ساختار علّی فضـــــازمـــان

مهدیار نوربالا،دانشگاه تهران، دانشکده فیزیک

چکیده

«فضازمان» یکی از بنیادی‌ترین مفاهیم سراسر فیزیک است و در نظریه نســـبیت خاص و عام اینشتین مورد مطالعه قرار می‌گیرد. متأسفانه پیچیدگی‌های ریاضیاتی باعث کنار گذاشـــتن آموزش این مباحـــث در دوران دبیرســـتان می‌شـــود. با این حال برخی از این مفاهیم بدون این پیچیدگی‌ها قابل بیان هستند. در این مقاله به معرفی «ساختار علّی فضازمان» می‌پردازیم و مثال‌هایی از سیاه‌چاله‌ها و کیهان را به عنوان کاربردی برای درک بهتر این پدیده‌ها ارائه می‌کنیم.

کلیدواژه‌هـــا: فضازمان، نســـبیت عام، نســـبیت خاص، جهانخط

۱. مقدمه

نظریه نسبیت عام اینشـــتین دربارهٔ ویژگی‌های فضازمان سخن می‌گوید؛ مثلاً مدعی خمیدگی فضازمان درحضور جرم است. بنابراین شناخت مفهوم فضازمان و ویژگی‌های آن برای فهم این نظریه ضروری اســـت. اما توصیف خمیدگی نیاز به معرفی مفاهیم ریاضی نســـبتاً پیچیده‌ای دارد. در عوض من در این مقاله ســـعی می‌کنم خواننـــده را (که وانمود می‌کنم دانش‌آموزی است با دانش معمول دبیرستانی، اما علاقه‌مند و دقیق) با یک ویژگی ســـاده‌تر فضازمان، یعنی ساختار علّی آن، آشنا کنم، بدون اینکه دربارهٔ خمیدگی آن صحبت کنم. خواهیم دید که بسیاری از مفاهیم اساسی نسبیت عام با فهم ساختار علی قابل درک می‌شوند.

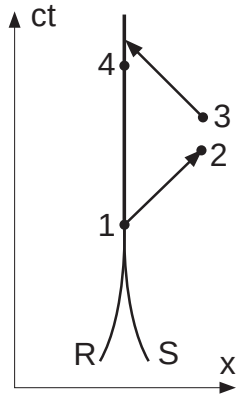
۲. یک مثال ساده: فضازمان تخت

به مجموعه همه رویدادهایی که ممکن اســـت در جهان رخ دهند فضازمان گفته می‌شود. هر رویداد با مکانش (x) و زمانش (t) معین می‌شـــود. بنابراین از یـــک محور افقی (مکان) و یک محور عمودی (زمان) اســـتفاده می‌شود. (در دنیای واقعی باید از ۳ محور مکانی اســـتفاده کرد، ولی ما برای سادگی ترسیم‌ها فضای یک بعـــدی را در نظر می‌گیریم.) به دلیلی که به زودی روشن می‌شود، مرسوم است محور عمودی به جای t مقدار ct را نشان دهد، که C سرعت نور است. شکل ۱ یک فضازمان ساده را به همراه چند رویداد شاهنامه نمایش می‌دهد.

هر موجود/ جســـم/ ذره با گذر زمان رویدادهای متعددی را تجربـــه می‌کند. مجموعه همه این رویدادها را که یک خم در فضازمان می‌سازند، جهانخط آن موجود/ جسم/ ذره می‌نامند. مثلاً در شکل ۱ بخشی از جهانخط رستم و سهراب رسم شده است. سعی کنید خود را متقاعد کنید که اگر ذره‌ای با سرعت نور حرکت کند جهانخط آن خطی اریب است با زاویهٔ ۴۵ درجه با محورها. مثلاً در روایت شـــکل ۱ از داســـتان، پیک رستم با سرعتی نزدیک به نور به دنبال نوشدارو رفته اما سرانجام تعلل کیکاووس موجب مرگ سهراب شده است.

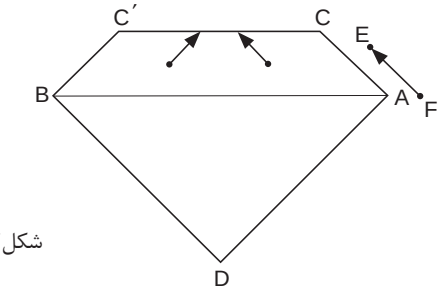
اگر بخواهیم همه رویدادهای عالم را در فضازمان شکل ۱ نشان دهیم، به کاغذی با ابعـــاد بی‌نهایت نیاز داریم. حالا می‌خواهم راهی نشان دهم که با فشرده کردن شکل بتوانیم آن را در یک تکه متناهی کاغذ جای دهیـــم، بدون اینکه رویدادی را حذف کنیم. طبعاً شکل جدید فاصله‌های مکانی و زمانی بین رویدادها را به درستی نمایش نخواهد داد، پس احتمالاً هر ویژگی هندسی فضازمان، از جمله خمیدگی آن را، اشـــتباه نشان می‌دهد. اما همان‌طور که قبلاً گفتم خمیدگی برایمان مهم نیست، در عوض خود را به دو قاعده زیر ملزم می‌کنیم:

- قاعده۱: نمودار جدید کراندار باشد، یعنی به تمامی در یک قطعه متناهی از صفحه کاغذ جا شود.
- قاعده۲: در نمودار جدید جهانخط ذراتی که با سرعت نور حرکت می‌کنند باید همچنان خطوط اریب با زاویه ۴۵ درجه باشند.

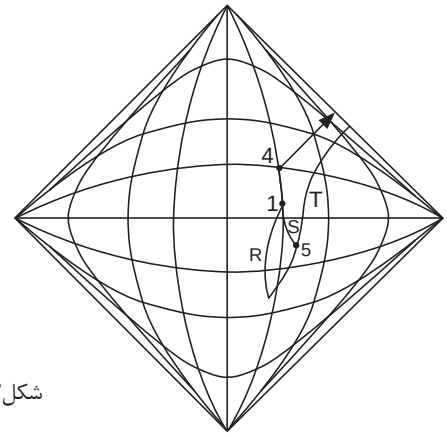


▲ شـــکل ۱: چند رویداد داستان رستم و ســـهراب در شاهنامه:۱. زخمی شدن سهراب، ۲: رسیدن پیک به کیکاووس، ۳: فرستادن نوشدارو، ۴: مرگ سهراب. R و S به ترتیب جهانخط رستم و سهراب را نشان می‌دهند.

در شـــکل ۲ مراحل ســـاخت نمودار جدید نشان داده شده اســـت. اجازه دهید توضیح دهم. ابتدا محور x در شکل ۱ را در نظر بگیرید. این محور مجموعه همه رویدادهایی است که در زمان $t=0$ رخ داده‌اند. از آنجا که می‌خواهیم نمودار جدید کراندار باشـــد (قاعده۱)، همه این رویدادها را با یک پاره‌خط افقی، AB ، نمایش می‌دهیـــم. دقت کنید که فاصله‌ها روی AB با فاصله‌های واقعی یکی نیســـتند؛ در واقع A در مکان $+\infty$ روی داده و B در مـــکان $-\infty$. حالا جهانخط نوری که از A به سمت چپ حرکت می‌کند را با AC نشان می‌دهیم. بنابر قاعده ۲ شیب AC باید ۴۵ درجه باشد و بنابر قاعده ۱، AC نبایـــد تا بی‌نهایت امتداد یابد، پس روی نمودار جدید C یک نقطه در فاصله متناهی از A است. اکنون نشان می‌دهیم AC بخشـــی از مرز نمودار جدید است، یعنی هیچ رویدادی خـــارج آن وجود ندارد. اگر رویدادی مثل E خارج از این مرز واقع شـــده باشـــد، آنگاه حتماً پرتوی نوری وجود دارد که از راست تابیده شـــده و به E می‌رسد (مثل FE)؛ اما وجود F با بی‌نهایت بودن C در تناقض است. به‌طور مشابه پرتوی نوری که از B به سمت راست تابیده می‌شود مرز دیگری از نمودار را می‌سازد که نقطه انتهایی‌اش C' است. حال نشان می‌دهیم $C'=C$ اگر این‌طور نباشـــد، نمودار باید مـــرز دیگری در بالا داشته باشد که C را به C' وصل کند. در آن صورت دو رویداد مثل G و H وجود دارند که پرتوهای نور گسیل‌شـــده از آن‌ها هرگز همدیگر را قطع نخواهند کرد. این چیزی است که برای هیچ دو رویدادی در نمودار شکل ۱ رخ نمی‌دهد؛ بنابراین به تناقض رسیده‌ایم و ادعای ما مبنی بر $C'=C$ ثابت می‌شود.



شکل ۲



شکل ۳

▲ ۲. در اینجا از این ویژگی نمودار پنروز استفاده کرده‌ایم که فاصله‌های زمانی و مکانی درون آن متناهی، و در نزدیک مرزهای ناتکین آن نامتناهی هستند. این پیامد مستقیم فشرده‌سازی فضازمان روی تکه‌ای متناهی کاغذ است.
۳: نمودار پنروز فضازمان تخت. خط‌های ثابت=t و ثابت=x شکل ۱ در این جا به ترتیب معادل خم‌های افقی و عمودی هستند. جهانخط تهمینه با T نشان داده شده.

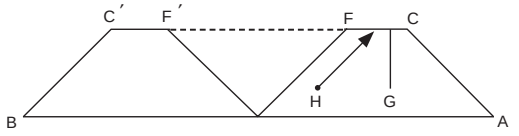
دو مرز دیگر هم، یکی DA و DB، از پرتوهایی که از گذشته به A و B می‌رسند تشکیل می‌شوند. سعی کنید خود را قانع کنید که چهارضلعی ACBD تنها شکلی است که قواعد ۱ و ۲ را برآورده می‌کند. مثلاً به این پرسش‌ها فکر کنید:

۱. در شـــکل ۱ از هر رویداد می‌توان پرتوهایی به راســـت و چپ ارسال کرد، اما در شکل ۲ نمی‌توان پرتویی از A به راست تاباند؛ آیا بعضی رویدادها را حذف کرده‌ایم؟ [راهنمایی: هیچ رویدادی بـــا مکانی برابر با ∞ نداریم؛ اصلاً ∞ عدد نیســـت. نتیجه مهم: مرزها جزء فضازمان نیستند.]

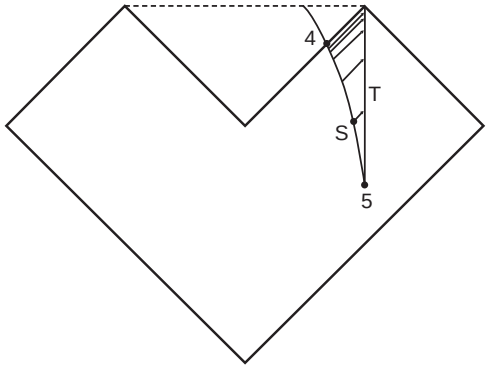
۲. اگـــر به جای خـــط افقی AB از یک منحنی شـــبیه $\sim$ استفاده می‌کردیم شکل نهایی باز هم لوزی می‌بود؟

نمودار جدید **نمودار پنروز**[1] مربوط به فضازمان شـــکل ۱ خوانده می‌شـــود. می‌گوییم نمودار پنروز **ســـاختار علّی** فضازمان را نشـــان می‌دهد، زیرا رابطه‌هـــای علت و معلولی محدود به سرعت نور هســـتند و ارتباط میان جهانخط‌های نـــور دقیقاً همان ویژگی از فضازمان اســـت که طبق قاعده ۲ در نمودار پنروز حفظ می‌شـــود. دقت کنید که شکل ۱ و ۳ هر دو فضازمان یکسانی را نمایش می‌دهند (که فضازمان تخت نام دارد)، یکی با محورهای معمولی ct و x، یکی با نمودار پنروز.

به یاد داشـــته باشـــید که نمودار پنروز را از فشرده ساختن نمودار اولیه فضازمان به دســـت آوردیم. بنابراین به رغم ظاهر متناهی‌شان، نقاط A و B معرف مکان مثبت و منفی بی‌نهایت، و نقاط C و D معرف زمان بی‌نهایت در آینده و گذشته هستند. مثلاً تمام رویدادهایی را که در زمان آینده دور اتفاق افتاده‌اند در همسایگی C نشانده‌ایم. در واقع می‌توان نشان داد که جهانخط همه ذراتی (به جز نور) که بدون شـــتاب حرکت می‌کنند از D آغاز و به C ختم می‌شود. جهانخط ذرات شتابدار ممکن است به C ختم بشـــود یا نشـــود. مثلاً در روایتی از شاهنامه که در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است، تهمینه با چنان شتابی از سهراب جدا شده بوده که هرگز از مرگ فرزندش آگاه نمی‌شد. این را می‌توان از شکل ۳ به سادگی فهمید، زیرا جهانخط پیام مرگ سهراب (ســـیگنال رادیویی‌ای که با سرعت نور به سوی تلفن همراه تهمینه ارسال شده بوده) هیچ‌گاه جهانخط تهمینه را قطع نکرده است.



شکل ۴



شکل ۵

۳. سیاهچاله

تا اینجا دربارهٔ فضازمانی بسیار ساده صحبت کرده‌ایم. اما فضازمان‌های پیچیده‌تری هم وجود دارند. مثلاً اگر رویدادهای داستان شاهنامه در کنار یک سیاهچاله اتفاق می‌افتادند، باید آن‌ها را در نموداری متفاوت از اشکال ۱ تا ۳ می‌نشاندیم. اگر از معادله‌های اینشتین استفاده کنیم می‌توانیم فضازمان مربوط به سیاهچاله را، با همه ویژگی‌های هندسی و علی‌اش، به دست آوریم. اما این کار مستلزم ریاضیات پیچیده‌ای است که از حوصله این مقاله خارج است. با این همه، اگر این دو ویژگی فضازمان سیاه‌چاله‌ها را بدون اثبات بپذیریم می‌توانیم ساختار علی آن را به دست بیاوریم:

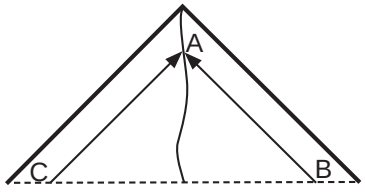
۱. در مرکز سیاه‌چاله جایی به نام **تکینگی** وجود دارد که در آن خمیدگی فضازمان بی‌کران است و اگر ذره‌ای به آنجا برسد زمان برایش تمام می‌شود.

۲. ناحیه‌ای در اطراف تکینگی وجود دارد که هیچ چیز نمی‌تواند از آن خارج شود. مرز این ناحیه **افق** نام دارد.

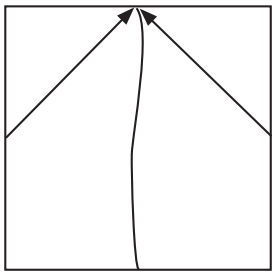
شکل ۴ مراحل ساخت نمودار پنروز برای سیاهچاله را نشان می‌دهد. خطوط AB، AC، BC' با همان استدلال‌های قبل رسم می‌شوند. اما استدلالی که منجر به C'=C می‌شد متکی بر ویژگی‌های نمودار شکل ۱ بود و حالا که فضازمان جدیدی داریم دیگر معتبر نیست. پس فعلاً فرضی در این باره نمی‌کنیم. بگذارید کمی دقیق‌تر نگاه کنیم. سیاهچاله مورد نظر من ازلی نیست، بلکه از رمبش (فروپاشی) یک ستاره به وجود آمده است؛ بنابراین افق آن در زمانی مشخص شکل گرفته است. این زمان را همان t=۰ در نظر می‌گیریم که متناظر با پاره‌خط AB است. به عبارت دیگر بر روی AB دقیقاً یک نقطه چون E وجود دارد که ذره موجود در آن به دام افتاده و امکان فرار از تکینگی را ندارد (E را دقیقاً وسط AB گرفته‌ام چون انتخاب فاصله‌ها در نمودار پنروز کاملاً دلخواه است). ناحیه به دام‌افتاده با پرتوهای نور راست‌رو و چپ‌روی گسیل از E (به ترتیب EF و EF') محصور می‌شود، زیرا این‌ها دورترین جاهایی را مشخص می‌کنند که ذره به دام افتاده می‌تواند برود. از آنجا که افتادن در تکینگی آینده اجتناب‌ناپذیر ذره است، موقعیت تکینگی در نمودار پنروز باید با خط FF' مشخص شود (برای تمایز با سایر مرزهای نمودار، تکینگی را با خط‌چین نشان می‌دهیم)[۲]. EF و EF' هم جهانخط افق را نشان می‌دهند.

اکنون نشان می‌دهیم F=C و F'=C' اگر این‌گونه نباشد، جهانخطی مانند G در شکل ۴ وجود دارد که ذره‌ای را توصیف می‌کند که هیچ‌گاه از رویدادی چون H خبردار نمی‌شود، در حالی که G و H هر دو بیرون افق هستند و انتظار داریم ناظرهای بیرون افق بالاخره روزی از همه رویدادهای بیرون افق خبردار شوند. این تناقض نشان می‌دهد F=C و F'=C' بدین ترتیب نیمه بالایی نمودار پنروز مطابق شکل به دست می‌آید. جالب است که تمام رویدادهای بیرون سیاهچاله که در آینده دوردست رخ می‌دهند در همسایگی فقط یک نقطه (C برای سمت راست سیاهچاله، و C' برای سمت چپ آن) گنجانده شده‌اند، اما مرکز سیاهچاله با بی‌نهایت نقطه روی پاره‌خط FF' مشخص می‌شود. به دست آوردن نیمه پایینی نمودار سرراست است و آن را به خواننده واگذار می‌کنم. نتیجه نهایی در شکل ۵ نمایش داده شده است.

شکل ۵ همچنین یک روایت دیگر از شاهنامه را در حضور سیاهچاله نشان می‌دهد. در این روایت تهمینه و سهراب خارج از افق از هم جدا می‌شوند؛ تهمینه به دوردست‌ها سفر می‌کند و سهراب در جست‌وجوی رستم رهسپار سیاهچاله می‌شود. از قضا رویداد مرگ سهراب دقیقاً روی افق رخ می‌دهد. همه وقایع بین ملاقات رستم و سهراب و مرگ سهراب از نظر خود آن دو در زمانی متناهی روی می‌دهند. اما تهمینه چه می‌بیند؟ به نمودار نگاه کنید و به سیگنال‌های رادیویی تصاویر زنده‌ای که سهراب برای مادرش ارسال می‌کرده دقت کنید. تهمینه این سیگنال‌ها را در زمانی نامتناهی دریافت می‌کند.[۳] به عبارت دیگر تهمینه حتی اگر بی‌نهایت سال عمر کند، هرگز از مرگ سهراب باخبر نخواهد شد؛ مانند یک داستان با پایان باز، همیشه منتظر خواهد ماند شاید روزی ببیند که نوشدارو به سهراب رسیده؛ و در یک رنج بی‌پایان صحنه بی‌نهایت آهسته آخرین لحظات عمر فرزندش را تا ابد به تماشا می‌نشیند.



شکل ۶



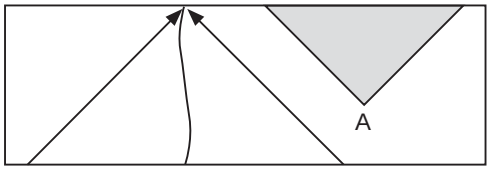
شکل ۷

۴. کیهان

در این بخش پایانی ساختار علّی سه مدل کیهان‌شناسی را مرور می‌کنیم. متأسفانه در این فرصت نمی‌توانم توضیح بدهم که چرا این نمودارها به این صورت هستند؛ بنابراین از خواننده می‌خواهم آن‌ها را پذیرفته و فقط به پیامدهایشان بیندیشد. شکل ۶ نمودار پنروز عالم منبسط شونده‌ای را که از تکینگی مهبانگ پدید آمده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید یک ناظر نوعی، مثل آنکه جهانخط آن در شکل رسم شده، در یک زمان مشخص مثل A، فقط بعضی از رویدادها را می‌بیند (آن‌هایی که بین دو پرتوی BA و CA قرار دارند). اما با گذشت زمان بالاخره ناظر از همه رویدادهای عالم خبردار می‌شود.

شکل ۷ عالمی را نشان می‌دهد که انبساط شتابدار دارد و از مهبانگ آغاز نشده. باز هم ناظر در یک زمان مشخص فقط بعضی رویدادها را می‌بیند. اما تفاوت عمده، که به علت شتابدار بودن انبساط رخ داده، این است که بعضی رویدادها را هیچ‌گاه نخواهد دید. (این ویژگی به وجود یا عدم وجود مهبانگ ارتباطی ندارد؛ اگر دوست دارید مرز پایینی را خط‌چینی کنید تا تکینگی مهبانگ داشته باشید).

سرانجام شکل ۸ را داریم که در آن بخشی از عالم (ناحیه تیره) دستخوش یک گذار فاز شده است. این گذار از رویداد A شروع شده و ناحیه‌ای را که مرزهایش با سرعت نور بزرگ شده‌اند تغییر داده است، به‌طوری که بعضی پارامترهای فیزیک ذرات (مثلاً جرم پروتون) در ناحیه تیره با ناحیه روشن فرق دارد. در نتیجه ساختار اتم‌ها، و در پی آن شیمی، در ناحیه تیره و روشن متفاوت هستند. از نظر کسی که در یکی از این نواحی زندگی می‌کند، دیگری در دنیایی با قوانینی کاملاً متفاوت به سر می‌برد. جالب‌تر آنکه کسی که در ناحیه روشن زندگی می‌کند به کلی از وجود دنیای تیره بی‌خبر است. این مدلی شگفت‌انگیز از جهان است؛ شگفت‌انگیزتر اینکه ممکن است همین مدل توصیفگر عالم واقعی باشد که ما در آن زندگی می‌کنیم.



▲ شکل ۸: کیهانی با دو فاز تیره و روشن. یک ناظر ناحیه روشن به همراه پرتوهای مرزی افق آن نشان داده شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

من سعی کردم نشان دهم می‌توان ساختار علی فضازمان را به زبانی قابل فهم برای دانش‌آموزان بیان کرد. ملاحظه شد که این ابزار به ما در شناخت نحوه حرکت نور، و در پی آن پدیده‌های علّی، کمک شایانی می‌کند و با برخی مثال‌های مشهور و پیامدهای آن آشنا شدیم. با این همه نباید انتظار داشت دانش‌آموز علاقه‌مند و دقیق بدون ابهام و پرسش بماند. طبعاً تأمل بیشتر به روشن شدن خیلی از نکته‌ها کمک خواهد کرد، اما باید به دانش‌آموزان گوشزد کرد که آموختن دقیق این مباحث نیاز به مطالعه منابع جدی‌تر خواهد داشت. بنابراین می‌توان امیدوار بود ارائه این گونه مطالب نقطه شروعی باشد برای ایجاد انگیزه و اشتیاق در علاقه‌مندان و راهنمایی آن‌ها به مطالعات پیشرفته‌تر.

پی‌نوشت‌ها

۱. Penrose diagram

۲. خواننده‌ای که عمیقاً متوجه مطلب شده باشد خواهد دریافت که می‌توان 'FF را خمیده یا اریب کشید، به شرطی که زاویه‌اش با محور افقی بیش از ۴۵ درجه نشود. در واقع در نمودار پنروز تنها چیزی که اصالت دارد کمتر، بیشتر، یا مساوی ۴۵ درجه بودن شیب خطوط است نه مقدار دقیق شیب‌ها.

۳. در این‌جا از این ویژگی نمودار پنروز استفاده کرده‌ایم که فاصله‌های زمانی و مکانی درون آن متناهی، و در نزدیک مرزهای ناتکین آن نامتناهی هستند. این پیامد مستقیم فشرده‌سازی فضازمان روی تکه‌ای کاغذ متناهی است.