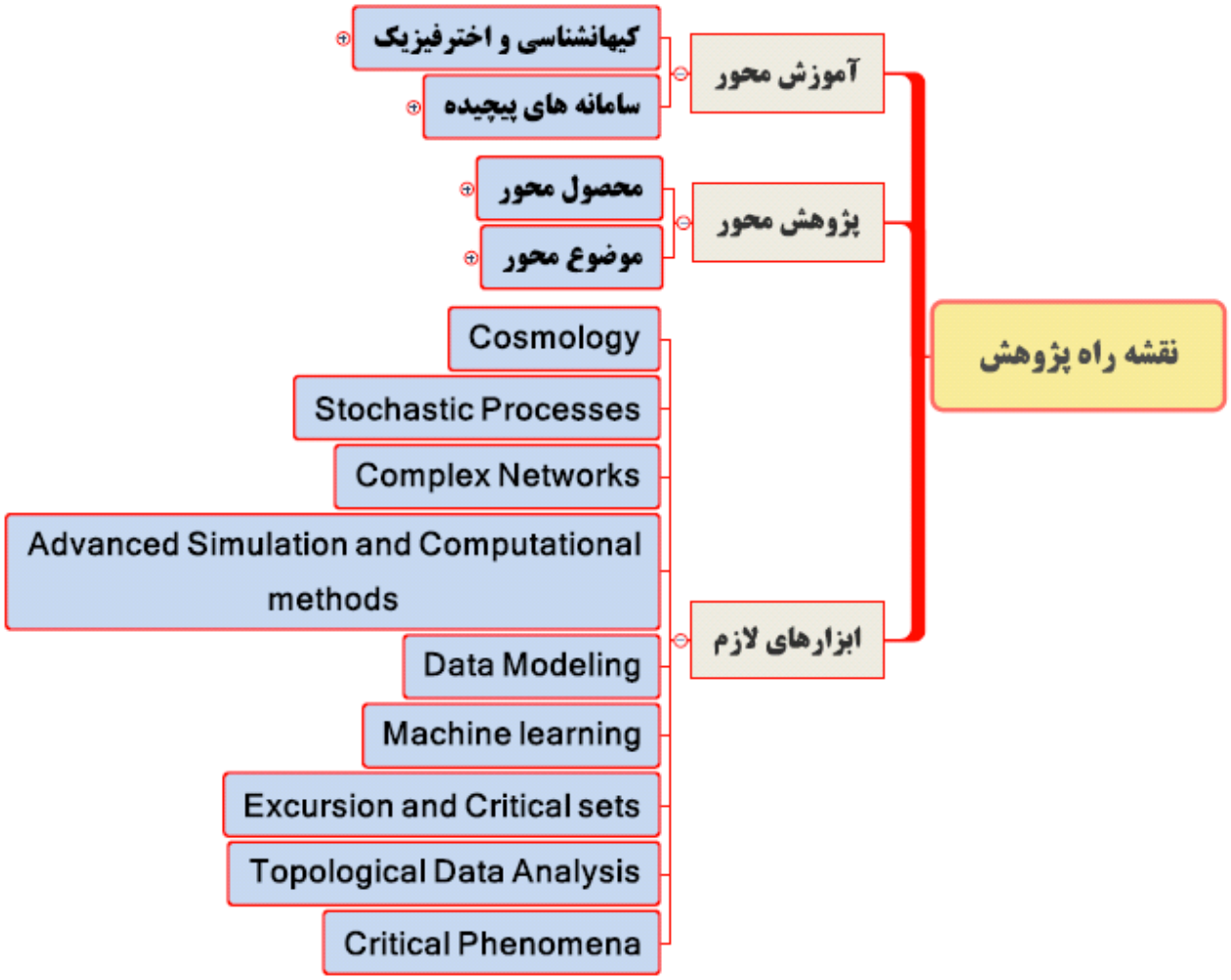
رایانه‌ای. برای تبیین شفاف‌تر بخش‌هایی که در تحقیقات گروه علمی من وجود دارد به شکل زیر توجه کنید:



شکل ۱: چارچوب روش‌شناسی علمی در علم فیزیک

بخش‌هایی همچون "نظریه"، "اندازه‌پذیرها"، "مقایسه نظریه و مشاهده" و نهایتاً "شبیه‌سازی" در برنامه تحقیقاتی که من در نظر دارم وجود لذا علاقه و پشتکار به تمام بخش‌های ذکر شده شرط لازم برای انجام پژوهشی نوین و برتر خواهد بود. بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت که علاقه به رهیافت‌های نظری همزمان با علاقه به انجام محاسبات رایانه‌ای و شبیه‌سازی‌های مرتبط از جمله شرایط لازم برای ورود به موضوعات تحقیقاتی مورد علاقه من خواهد بود. با توجه به علاقه اینجانب در خصوص بررسی تلفیقی و تعمیمی رهیافتهای میدانهای تصادفی و کیهانشناسی به همین منظور به طور کلی در حوزه‌های مطالعه سیستم‌ها و شبکه‌های پیچیده و میدانهای تصادفی و همچنین مدلسازی در کیهانشناسی و نجوم متمرکز خواهم بود. تحلیل داده‌ها از دریچه و منظر توپولوژی و کاربست بردارهای ویژگی برامده از خواص هندسی و توپولوژیک در روشهای یادگیری ماشین کلاسیک و کوانتومی، از دیگر موضوعات مورد علاقه من است.

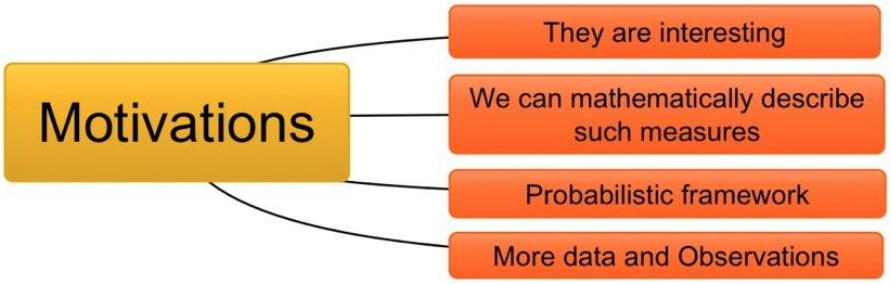
با این مقدم به طور کلی می توان گفت که نقشه راه پژوهش در گروه علمی من به صورت زیر است:



شکل ۲: نقشه راه پژوهش در گروه علمی CCG-SBU and Ibn-Sina Lab

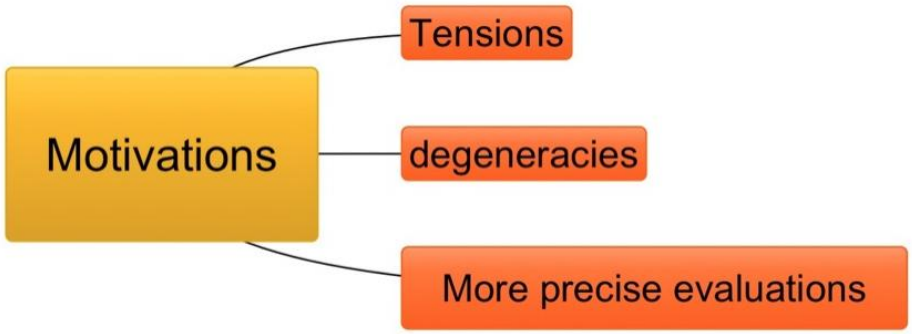
الف: کیهانشناسی و نجوم:

مطالعه در مورد جهانی که در آن زندگی می‌کنیم خصوصاً از دریچه آسمان، قدمتی دیرینه دارد. سنگ نوشته‌ها در کوه‌ها و غارها مؤید این است که انسان‌های نخستین ضمن علاقه‌مندی در خصوص کائنات، از جابجایی ستاره‌ها و دیگر اجرام برای گاه‌شماری و یافتن جهت و مسیر حرکت بهره می‌بردند. این علاقه‌مندی در طی زمان نه تنها رو به سردی نگرایید بلکه با عنایت به کشف و گسترش فناوری‌های نوین، خصوصاً در طی چند دهه گذشته، امروزه علم کیهان‌شناسی از زمره علوم تخیلی، خارج و به علوم دقیق تبدیل شده‌است. از منظر مطالعه میدانهای ۲+۱ و ۳+۱ بُعدی، در کیهانشناسی می‌توان مهمترین انگیزه‌های عمومی و خصوصی مربوط به رویکرد مطرح شده را به صورت زیر نشان داد:



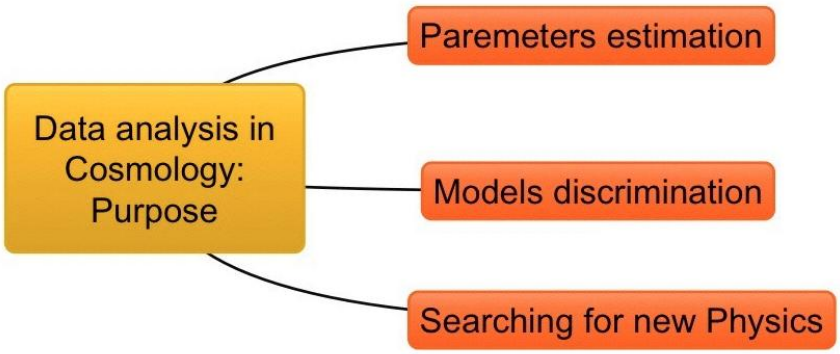
شکل ۳: انگیزه بهره‌گیری از ابزارهای آماری و توپولوژی (رویکرد ابزاری)

در مطالعات و رصدهای کنونی از میدانهای مختلف کیهانی چالشهای متعددی که اصطلاحاً با نام تنش (Tension) و ناهنجاری (Anomaly) خوانده می‌شوند، معرفی شده‌اند. از سویی دیگر برای توصیف کمّی از کیهان مدلهای نظری متعددی وجود دارند و همیشه تلاش شده است تا با کمک مشاهده‌پذیرها در رصد و درنظریه تبهگنی‌های موجود را مرتفع سازند. نیاز به ارزیابی‌های دقیق‌تر نیز در این میان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است لذا با عنایت به این موارد می توان انگیزه‌های تخصصی‌تر زیر را در نظر گرفت:



شکل ۴: انگیزه بهره‌گیری از ابزارهای آماری و توپولوژی (رویکرد موضوع محور)

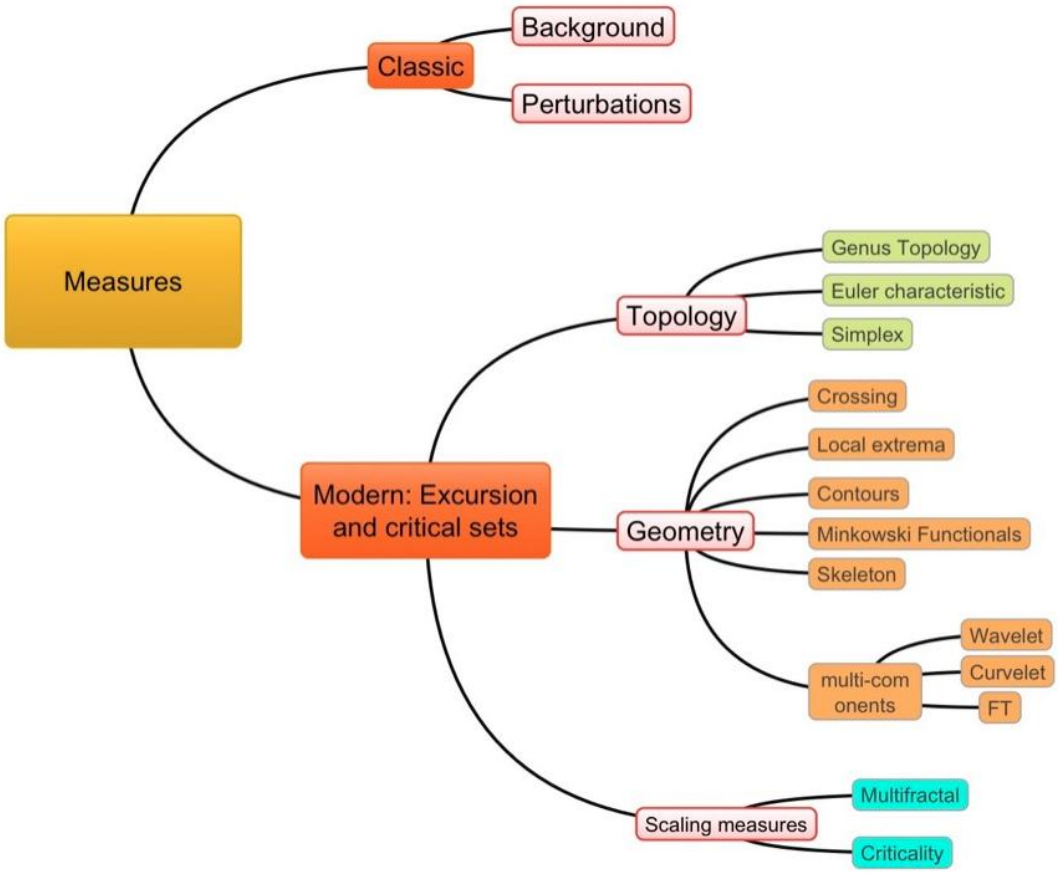
بنابراین به طور کلی در برنامه بلند مدت، من سه هدف زیر را در نظر خواهم داشت:



شکل ۵: اهداف راهبردی تحلیل داده در کیهانشناسی و نجوم

پرواضح است که بخش سوم آن با انگیزه چالش‌های جدید در کیهانشناسی و احتمال وجود سازوکارهای جدید که پیش از این به آنها توجه نشده است، بررسی خواهد شد. بخش دوم در برخی از فعالیت‌های اخیر گروه علمی من انجام شده و در حال انجام است. در بخش اول نیز

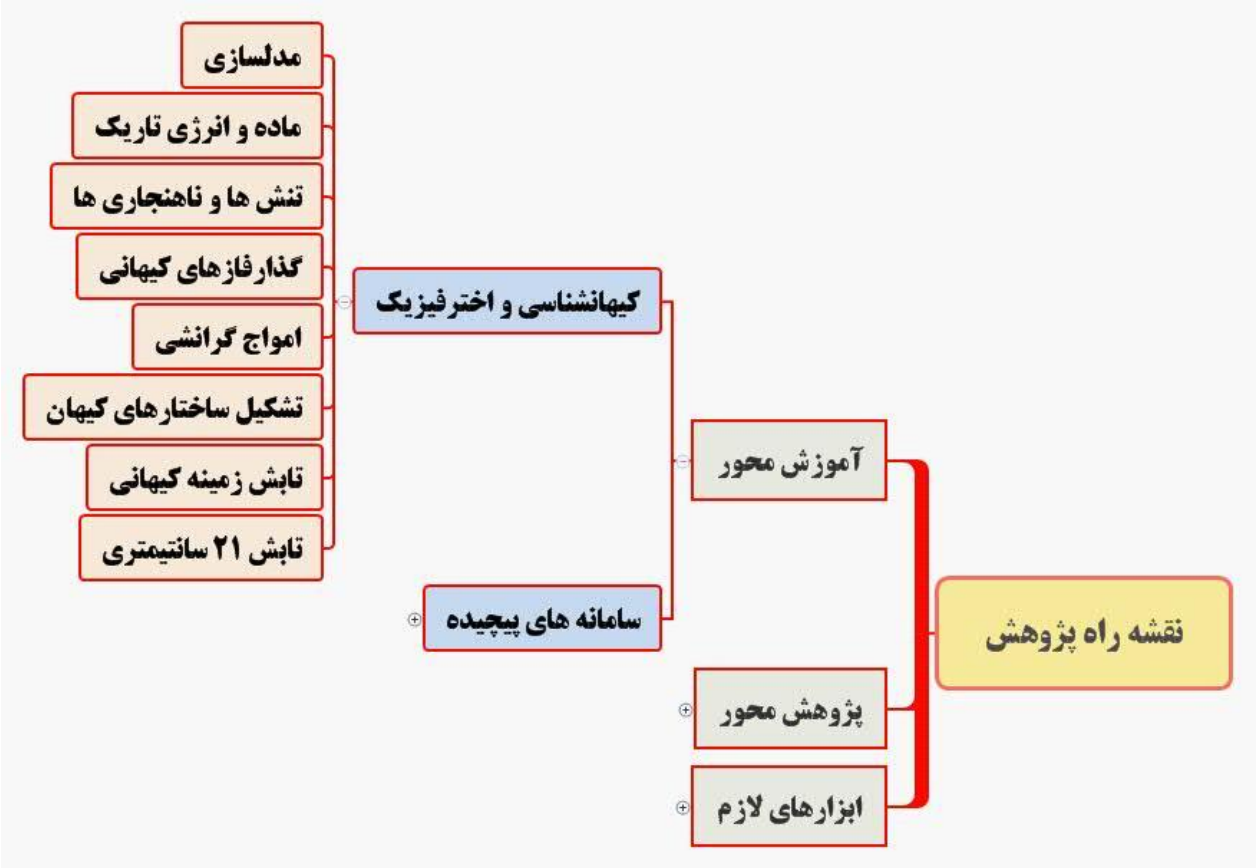
سابقه طولانی وجود دارد لذا ان بخش در صورت وجود اولویت‌های ویژه پی‌گیری خواهد شد. به منظور دستیابی به اهداف مذکور معیارهایی که مورد توجه قرار می‌گیرند را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:



شکل ۶: برخی از مهمترین معیارهای مشاهده‌پذیر

لذا مبتنی بر معیارهای مدرن که در دسته‌بندی بالا آورده‌ام تلاش خواهیم کرد که تلفیقی از معیارهای موجود را بکار بریم و یا حتی معیارهای جدیدی را ابداع کنیم که بتوانند بهتر از گذشته میدانهای کیهانی را مشخصه‌یابی کنند. نکته دیگری که در برنامه راهبردی مورد توجه من است ارایه خط مشئ‌هایی[۷] است که به نحو بهینه‌ای بتوانند تلفیق مناسبی از معیارهای مذکور برای رسیدن به یک هدف مشخص را تعیین کند. از ابزارهایی که به این هدف کمک ویژه‌ای می‌کند استفاده از روشهای یادگیری ماشینی در فیزیک است که در هر بخش که لازم باشد از آنها استفاده خواهم کرد. ویژگی‌های توپولوژیک (خواص سراسری) و خواص هندسی (خواص موضعی) این میدانها بخش دیگری از این تحقیق به شمار می‌رود. با توجه به اهمیت علم داده[۸] و تحلیل توپولوژی داده‌ها[۹] در این بخش استفاده از روشهای یادگیری ماشین[۱۰] نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت. برخی از سرفصلهایی موضوعاتی که می‌تواند مورد هدف برای پژوهش واقع شود به شرح زیر است:

[7] Pipelines
[8] Data Science
[9] Topological Data Analysis (TDA)
[10] Machine learning



شکل ۷: برخی از مهمترین موضوعات تحقیق در بخش کیهانشناسی

هر کدام از موضوعات در شکل ۷ خود به زیر بخشهایی تقسیم می‌شوند و اغلب تلفیقی از نظریه پردازی، محاسبات و شبیه‌سازی هستند.

ب: سامانه‌های پیچیده

همانطور که مطرح شد علم فیزیک به معنای مطالعه کمّی از جهان طبیعت با استفاده از زبان علم یعنی ریاضیات و تجهیزات، توصیف ماکروسکوپیک از رفتار یک سیستم را به عنوان نقطه شروع مطالعات به حساب می‌آورد. این توصیف ماکروسکوپیک علی‌الاصول به خواص خارجی سیستم[۱۱] که خود به خواص داخلی سیستم[۱۲] مربوط می‌شوند، می‌پردازد. از منظر فیزیک سیستم‌های پیچیده[۱۳] و سامانه‌های زیستی، رویکرد توصیف مؤثر[۱۴] سابقه نسبتاً موفق به منظور مطالعه رفتارهای نوپدید[۱۵]، دارد. خاصیت‌های جهان‌شمول[۱۶] و قابلیت بی‌اثرسازی[۱۷] بر روی درجات آزادی[۱۸] سیستم مورد مطالعه در مقیاس‌های مختلف، امکان مدل‌سازی با کمک ابزار ریاضی و تعیین مشاهده‌پذیرهای مرتبط[۱۹]، از جمله مزیت‌های استفاده از رویکرد مذکور به شمار می‌رود. غالباً در علم

---

[۱۱] External properties
[۱۲] Internal properties
[۱۳] Complex systems
[۱۴] Effective description
[۱۵] Emergent behavior
[۱۶] Universal properties
[۱۷] Marginalization
[۱۸] Degree of Freedoms
[۱۹] Relevant observables

فیزیک، توصیف ماکروسکوپیک از رفتار یک سیستم، به عنوان نقطه شروع مطالعات به حساب می‌آید. این توصیف ماکروسکوپیک علی‌الاصول به خواص خارجی سیستم[۲۰] که خود به خواص داخلی سیستم[۲۱] مربوط می‌شوند، می‌پردازد. به عنوان یک نمونه می‌توان به علم ترمودینامیک پرداخت. علم ترمودینامیک به عنوان یک توصیف موثر[۲۲] و پدیدارشناسانه[۲۳] از خواص ماکروسکوپیک و خصوصاً در حالت تعادل ترمودینامیکی یعنی تعادل‌گرمایی، تعادل مکانیکی و تعادل شیمیایی، از اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ میلادی شروع شد. در واقع می‌توان گفت که ترمودینامیک یک توصیف پدیدارشناسانه از خواص ماکروسکوپیک سیستم است وقتی که از افت‌وخیزهای میکروسکوپیک صرفنظر کرده باشیم. توصیف ماکروسکوپیک در علم ترمودینامیک در ابتدا با تمرکز بر وضعیت تعادل انجام شد. اما پس از آن توجه به سیستم‌های دور از تعادل و گذارفاز، نیز معطوف شد. سیستم-های فیزیکی غالباً سیستم‌های بس‌ذره‌ای هستند که از مجموعه‌ای از ذرات بنیادی ساخته شده‌اند. ادعا می‌شود که اندرکنش بین آنها را می‌شناسیم. لذا آنچه که جالب توجه است این است که علی‌رغم تنوع محدود در حد میکروسکوپیک، در حد ماکروسکوپیک فازهای مختلف مشاهده می‌شود. لذا اگر تصویر ما در حد میکروسکوپیک دقیق و کامل باشد، علی‌الاصول باید بتوانیم توصیف ماکروسکوپیک از فازهای مختلف را با در نظر گرفتن یک هامیلتونی بس‌ذره‌ای که در برگیرنده همه برهمکنش-های بنیادی است، به دست آوریم. این رهیافت علی‌الاصول درست به نظر می‌رسد اما هرگز رهیافت بهینه‌ای نیست لذا می‌توان به جای آن، از این منظر مسئله را نگریست که بسته به اینکه به دنبال چه ویژگی در چه مقیاسی هستیم از یک هامیلتونی موثر در همان مقیاس استفاده کنیم. به بیان دیگر یعنی یک هامیلتونی حاوی ضرایب جفت‌شدگی و پارامترهای نظم در مقیاس مورد علاقه را تشکیل می‌دهیم. اما سوال اینجاست که چگونه می‌توان این هامیلتونی را تعیین کرد؟ مطالعه تاریخی نشان می‌دهد که تاکنون از دو روش این کار انجام شده است:

الف) روش پدیده شناختی؛

ب) با انتگرال‌گیری بر روی درجات آزادی نامربوط سیستم و اصطلاحاً دانه درشت کردن[۲۴]؛

در هر دو روش بالا لاگرانژی دارای خواصی همچون: جایگزیدگی[۲۵]، تحلیلی[۲۶]، متقارن[۲۷] و پایدار[۲۸] است. بنابراین بر حسب میدان های موضعی به طور کلی می‌توان لاگرانژی مؤثر را به صورت زیر نوشت:

$$L_{[\phi]} = \int d^d x \mathcal{L}_{(\phi_{(x)} \,.\, \partial\phi_{(x)} \,....)}$$

در این رابطه انتگرالده چگالی لاگرانژی است. لازم به ذکر است که شکل تابعی این انتگرالده با درنظر گرفتن درجات مختلف مشتقات میدان‌ها بر اساس تقارن‌ها استنباط می‌شود. در گذار فازهای سیستم یعنی جایی که فاز سیستم تغییر چشمگیری نشان می‌دهد، غالباً جزئیات مهم نیستند و فقط تقارن‌ها و درجات آزادی مهم هستند لذا توصیف موثر مفید و کارساز است و این دقیقاً همان بنای ایجاد کلاس جهانی و جهان‌شمولی است. پس انتظار داریم که در حضور پیچیدگی‌ها و تفاوت‌های ذاتی، سیستم‌های مختلف نهایتاً ذیل یک چتر جهان‌شمولی قرار بگیرند. ایده اصلی نظریه لاندائو-گینزبورگ این است که به مقیاسی توجه می‌کنیم که نه خیلی کوچک است که ثابت های شبکه را ببینیم و نه خیلی بزرگ که به اندازه سیستم و یا طول

---

[۲۰] External properties
[۲۱] Internal properties
[۲۲] Effective
[۲۳] Phenomenological

[24] Coarse graining

[۲۵] Locality
[۲۶] Analyticity
[۲۷] Symmetries
[۲۸] Stability

همبستگی سیستم باشد، پس: $a << \Lambda < \xi$. برای این منظور توصیف پدیده‌شناختی و موثر ما باید به تقارن‌های سیستم احترام بگذارد. اثر ضرایب جفت‌شدگی (دما، میدان مغناطیسی و . . .) در آن وجود داشته باشد و در نزدیکی نقطه بحرانی چگالی انرژی آزاد لاندائو تابع همگنی (مقیاسی) از پارامترهای نظم باشد. پس[۶]

$$\mathcal{L} = \Sigma a_{n([k])}\eta^n$$

در رابطه بالا $\mathcal{L}$ چگالی انرژی لاندائو، k ضرایب جفت‌شدگی و η پارامتر نظم است. پس هامیلتونی لاندائو به صورت:

$$L_{[\phi]} = \int d^d x \, \Sigma a_{n([k])}\eta^n$$

نوشته می شود که البته ارتباطی بین $L_{[\phi]}$ و پتانسیل ترمودینامیکی انرژی آزاد هلمهولتز وجود دارد. که در تقریب صفرم $L_{[\phi]}$ همان F است. پس تابع پارش به صورت زیر است.

$$e^{-\beta F} = Z = \int D\phi \, e^{-\beta L_{[\phi]}}$$

با کمینه شدن پتانسیل ترمودینامیکی مرتبط بر حسب پارامتر نظم می‌توان پارامتر نظم را بر حسب ضرایب جفت‌شدگی استخراج کرد و در نتیجه توصیف ما از پدیده بحرانی تکمیل می‌گردد. با الهام از وضعیت یک سیستم ترمودینامیکی، این امکان وجود دارد که برای یافتن وجه تمایز در سیستم مورد مطالعه از دریچه خواص مقیاسی مشاهده‌پذیرها به مسئله نگریست. بر اساس آنچه که در آزمایش‌ها مشاهده شده است، مشخص شده است که سیستم‌ها علی‌رغم تفاوتهایی که در عناصر سازنده آنها وجود دارد می‌توانند ذیل یک کلاس جهانشمولی قرار گیرند.

از سویی دیگری می توان با الهام از شبکه‌های اجتماعی و با کمک نظریه گرافت به مطالعه سیستمهای مورد نظر پرداخت. علم شبکه علمی است که شبکه‌های پیچیده را به عنوان مجموعه‌ای از گره‌های متصل به هم توسط پیوندها یا یال‌ها بررسی می‌کند. سیستم‌ها اجتماعی، سیستم‌ها زیستی مانند مجموعه‌ی نورون‌های مغز انسان و اینترنت مثال‌هایی از شبکه‌های پیچیده هستند. شبکه‌ها در دست‌بندی‌های مختلفی به انواع متعددی مانند شبکه‌های جهان کوچک[۲۹] و شبکه‌های مقیاس آزاد[۳۰] و یا شبکه‌های جهت‌دار و غیرجهت‌دار[۳۱] تقسیم می‌شوند. در علم شبکه با مدل‌های مختلفی مانند مدل ریاضی نظریه‌ی گراف‌ها، مفاهیمی از قبیل اندازه شبکه، درجه‌ی رئوس[۳۲] متوسط شبکه، مرکزیت رأس[۳۳] شبکه و ... بررسی می‌شود. با توجه به پیچیدگی و درجات آزادی بسیار زیاد موجود در شبکه‌های پیچیده، کنترل و پیش‌بینی تحول آن‌ها مسئله‌ای بسیار مشکل است. برخی شباهت‌های اساسی مربوط به ساختار و دینامیک این نوع شبکه‌ها، این احتمال را به وجود می‌آورد که ممکن است برخی قوانین عامی وجود داشته باشند که بتوانند دینامیک این شبکه‌ها را توصیف کنند. نشان داده شده است که شبکه‌ی علّی توصیف‌کننده‌ی ساختار بزرگ مقیاس فضا-زمان عالم، همانند بسیاری از شبکه‌های پیچیده‌ی دیگر مانند اینترنت و شبکه‌های اجتماعی و زیستی دارای رفتار توانی[۳۴] است؛ همچنین شباهت ساختاری موجود، ناشی از هم‌ارزی تقریبی بین دینامیک رشد بزرگ‌مقیاس[۳۵] شبکه‌های پیچیده و شبکه‌های علّی معرفی شده و بر اساس این هم‌ارزی و با توجه به مفاهیم علم شبکه و کیهان شناسی پیشنهاد شده-است که برخی قوانین یکسان بر دینامیک شبکه‌های پیچیده و دینامیک علّی فضا-زمان حاکم است.

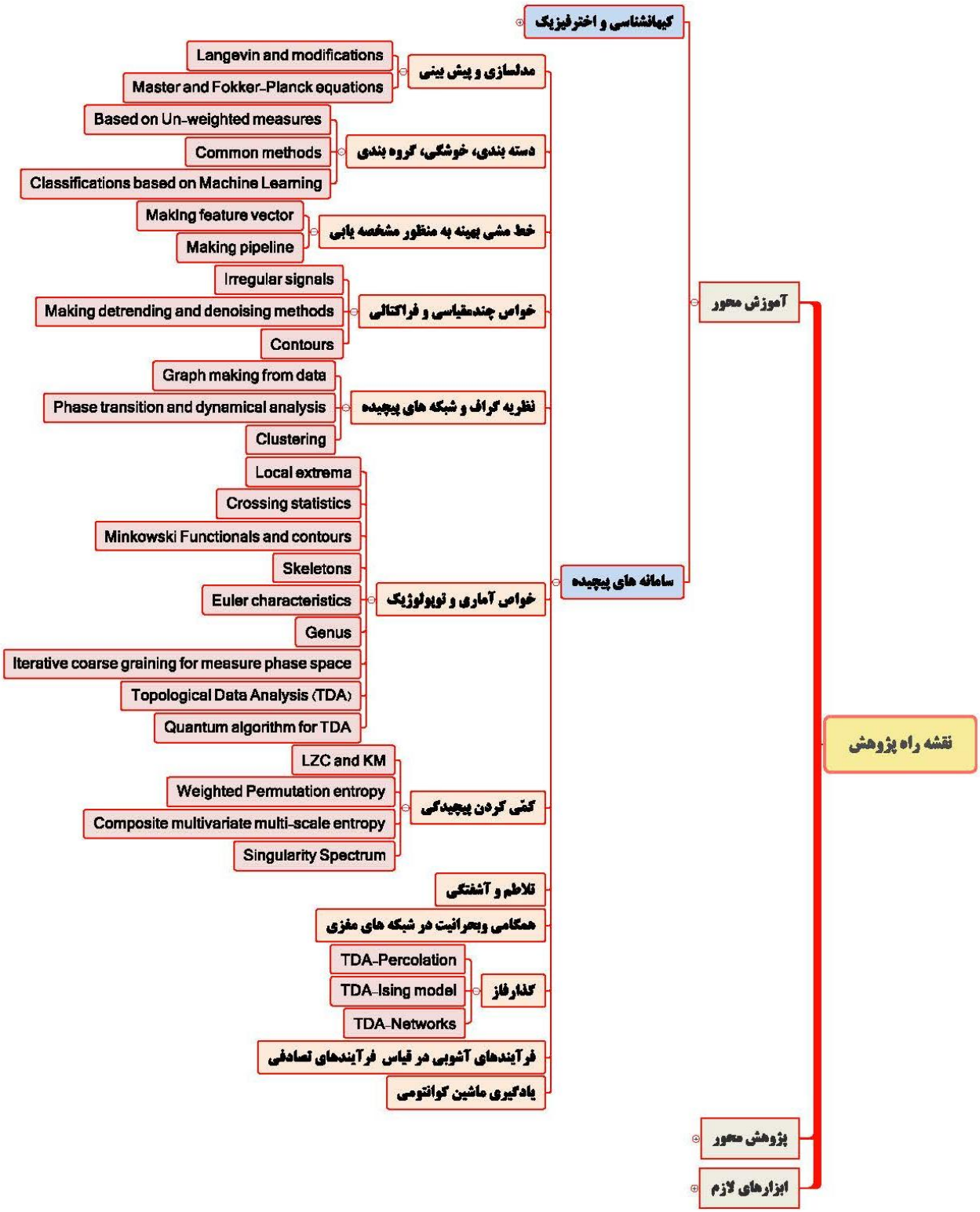
[29] Small-world network
[30] *Scale-free network*
[31] Directed and undirected network
[32] Node degree
[33] Degree centrality
[34] Power-law
[35] Large-scale growth dynamics

تحلیل توپولوژیکی داده نیز یکی از ابزارهای محوری در تحقیقات اخیر من به حساب می‌آید. تکیه بر رهیافت‌های داده-محور و بکارگیری ابزارهای موجود در علوم داده برای تحلیل سیستم‌های پیچیده در کنار رهیافت‌های نظری-تحلیلی در حال حاضر یکی از مهم ترین بخش‌های نقشه راه نظریه سیستم‌های پیچیده به شمارمی‌رود .مدل‌سازی ریاضیاتی مبتنی بر اصول موضوع و اندازه‌گیری‌های تجربی در کنار الگوریتم‌ها و شبیه‌سازی پایه‌های اصلی روش‌شناسی نوین در علوم داده تلقی می‌شوند . علوم داده با الهام مفاهیمی از آمار، نظریه احتمال و بسیاری از کمیت‌های خوش-تعریف دیگر بخش عظیمی از علوم بین رشته‌ای است که از دیرباز در حوزه‌های مختلف علوم کاربرد روز افزونی داشته است. مطالعه سیستم‌های پیچیده یکی از مسائل باز و پر چالش در حوزه‌های مختلف علوم بین رشته‌ای به شمار می‌رود. به منظور تحلیل چنین سیستم‌هایی از ابزارهای نظری- محاسباتی موجود در فیریک آماری، علم شبکه و علوم داده استفاده شده است .این ابزارها در کنار نتایج خوبی که برای شناخت سیستم‌های پیچیده در اختیار ما گذاشته‌اند، دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. تحلیل توپولوژیکی داده شاخه‌ای از توپولوژی محاسباتی است که اخیرا برای مطالعه انواع داده‌ها در ابعاد بالا مورد استفاده قرار گرفته‌است. به طور خلاصه، تحلیل توپولوژیکی داده با عنایت به مفاهیمی از توپولوژی جبری، همچون گروه زنجیره، گروه چرخه، گروه مرز و گروه همولوژی و با تکیه بر عملیات ماتریسی به دنبال استخراج کمیت‌های خوش-تعریفی از داده است که بدون توجه به جزئیات داده، ویژگی‌های سراسری داده را مشخص می‌کنند. بدین منظور، تحلیل توپولوژیکی داده با نگاشت مجموعه داده به فضای توپولوژیکی، ناورداهای توپولوژیکی فضای توپولوژیکی را به عنوان ویژگی‌های سراسری مجموعه داده محاسبه می‌کند. لین ناورداهای توپولوژیکی (ویژگی‌های سراسری) وابسته به بُعد در واقع تعداد زیرفضاهای غیرهمسان‌ریخت از فضای توپولوژیکی هستند به طوری مرز ندارند و مرز نیستند. به هریک از این زیرفضاهای توپولوژیکی حفره (توپولوژیکی) می‌گویند که به طور شهودی یک حفره-0 بُعدی معادل با یک مؤلفه متصل، یک حفره-1 بُعدی معادل با یک حلقه توپولوژیکی، یک حفره-2 بُعدی معادل با یک تهی‌جای توپولوژیکی و... است.

با این مقدمه، در شکل زیر مهمترین سرفصل‌های تحقیق دراین بخش آمده است.

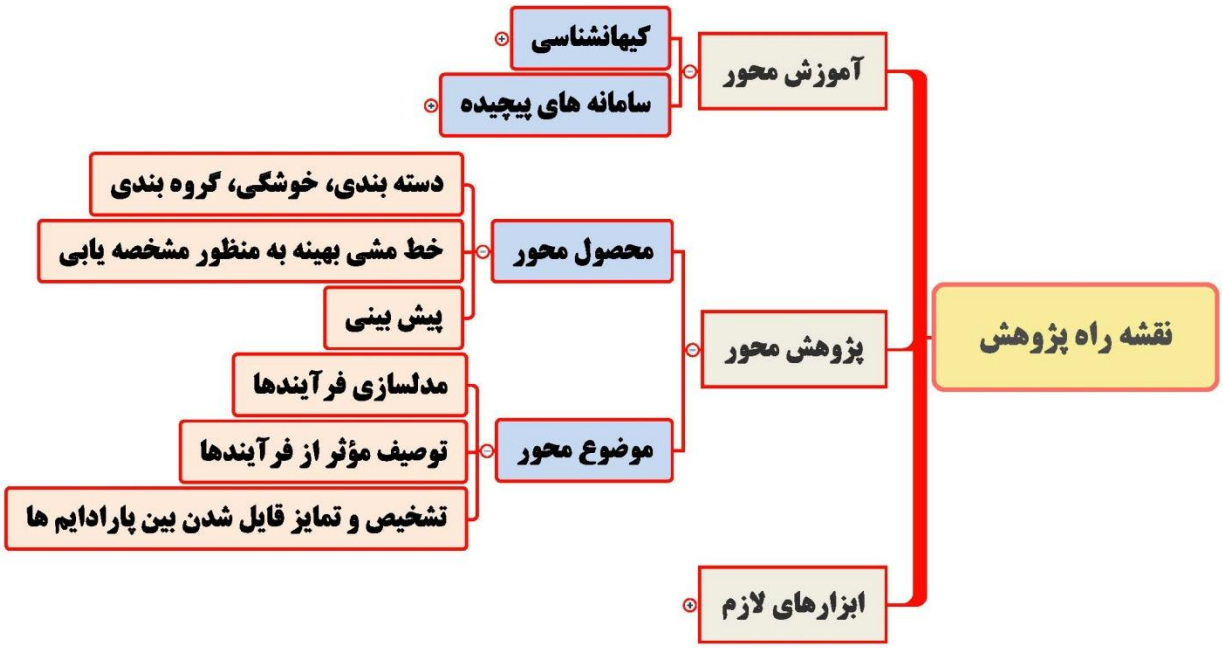
شکل ۸: برخی از مهمترین موضوعات تحقیق در بخش سامانه‌های پیچیده

برخی از سرفصل‌های تحقیق و پژوهش در بخش سامانه‌های پیچیده در شکل ۹ آمده است.



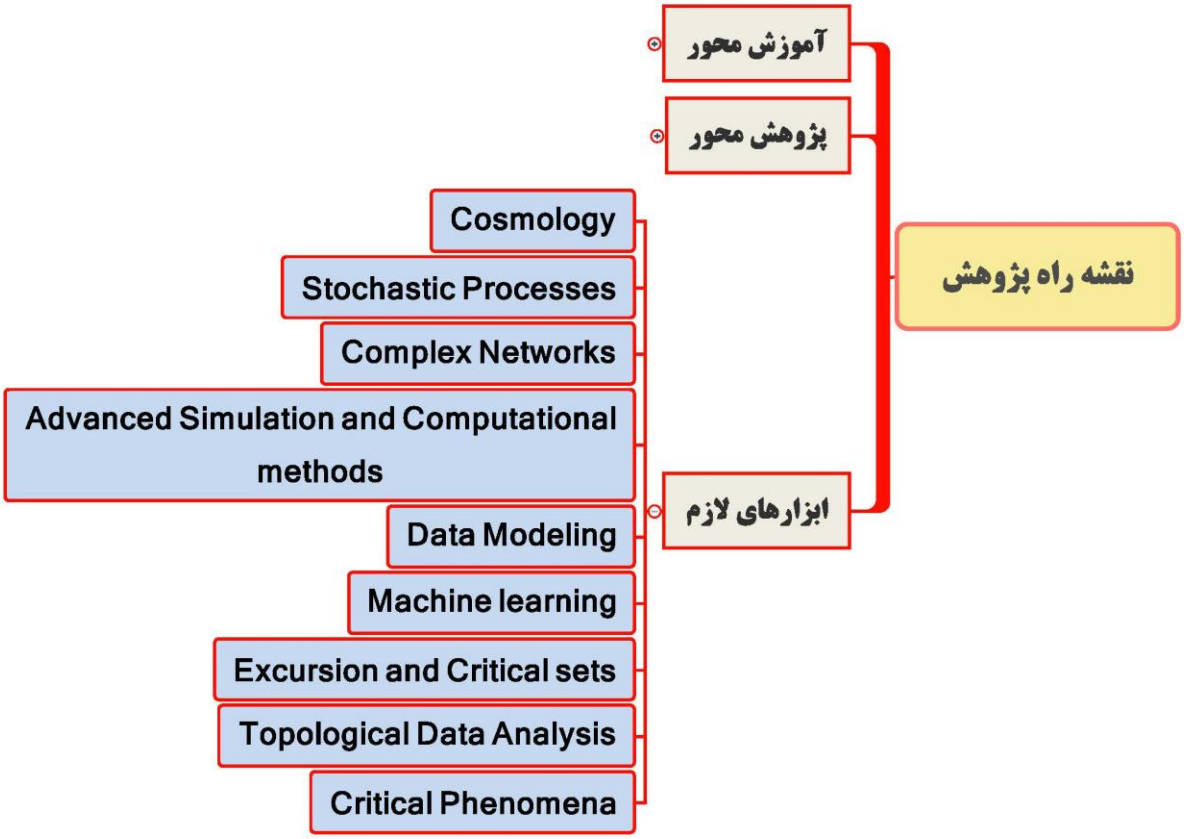
شکل ۹: برخی از مهمترین موضوعات تحقیق در بخش سامانه‌های پیچیده

لازم به ذکر است که دو نوع رویکرد در بخش پژوهش می‌توان در نظر گرفت. در رویکرد محصول‌محور، یک هدف برای دستیابی به یک محصول و نتیجه در نظر می‌گیریم و تلاش می‌کنیم ان ارا تولید کنیم. در بخش موضوع‌محور تلاش می‌کنیم روش و ابزاری برای تحلیل بسازیم و توانایی ان را برای بررسی و ارزیابی یک موضوع بکار ببندیم.



شکل ۱۰: رویکرد محصول‌محور و موضوع‌محور در انتخاب موضوع پژوهشی

برای هر یک از موضوعات فوق به طور کلی می‌توان نیاز به دانش و ابزارهایی که در شکل ۱۱ نشان داده‌شده، است. البته واضح است که برخی ابزارها برای برخی از موضوعات در اولویت قرار می‌گیرند.



شکل ۱۰: برخی از مهمترین ابزارهای لازم برای تحقیق و پژوهش در گروه علمی من

این مجموعه در برگیرنده نظام موضوعات است. نظام مسایل بر اساس اولویت‌های مورد نظر در مجموعه‌ای دیگر تدوین شده‌است.

مهمترین منابع مورد استفاده (۱)

Stochastic fields and Topology

Books, Papers and Lectures:

- M. Reza Rahimi Tabar, Analysis and Data-Based Reconstruction of Complex Nonlinear Dynamical Systems, Using the Methods of Stochastic Processes, Springer, 2019.
- Rudolf Friedrich, Joachim Peinke, Muhammad Sahimi, M. Reza Rahimi Tabar, Physics Reports 506 (2011) 87–162
- Risken, Hannes, Frank, Till , The Fokker-Planck Equation Methods of Solution and Applications, Springer 1996.
- The Geometry of Random Fields, Robert J Adler, 1981
- Random Fields and Geometry, Adler, R. J., Taylor, Jonathan E., Springer 2007
- Topological Complexity of Smooth Random Functions, Adler, Robert, Taylor, Jonathan E., Springer 2009.
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/attachments/stochastic_field_zanjan_95_final.pdf
- Persistent Homology of Weighted Visibility Graph from Fractional Gaussian Noise, H Masoomy, B Askari, MN Najafi, SMSM, arXiv:2101.03328.
- SMSM, M Bahraminasr, Bias factor in anisotropic stochastic fields, Iranian Journal of Physics Research 19 (4), 803-814 (1398).
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/

مهمترین منابع مورد استفاده (۲)

Cosmology

Papers and Lectures:

- Takahiko Matsubara, STATISTICS OF SMOOTHED COSMIC FIELDS IN PERTURBATION THEORY. I. FORMULATION AND USEFUL FORMULAE IN SECOND-ORDER PERTURBATION THEORY, The Astrophysical Journal, 584:1–33, 2003.
- Bardeen J. M., Bond J. R., Kaiser N., Szalay A. S., 1986, Astro- phys. J., 304, 15
- A. Vafaei Sadr & SMSM, Clustering of Local Extrema in Planck CMB maps, MNRAS, 2021, arXiv: 2003.07364.
- I. Eghdami, H. Panahi, SMSM, Multifractal Analysis of Pulsar Timing Residuals: Assessment of Gravitational Waves Detection", The Astrophysical Journal, Volume 864, Number 2, 2018
- A. Vafaei Sadr, M. Farhang, SMSM, B. Bassett, M. Kunz, "Cosmic String Detection with Tree-Based Machine Learning ", MNRAS, 478.1 (2018): 1132-1140
- A. Vafaei Sadr, SMSM, M. Farhang, C. Ringeval, F. R. Bouchet, "Multi-Scale Pipeline for the Search of String-Induced CMB Anisotropies", MNRAS, 475 (1), 1010-1022 (2017).
- SMSM, B. Javanmardi and Ravi K. Sheth, "Peak-Peak correlations in the cosmic background radiation from cosmic strings", MNRAS, Volume 434, Issue 4, 01 October 2013, Pages 3597–3605, 2013.
- M Yousefzadeh, SMSM, Evolution of the generalized multifrcatal dimension of dark matter density field in the Illustris simulation, Iranian Journal of Physics Research 20 (3), 547-556, (1399).
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/

مهمترین منابع مورد استفاده (۳)
کارگاه ها و سخنرانی های مرتبط

- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/index.php/talks-a-presentations/131-workshop-on-observational-data-analysis-in-cosmology-kurdistan-1398
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/index.php/talks-a-presentations/124-my-general-talk-at-annual-physics-conference-of-iran-1398
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/index.php/talks-a-presentations/128-my-talk-at-challenges-in-high-frequency-gw-workshop-ictp-trieste-italy-2019
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/index.php/talks-a-presentations/107-camb-workshop
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/index.php/talks-a-presentations/102-my-talk-at-cosmology-meeting-ipm-96
- http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed/

سیدمحمدصادق موحد

http://facultymembers.sbu.ac.ir/movahed
http://ccg.sbu.ac.ir
http://complexlab.sbu.ac.ir/en/home/

۱۴۰۰/۶/۲۰