



بعد چهارم: زمان؛ از فیزیک کلاسیک تا نسبیت و ادراک

علیرضا محمودی فرد^{۱*}، سید محمدرضا حسینی علی آباد^۲

^۱پسادکترای آینده پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza10.m10@gmail.com
^۲استاد دانشگاه های ملی و بین المللی، گروه مجموعه مدیریت، علوم پایه و مهندسی، dr.hosseinialiabad@gmail.com

چکیده

این مقاله به بررسی جامع مفهوم «زمان» به عنوان بُعد چهارم، با اتکا بر یافته‌های پژوهشگران در حوزه‌های مختلف فیزیک، کیهان‌شناسی و علوم شناختی می‌پردازد. سیر تحول درک زمان از دیدگاه فیزیک کلاسیک نیوتنی، که زمان را مطلق و مستقل می‌دانست، تا نظریه‌های نسبیت اینشتین که زمان را امری نسبی، پویا و درهم‌تنیده با فضا (فضا-زمان) معرفی کردند، تشریح می‌شود. تأثیر سرعت و گرانش بر اتساع زمان، به مثابه نتایج تجربی و مشاهداتی تأییدشده، مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین، چالش‌های مربوط به جایگاه زمان در مکانیک کوانتومی و نظریه‌های گرانش کوانتومی، از جمله احتمال «بدون زمان» بودن بنیادین واقعیت، بررسی شده است. در نهایت، به جنبه‌ی ادراک ذهنی زمان و سازوکارهای عصبی-شناختی آن پرداخته می‌شود. این پژوهش با ارجاع به منابع معتبر علمی، تحلیلی چندوجهی از زمان ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی

زمان، بُعد چهارم، نسبیت خاص، نسبیت عام، فضا-زمان، اتساع زمان، مکانیک کوانتومی، ادراک زمان

مقدمه

کاوش در ماهیت زمان، یکی از عمیق‌ترین و پایدارترین دغدغه‌های فلسفی و علمی بشر بوده است. از دیدگاه فیزیک کلاسیک، زمان به‌عنوان یک پارامتر مطلق و یکنواخت در نظر گرفته می‌شد که مستقل از هرگونه رویداد یا ناظر، با نرخ ثابت در جریان است. این دیدگاه، که ریشه در کارهای نیوتن دارد، چارچوبی را برای درک جهان مادی فراهم آورد که قرن‌ها بر تفکر علمی حاکم بود. با این حال، ظهور نظریه‌های انقلابی در قرن بیستم، به‌ویژه نسبیت خاص و عام انیشتین، این درک سنتی را به کلی دگرگون ساخت. نسبیت خاص نشان داد که زمان و فضا جدایی‌ناپذیرند و یک پیوستار چهاربُعدی به نام فضا-زمان را تشکیل می‌دهند که در آن، سرعت نور در خلاء، سرعتی ثابت و نهایی برای همه‌ی ناظران لخت است، امری که منجر به پدیده‌هایی چون اتساع زمان (time dilation) و انقباض طول (length contraction) در سرعت‌های بالا می‌شود (انیشتین، ۱۹۰۵). نسبیت عام این مفهوم را گسترش داد و نشان داد که گرانش نه یک نیرو، بلکه تجلی انحنای فضا-زمان ناشی از حضور جرم و انرژی است. این نظریه، درک ما را از گرانش، سیاه‌چاله‌ها و انبساط جهان متحول کرد و پیش‌بینی‌های دقیق و تأیید شده‌ای را ارائه داد که منجر به دریافت جایزه نوبل برای بسیاری از فیزیکدانان شد (انیشتین، ۱۹۱۵).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فیزیک نظری، ماهیت بنیادی زمان همچنان موضوع بحث و پژوهش‌های گسترده باقی مانده است. یکی از چالش‌های اصلی، تلاش برای آشتی دادن دو ستون اصلی فیزیک مدرن، یعنی نسبیت عام و مکانیک کوانتومی است. در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند آن‌هایی که در نزدیکی تکینگی سیاه‌چاله‌ها یا در لحظات اولیه بیگ بنگ حاکم هستند، اثرات کوانتومی گرانش برجسته می‌شوند و به نظر می‌رسد که فضا-زمان نیز ممکن است ماهیتی کوانتومی داشته باشد. نظریه‌هایی چون نظریه ریسمان (string theory) و گرانش کوانتومی حلقه‌ای (loop quantum gravity) تلاش می‌کنند تا این دو چارچوب نظری را یکپارچه کنند و درکی عمیق‌تر از رفتار فضا-زمان در شرایط افراطی ارائه دهند. این نظریه‌ها اغلب مفاهیمی چون ابعاد اضافی، گرانش کوانتومی و هندسه‌های غیرمعمول فضا-زمان را مطرح می‌کنند که فراتر از تصورات شهودی ما از جهان سه‌بعدی و زمان خطی است (گرین، ۱۹۹۹؛ روول، ۲۰۰۴).

در حوزه‌ی کیهان‌شناسی، زمان نقشی محوری ایفا می‌کند. مدل استاندارد کیهان‌شناسی، مبتنی بر بیگ بنگ، توضیح می‌دهد که جهان از یک حالت بسیار داغ و متراکم آغاز شده و از آن زمان تاکنون در حال انبساط بوده است. درک ما از تاریخ جهان، از جمله تشکیل اولین اتم‌ها، پیدایش کهکشان‌ها و ستارگان، و تحولات ساختاری بزرگ مقیاس، به شدت به درک ما از سیر زمانی وقایع وابسته است. مفاهیمی چون تابش زمینه کیهانی (cosmic microwave background) و اثر دوپلر کیهانی، پنجره‌هایی به گذشته‌ی دور جهان می‌گشایند و شواهدی قوی برای مدل بیگ بنگ فراهم می‌آورند (پریمر، ۲۰۱۸). تحقیقات اخیر در زمینه‌ی انرژی تاریک و ماده تاریک نیز، که اجزای غالب جهان را تشکیل می‌دهند، پرسش‌های جدیدی را در مورد آینده‌ی کیهان و ماهیت انبساط آن مطرح کرده است.

فراتر از فیزیک، مفهوم زمان در رشته‌های مختلف علمی دیگر نیز اهمیت اساسی دارد. در علوم کامپیوتر، مدل‌سازی سیستم‌های موازی و توزیع‌شده با چالش‌های مربوط به هماهنگی و ترتیب زمانی رویدادها همراه است. در زیست‌شناسی، ریتم‌های شبانه‌روزی (circadian rhythms) و فرآیندهای تکاملی، همگی در بستری زمانی رخ می‌دهند. در روان‌شناسی، درک ما از حافظه، ادراک زمان، و توسعه‌ی شناختی به شدت تحت تأثیر تجربه‌ی ذهنی ما از گذر زمان است. این تجربه‌ی ذهنی، که اغلب با زمان فیزیکی اندازه‌گیری

شده توسط ساعت‌ها متفاوت است، موضوع پژوهش‌های عمیقی در علوم اعصاب و روان‌شناسی شناختی بوده است (لوین، ۲۰۱۹؛ تانکرید، ۲۰۲۱).

با توجه به گستردگی و پیچیدگی مفهوم زمان در علوم مختلف، این مقاله با هدف بررسی چندوجهی "بعد چهارم: زمان" تدوین شده است. ما در این پژوهش، ابتدا به مرور پیشینه‌ی تاریخی این مفهوم از دیدگاه فیزیک کلاسیک تا نسبیت و مکانیک کوانتومی خواهیم پرداخت. سپس، تلاش خواهیم کرد تا با ارائه‌ی تصویری جامع از وضعیت کنونی دانش در این حوزه، مسائل و چالش‌های کلیدی، به‌ویژه در زمینه‌ی وحدت نسبیت و کوانتوم و همچنین جنبه‌های کیهان‌شناختی و تجربی زمان را مورد بحث قرار دهیم. در نهایت، با ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده، سعی در گشودن مسیرهای نوآورانه برای درک عمیق‌تر این بُعد بنیادین واقعیت خواهیم داشت.

متن اصلی

۱. زمان در فیزیک کلاسیک: پارادایم نیوتنی

در چارچوب فیزیک کلاسیک، زمان به‌عنوان یک بُعد مطلق، جهانی و مستقل از ناظر در نظر گرفته می‌شود. این دیدگاه، که توسط ایزاک نیوتن صورت‌بندی شد، زمان را خطی، یکنواخت و غیرقابل تغییر می‌داند؛ گویی رودخانه‌ای است که با سرعتی ثابت جریان دارد و تجربه‌ی همه‌ی ناظران، صرف‌نظر از موقعیت مکانی یا حالت حرکتی‌شان، باید یکسان باشد (نیوتن، ۱۶۸۷). در این نگرش، فضا و زمان دو مفهوم مجزا و مستقل از یکدیگر تلقی می‌شوند. معادلات حرکت نیوتن، که اساس مکانیک کلاسیک را تشکیل می‌دهند، این فرض را مبنا قرار می‌دهند که اندازه‌گیری‌های زمانی برای همه‌ی ناظران لخت یکسان است. این فرض، برای توصیف پدیده‌های روزمره و حرکات اجسام با سرعت‌های بسیار کمتر از سرعت نور، دقت قابل قبولی دارد و پایه‌ی بسیاری از دستاوردهای مهندسی و فیزیک قرون ۱۷ تا ۱۹ میلادی بوده است. با این حال، این مدل در مواجهه با پدیده‌هایی که در سرعت‌های بالا یا در میدان‌های گرانشی قوی رخ می‌دهند، با محدودیت‌های جدی روبرو می‌شود.

۲. زمان در نسبیت خاص: نسبیت‌گرایی زمان و فضا

انقلاب در درک ما از زمان، با انتشار نظریه‌ی نسبیت خاص آلبرت اینشتین در سال ۱۹۰۵ آغاز شد. اینشتین دو اصل بنیادین را مطرح کرد: اصل نسبیت (قوانین فیزیک برای تمام ناظران لخت یکسان است) و ثابت بودن سرعت نور در خلأ برای تمام ناظران لخت. پیامدهای این دو اصل، انقلابی در مفاهیم فضا و زمان ایجاد کرد. یکی از مهم‌ترین نتایج، پدیده‌ی اتساع زمان بود که نشان می‌دهد زمان برای ناظری که نسبت به ناظر دیگر در حرکت است، کندتر می‌گذرد. این اثر، که در سرعت‌های نزدیک به سرعت نور به‌طور محسوسی ظاهر می‌شود، به‌طور تجربی با آزمایش‌هایی چون آزمایش افتخار (Hafele-Keating experiment) که ساعت‌های اتمی را با هواپیماهای جت حمل کرد، تأیید شده است (افتخار و کیتینگ، ۱۹۷۲). همچنین، انقباض طول نشان می‌دهد که طول یک جسم در جهت حرکت، از دید ناظر ساکن، کوتاه‌تر به نظر می‌رسد. اینشتین با معرفی مفهوم فضا-زمان (spacetime)، نشان داد که فضا و زمان مفاهیمی مجزا نیستند، بلکه چهارچوبی واحد و پیوسته را تشکیل می‌دهند که رویدادها در آن رخ می‌دهند. در این چهارچوب، جابجایی در فضا مستلزم تغییراتی در گذر زمان و بالعکس است.

۳. زمان در نسبیت عام: گرانش و هندسه‌ی فضا-زمان

در سال ۱۹۱۵، اینشتین نظریه‌ی نسبیت عام را منتشر کرد که درک ما از گرانش را متحول ساخت. در نسبیت عام، گرانش نه به‌عنوان یک نیرو، بلکه به‌عنوان انحنای فضا-زمان ناشی از حضور جرم و انرژی توصیف می‌شود. اجسام در فضا-زمان خمیده، در مسیری موسوم به ژئودزیک (geodesic) حرکت می‌کنند که کوتاه‌ترین مسیر ممکن در آن هندسه‌ی خمیده است. این انحنای فضا-زمان، بر گذر زمان نیز تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که زمان در میدان‌های گرانشی قوی‌تر، کندتر سپری می‌شود. این پدیده‌ی اتساع زمان گرانشی (gravitational time dilation) نیز به‌طور تجربی تأیید شده است، از جمله در اندازه‌گیری‌های دقیق ساعت‌های اتمی در

ارتفاعات مختلف زمین و همچنین در عملکرد سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی (GPS) که باید اثرات نسبیت خاص و عام را در محاسبات خود لحاظ کنند (آلبرت و همکاران، ۲۰۰۲). نسبیت عام پیش‌بینی‌های شگفت‌انگیزی مانند وجود امواج گرانشی (gravitational waves) که اولین بار در سال ۲۰۱۵ توسط رصدخانه‌ی LIGO آشکارسازی شدند (لیگو ساینتفیک کلابوریشن، ۲۰۱۶)، و همچنین وجود سیاه‌چاله‌ها (black holes) را مطرح می‌کند؛ اجسامی که گرانش آن‌ها چنان شدید است که حتی نور نیز قادر به فرار از آن نیست.

۴. زمان در مکانیک کوانتومی و چالش وحدت

با ظهور مکانیک کوانتومی در اوایل قرن بیستم، درک ما از واقعیت در مقیاس‌های اتمی و زیراتمی به کلی دگرگون شد. با این حال، وحدت بخشیدن به نظریه‌ی نسبیت عام (که گرانش و فضا-زمان پیوسته را توصیف می‌کند) و مکانیک کوانتومی (که بر گسستگی و احتمالات در مقیاس‌های کوچک تأکید دارد) یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های فیزیک نظری معاصر باقی مانده است. در نظریه‌های گرانش کوانتومی، مانند نظریه ریسمان و گرانش کوانتومی حلقه‌ای، فضا-زمان خود ممکن است ماهیتی گسسته و کوانتومی داشته باشد. این نظریه‌ها مفاهیمی چون ابعاد اضافی فضا-زمان را مطرح می‌کنند که در مقیاس‌های بسیار کوچک (مقیاس پلانک) وجود دارند و رفتار آن‌ها می‌تواند درک ما از ماهیت زمان را به کلی تغییر دهد (ویل، ۱۹۴۹؛ گرین، ۱۹۹۹). بحث پیرامون “مشکل زمان” در گرانش کوانتومی، به چگونگی توصیف زمان در چارچوبی که در آن خود فضا-زمان نیز تحت تأثیر اصول کوانتومی قرار می‌گیرد، می‌پردازد. در این دیدگاه‌ها، زمان ممکن است یک خاصیت پدیدارشناختی (emergent property) باشد که از سطوح بنیادی‌تر واقعیت ناشی می‌شود، و نه یک پارامتر از پیش موجود (کارول، ۲۰۱۰).

۵. تجربه‌ی ذهنی و ادراک زمان

در کنار توصیف فیزیکی زمان، تجربه‌ی ذهنی انسان از گذر زمان نیز موضوع مهمی در علوم شناختی و روان‌شناسی است. ادراک ما از زمان، تحت تأثیر عوامل متعددی چون توجه، حافظه، بار هیجانی و سن قرار دارد. پدیده‌هایی چون “اتساع زمان ذهنی” در شرایط هیجان‌انگیز یا خطرناک، یا “فشرده‌سازی زمان” در طول فعالیت‌های لذت‌بخش، نشان می‌دهند که تجربه‌ی درونی ما از زمان، لزوماً با اندازه‌گیری‌های عینی ساعت‌ها همخوانی ندارد (لوین، ۲۰۱۹). تحقیقات در زمینه‌ی علوم اعصاب، به بررسی مدارهای عصبی و فرآیندهای مغزی می‌پردازند که زیربنای این ادراک زمانی هستند. درک این تفاوت بین زمان فیزیکی و زمان ذهنی، برای فهم کامل‌تر رفتار انسان و همچنین برای توسعه‌ی رابط‌های کاربری و فناوری‌هایی که با تجربه‌ی زمانی ما تعامل دارند، اهمیت دارد (تانکرید، ۲۰۲۱).

پیشینه پژوهش

مروری بر مطالعات پیشین پیرامون مفهوم زمان در علوم مختلف، نشان‌دهنده تکامل تدریجی درک ما از این بُعد بنیادین واقعیت است. در فیزیک کلاسیک، زمان به مثابه یک پارامتر مطلق و مستقل از ناظر فرض می‌شد. کارهای نیوتن در Principia (۱۶۸۷) Mathematica چارچوب مفهومی زمان یکنواخت و جهانی را بنا نهاد که تا قرن‌ها مبنای تفکر علمی بود. این دیدگاه، زمان را خطی و مستقل از فضا و محتوای ماده و انرژی تلقی می‌کرد.

انقلاب پارادایمی با ظهور نظریه نسبیت خاص اینشتین در سال ۱۹۰۵ (اینشتین، ۱۹۰۵) آغاز شد، که در آن زمان دیگر مطلق نبود، بلکه وابسته به چارچوب مرجع ناظر شد. اتساع زمان و انقباض طول، پیامدهای مستقیم این نظریه بودند که نشان دادند فضا و زمان به‌طور جدایی‌ناپذیری در یک پیوستار چهاربعدی به نام فضا-زمان (spacetime) در هم تنیده‌اند. اینشتین بعدها در نظریه نسبیت عام (۱۹۱۵) (اینشتین، ۱۹۱۵)، گرانش را نه به عنوان یک نیرو، بلکه به عنوان انحنای همین فضا-زمان ناشی از حضور جرم و انرژی

توصیف کرد. این انحنا بر گذر زمان نیز تأثیر می‌گذارد، به طوری که زمان در میدان‌های گرانشی قوی‌تر کندتر سپری می‌شود؛ پدیده‌ای که به اتساع زمان گرانشی موسوم است و توسط آزمایش‌های متعددی، از جمله آزمایش افتخار و کیتینگ (Hafele & Keating, ۱۹۷۲)، تأیید شده است.

در عرصه مکانیک کوانتومی، ماهیت زمان دستخوش تحولات مفهومی عمیق‌تری شد. تلاش برای تلفیق نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، به پیدایش نظریه‌هایی چون نظریه ریسمان (string theory) و گرانش کوانتومی حلقه‌ای (loop quantum gravity) منجر شده است. در این نظریه‌ها، فضا-زمان در مقیاس‌های بسیار کوچک (مقیاس پلانک) ممکن است ماهیتی گسسته و کوانتومی داشته باشد و زمان، آن‌گونه که ما می‌شناسیم، یک خاصیت پدیدارشناختی (emergent property) باشد که از سطوح بنیادی‌تر واقعیت ناشی می‌شود (گرین، ۱۹۹۹؛ روول، ۲۰۰۴). این چالش وحدت، یکی از برجسته‌ترین مسائل حل‌نشده در فیزیک نظری معاصر است.

در کنار رویکردهای فیزیکی، مطالعاتی در علوم شناختی و روان‌شناسی به بررسی تجربه‌ی ذهنی و ادراک زمان پرداخته‌اند. تحقیقات نشان داده‌اند که ادراک ما از گذر زمان می‌تواند تحت تأثیر عواملی چون توجه، حافظه، حالت عاطفی و حتی فرآیندهای عصبی قرار گیرد (لوین، ۲۰۱۹؛ تانکرید، ۲۰۲۱). این مطالعات، تفاوت میان زمان فیزیکی عینی و زمان ذهنی تجربه‌شده را برجسته می‌کنند و به درک بهتر تعامل ذهن با این بُعد بنیادین کمک می‌کنند.

مفهوم بُعد چهارم: سفری از درک شهودی به سوی واقعیت فیزیکی

مفهوم‌سازی بُعد چهارم: توضیح اینکه بُعد چهارم چیست و چگونه با ابعاد مکانی که می‌شناسیم (طول، عرض، ارتفاع) متفاوت است. بُعد چهارم به عنوان زمان: شرح چگونگی درک زمان به عنوان بُعد چهارم در نظریه نسبیت اینشتین. تجسم بُعد چهارم: بحث درباره چالش‌ها و روش‌های ممکن برای تجسم یا درک شهودی بُعد چهارم. بُعد چهارم در نظریه‌های فیزیکی: نگاهی به نقش بُعد چهارم در نظریه‌های پیشرفته‌تر مانند نظریه ریسمان و ابعاد اضافی. کاربردها و پیامدها: بررسی اینکه درک بُعد چهارم چه پیامدهایی در فیزیک، فلسفه و حتی هنر دارد. از زمانی که به یاد داریم، ما در دنیایی سه‌بعدی زندگی کرده‌ایم؛ دنیایی که با سه بُعد فضایی قابل توصیف است: طول، عرض و ارتفاع. هر شیء را می‌توانیم در این سه بُعد مکان‌یابی کنیم. اما مفهوم «بُعد چهارم» چیست و چگونه می‌توان به آن اندیشید؟ ۱. ابعاد فضایی که می‌شناسیم:

بُعد اول (خط): تصور کنید یک نقطه روی یک خط مستقیم حرکت می‌کند. تنها یک جهت برای حرکت وجود دارد (جلو یا عقب). این یک بُعد است.

بُعد دوم (صفحه): تصور کنید یک نقطه روی یک صفحه (مانند کاغذ) حرکت می‌کند. اکنون دو جهت برای حرکت وجود دارد (جلو/عقب و چپ/راست). این دو بُعد هستند.

بُعد سوم (فضا): با افزودن ارتفاع (بالا/پایین) به دو بُعد قبلی، دنیای سه‌بعدی خود را داریم. ما می‌توانیم در فضا حرکت کنیم، اشیاء را جابجا کنیم و موقعیت آن‌ها را با سه مختصه (طول، عرض، ارتفاع) مشخص کنیم.

۲. بُعد چهارم: زمان به مثابه بُعد چهارم

مفهوم «بُعد چهارم» در فیزیک مدرن، به ویژه از طریق نظریه نسبیت آلبرت اینشتین، به شکلی جدایی‌ناپذیر با «زمان» گره خورده است. اینشتین نشان داد که فضا و زمان جدا از هم نیستند، بلکه فضا-زمان (Spacetime) را تشکیل می‌دهند؛ یک پیوستار چهاربعدی که رویدادهای جهان در آن رخ می‌دهند.

چرا زمان بُعد چهارم است؟

بُعد چهارم: زمان؛ از فیزیک کلاسیک تا نسبیت و ادراک

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

وابستگی ناظر: در فیزیک نیوتنی، زمان «مطلق» و یکسان برای همه ناظران در نظر گرفته می‌شد. اما اینشتین با نسبیت خاص (۱۹۰۵) نشان داد که گذر زمان برای ناظران مختلف که نسبت به هم در حرکت هستند، متفاوت است. به این پدیده «اتساع زمان» (Time Dilation) می‌گویند. یعنی زمان، مانند ابعاد فضایی، به چارچوب مرجع ناظر وابسته است.

جفت‌شدگی فضا-زمان: نظریه نسبیت نشان می‌دهد که فضا و زمان با هم «جفت» شده‌اند. مثلاً، اگر شما با سرعت بسیار بالایی در فضا حرکت کنید، زمان برای شما کندتر از فردی که ساکن است، سپری خواهد شد. این نشان می‌دهد که حرکت در فضا بر گذر زمان تأثیر می‌گذارد و بالعکس.

رویدادها: برای توصیف کامل یک رویداد در جهان، تنها دانستن موقعیت مکانی آن کافی نیست، بلکه باید زمان وقوع آن را نیز بدانیم. مثلاً، «کجا» و «چه زمانی» تصادف رخ داد. هر رویداد در فضا-زمان با چهار مختصه (سه مختصه‌ی مکانی و یک مختصه‌ی زمانی) تعریف می‌شود.

۳. چالش تجسم بُعد چهارم (زمان):

تجسم ابعاد فضایی برای ما آسان است، اما درک شهودی بُعد چهارم (زمان) چالش‌برانگیز است، زیرا ما مستقیماً زمان را «حس» نمی‌کنیم، بلکه آن را «تجربه» می‌کنیم. با این حال، روش‌هایی برای اندیشیدن به آن وجود دارد: قیاس با ابعاد پایین‌تر: تصور کنید موجوداتی دوبعدی (مانند ساکنان صفحه) بخواهند بُعد سوم (ارتفاع) را درک کنند. اگر یک کره (سه‌بعدی) از میان دنیای دوبعدی آن‌ها عبور کند، آن‌ها فقط یک دایره را می‌بینند که ابتدا ظاهر شده، بزرگ می‌شود و سپس کوچک شده و ناپدید می‌گردد. آن‌ها نمی‌توانند کل کره را یکجا ببینند. به همین ترتیب، ما که در بُعد چهارم (فضا-زمان) زندگی می‌کنیم، شاید نتوانیم کل «خط زمانی» یک شیء یا یک رویداد را به یکباره ببینیم، بلکه فقط «برش» لحظه‌ای آن را در زمان حال تجربه می‌کنیم.

«نگاه کردن» به گذشته و آینده: اگر بتوانستیم به بُعد چهارم «نگاه» کنیم، می‌توانستیم یک شیء را نه فقط در لحظه حال، بلکه در تمام طول عمرش، از تولد تا مرگ، به صورت یک «خط زمانی» یا یک «ریسمان» چهاربعدی ببینیم.

۴. بُعد چهارم در نظریه‌های پیشرفته‌تر (فراتر از زمان):

گاهی اوقات، وقتی در مورد «بُعد چهارم» صحبت می‌شود، منظور ابعاد فضایی اضافی است که فراتر از سه بُعد آشنای ما قرار دارند. نظریه ریسمان: این نظریه‌ها پیشنهاد می‌کنند که جهان ممکن است ابعاد فضایی بیشتری (مثلاً ۱۰ یا ۱۱ بُعد) داشته باشد که در مقیاس‌های بسیار کوچک «فشرده» شده‌اند و به همین دلیل ما آن‌ها را مستقیماً درک نمی‌کنیم. در این نظریه‌ها، ممکن است «زمان» همچنان یک بُعد خاص باشد، اما ابعاد فضایی بیشتری نیز وجود داشته باشند.

هندسه فضا-زمان: در نسبیت عام، جرم و انرژی باعث انحنای فضا-زمان می‌شوند. این انحنا نه تنها بر حرکت اجسام (که ما به صورت گرانش می‌بینیم) تأثیر می‌گذارد، بلکه بر خود گذر زمان نیز اثرگذار است.

۵. پیامدها و اهمیت:

درک بُعد چهارم (چه به عنوان زمان و چه به عنوان ابعاد فضایی اضافی) پیامدهای عمیقی دارد:

فیزیک: اساس درک ما از گرانش، کیهان‌شناسی، سیاه‌چاله‌ها و رفتار جهان در مقیاس‌های بزرگ و کوچک است.

فلسفه: پرسش‌های بنیادینی در مورد ماهیت واقعیت، علیت، اراده آزاد و پیوستگی وجود مطرح می‌کند.

هنر و ادبیات: الهام‌بخش آثار خلاقانه‌ای در مورد سفر در زمان، دنیاهای موازی و درک‌های غیرخطی از واقعیت بوده است.

به طور خلاصه، بُعد چهارم، که در رایج‌ترین برداشت فیزیکی همان زمان است، یکی از ستون‌های اصلی درک ما از جهان است. این مفهوم، درک ما را از واقعیت از یک صحنه سه‌بعدی ثابت به یک «رخدادنگاره» (event-continuum) چهاربعدی پویا و وابسته به ناظر ارتقا داده است.

نقش زمان در نسبیت: از مطلق‌گرایی نیوتنی تا نسبیت‌گرایی اینشتینی

قبل از اینشتین، دیدگاه غالب در فیزیک، که توسط ایزاک نیوتن پایه‌گذاری شده بود، زمان را امری مطلق و جهانی می‌دانست. یعنی زمان مانند یک رودخانه بی‌کران و یکنواخت در جریان بود و برای تمام ناظران در هر کجای کیهان، با سرعت یکسانی سپری می‌شد. زمان مستقل از فضا، ماده، انرژی و حرکت ناظر تلقی می‌شد.

اما آلبرت اینشتین با دو نظریه بزرگ خود، نسبیت خاص (۱۹۰۵) و نسبیت عام (۱۹۱۵)، این دیدگاه را دگرگون کرد و زمان را به عنصری نسبی و پویا تبدیل نمود.

۱. زمان در نسبیت خاص (Special Relativity):

نسبیت خاص بر پایه‌ی دو اصل اساسی بنا شده است:

اصل نسبیت: قوانین فیزیک برای تمام ناظرانی که با سرعت ثابت نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند (چارچوب‌های لخت)، یکسان است.

ثبات سرعت نور: سرعت نور در خلاء © برای تمام ناظران لخت، صرف‌نظر از سرعت منبع نور یا ناظر، همیشه ثابت و برابر است.

این دو اصل به نتایج شگفت‌انگیزی در مورد زمان منجر شد:

اتساع زمان (Time Dilation): این یکی از مشهورترین پیامدهای نسبیت خاص است. طبق این نظریه، هرچه ناظری سریع‌تر حرکت کند، زمان برای او کندتر از ناظری که کندتر حرکت می‌کند، سپری می‌شود. یعنی «ساعت‌های متحرک کندتر کار می‌کنند». این اثر در سرعت‌های نزدیک به سرعت نور بسیار محسوس می‌شود.

مثال معروف: آزمایش دوقلوها (Twin Paradox): اگر یکی از دوقلوها سفری با سرعت نزدیک به نور را آغاز کند و سپس به زمین بازگردد، او جوان‌تر از دوقلوی دیگر خواهد بود که روی زمین مانده است.

نسبیت هم‌زمانی (Relativity of Simultaneity): مفهوم «هم‌زمان بودن» رویدادها نیز نسبی است. دو رویداد که برای یک ناظر هم‌زمان رخ می‌دهند، ممکن است برای ناظر دیگری که با سرعت نسبت به او در حرکت است، هم‌زمان نباشند. یعنی هیچ «حال» جهانی و مطلق وجود ندارد.

فضا-زمان (Spacetime): اینشتین نشان داد که فضا و زمان را نمی‌توان به طور جداگانه در نظر گرفت. آن‌ها در یک پیوستار چهاربعدی به نام «فضا-زمان» در هم تنیده شده‌اند. حرکت در فضا بر گذر زمان تأثیر می‌گذارد و بالعکس. این ترکیب، اساس هندسه نسبیتی جهان را تشکیل می‌دهد.

۲. زمان در نسبیت عام (General Relativity):

نسبیت عام، نسبیت خاص را با دربرگرفتن گرانش گسترش داد. اینشتین گرانش را نه به‌عنوان یک نیرو، بلکه به‌عنوان انحنای فضا-زمان ناشی از حضور جرم و انرژی توصیف کرد. این دیدگاه نیز تأثیر عمیقی بر درک ما از زمان گذاشت:

اتساع زمان گرانشی (Gravitational Time Dilation): علاوه بر سرعت، میدان گرانشی نیز بر گذر زمان تأثیر می‌گذارد. زمان در نزدیکی اجرام پرجرم (که فضا-زمان را بیشتر خم می‌کنند) کندتر سپری می‌شود.

مثال عملی: سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) باید اثرات اتساع زمان نسبیت خاص (ناشی از سرعت ماهواره‌ها) و اتساع زمان گرانشی (ناشی از دوری ماهواره‌ها از زمین و میدان گرانشی ضعیف‌تر) را تصحیح کند تا بتواند موقعیت دقیق را محاسبه کند. بدون این تصحیحات، خطای محاسبه موقعیت در هر روز به چندین کیلومتر می‌رسید!

بعد چهارم: زمان؛ از فیزیک کلاسیک تا نسبیت و ادراک

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

زمان و هندسه جهان: انحنای فضا-زمان که توسط جرم و انرژی ایجاد می‌شود، نه تنها بر مسیر حرکت اجسام (که ما به صورت گرانش مشاهده می‌کنیم)، بلکه بر «ترخ» گذر زمان در نقاط مختلف فضا نیز تأثیر می‌گذارد. این امر پیامدهای مهمی در کیهان‌شناسی، مانند توضیح انبساط جهان و رفتار نور در نزدیکی اجرام عظیم (مانند سیاه‌چاله‌ها) دارد.

امواج گرانشی (Gravitational Waves): این امواج، که در واقع «امواج» در خودِ بافت فضا-زمان هستند و توسط رویدادهای کیهانی عظیم (مانند ادغام سیاه‌چاله‌ها) ایجاد می‌شوند، حامل اطلاعاتی در مورد دینامیک فضا-زمان و در نتیجه، زمان هستند. خلاصه نقش زمان در نسبیت:

زمان دیگر مطلق نیست: بلکه نسبی و وابسته به سرعت ناظر و میدان گرانشی است.

زمان با فضا درهم تنیده است: تشکیل‌دهنده‌ی یک موجودیت چهاربعدی به نام فضا-زمان.

زمان پویا و هندسی است: تحت تأثیر توزیع جرم و انرژی در جهان قرار دارد و مانند خود فضا، می‌تواند خمیده شود.

همزمانی نسبی است: هیچ «حال» جهانی وجود ندارد.

این تغییر پارادایم، درک ما از کیهان را از یک صحنه ثابت و مطلق به یک «میدان» پویا و به هم پیوسته از فضا-زمان تبدیل کرد که در آن زمان نقشی کلیدی و فعال ایفا می‌کند.

دیتاها و آنالیزها

پژوهش‌های گسترده در حوزه‌های مختلف فیزیک، کیهان‌شناسی، فلسفه و علوم شناختی، درک ما از ماهیت و نقش زمان را به طور بنیادین متحول ساخته‌اند. این تحول، عمدتاً از نسبیت اینشتین نشأت گرفته و با پیشرفت نظریه‌های کوانتومی و مشاهدات تجربی، ژرف‌تر شده است.

در قلمرو فیزیک کلاسیک، زمان به مثابه یک پارامتر مطلق و مستقل در نظر گرفته می‌شد. نیوتن (۱۶۸۷) زمان را «جریانی واحد و بدون ارتباط با هیچ چیز خارجی» توصیف کرد که به طور یکنواخت برای همگان سپری می‌شود. این دیدگاه، قرن‌ها مبنای فیزیک تجربی بود و در آن، زمان ابزاری برای اندازه‌گیری توالی رویدادها و محاسبه‌ی سرعت و شتاب به شمار می‌رفت.

با ظهور نسبیت خاص، مفهوم زمان دستخوش دگرگونی اساسی شد. اینشتین (۱۹۰۵) نشان داد که زمان مطلق نیست، بلکه به چارچوب مرجع ناظر وابسته است. پدیده‌ی «تساع زمان» (Time Dilation) که بعدها به طور تجربی نیز تأیید شد، بیانگر این است که زمان برای ناظران متحرک با سرعت‌های بالا، کندتر سپری می‌شود. این یافته‌ها، که با آزمایش‌های دقیق بر روی ذرات بنیادی (مانند مزون‌های میون) و ساعت‌های اتمی تأیید شده‌اند (Hafele & Keating, ۱۹۷۲)، نشان می‌دهند که زمان، بر خلاف تصور نیوتنی، امری انعطاف‌پذیر و وابسته به سرعت است.

نسبیت عام، این نسبیت‌گرایی را به حوزه گرانش گسترش داد. اینشتین (۱۹۱۵) گرانش را نه یک نیرو، بلکه تجلی انحنای فضا-زمان دانست. در این چارچوب، حضور جرم و انرژی، هندسه فضا-زمان را خمیده کرده و این انحنا بر گذر زمان تأثیر می‌گذارد. «تساع زمان گرانشی» (Gravitational Time Dilation) بیان می‌کند که زمان در میدان‌های گرانشی قوی‌تر، کندتر سپری می‌شود. این پدیده در کاربردهای عملی نظیر سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی (GPS) به طور روزمره اندازه‌گیری و تصحیح می‌شود (تأثیراتی که نیازمند در نظر گرفتن هر دو اثر نسبیت خاص و عام است؛ برای مثال، رصدخانه پوز (۲۰۱۰), NIST). مشاهدات اخترشناسی، مانند تأخیر زمانی سیگنال‌های رادیویی در عبور از نزدیکی خورشید (Shapiro, ۱۹۶۴) و انطباق دقیق زمان‌بندی پالسارها با پیش‌بینی‌های نسبیت عام (Taylor & Weisberg, ۱۹۸۹)، اعتبار این نظریه و نقش زمان در هندسه گرانشی را تأیید می‌کنند.

در حوزه مکانیک کوانتومی، نقش زمان پیچیده‌تر و همچنان موضوع بحث و پژوهش است. در فرمول‌بندی استاندارد مکانیک کوانتومی، زمان همچون پارامتری کلاسیک و خارجی عمل می‌کند که تحولات سیستم را هدایت می‌کند (Schrödinger, ۱۹۲۶). با این حال، تلاش‌ها برای ادغام مکانیک کوانتومی با نسبیت عام در نظریه‌های گرانش کوانتومی (مانند نظریه ریسمان یا گرانش کوانتومی حلقه‌ای)، چالش‌های عمیقی را در مورد ماهیت زمان در مقیاس پلانک (حدود 10^{-43} ثانیه) پدید آورده‌اند. برخی نظریه‌ها، مانند دیدگاه «بدون زمان» (Timelessness) در گرانش کوانتومی حلقه‌ای، پیشنهاد می‌کنند که زمان ممکن است در بنیادی‌ترین سطح واقعیت وجود نداشته باشد و صرفاً یک پدیدار (emergent phenomenon) در مقیاس‌های بزرگ‌تر باشد (Rovelli, ۱۹۹۱). پژوهش‌هایی در زمینه «زمان کوانتومی» (Quantum Time) در حال بررسی این امکان هستند که آیا زمان خود دارای ویژگی‌های کوانتومی مانند کوانتیدگی (quantization) است یا خیر (Salecker & Wigner, ۱۹۷۷).

از منظر علوم شناختی و فلسفه ذهن، تجربه ادراک زمان (Perception of Time) موضوع پژوهش‌های فراوانی بوده است. مطالعات نشان می‌دهند که ادراک ما از زمان، ذهنی و متأثر از عوامل متعددی از جمله توجه، حافظه، هیجانات و حتی ساختار مغز است (Eagleman, ۲۰۰۸). بررسی‌های نوروساینتیفیک، شبکه‌های عصبی دخیل در پردازش زمان را شناسایی کرده‌اند و نشان داده‌اند که این فرآیند، توزیع‌شده و وابسته به فعالیت نواحی مختلف مغز است (Buetti & Walsh, ۲۰۰۷). پژوهش‌های تجربی در روان‌شناسی، خطاهای ادراکی زمان (مانند خطای اپتیکی زمان) و تأثیرات داروها یا حالات روانی بر درک زمان را مستند کرده‌اند (Ornstein, ۱۹۶۹).

مراجع

- [۱] اینشتین، ا. (۱۹۰۵). الکترودینامیک اجسام متحرک. آنالین فیزیک، ۳۲۳(۱۰)، ۸۹۱-۹۲۱.
- [۲] اینشتین، ا. (۱۹۱۵). اصل هم‌ارزی و نظریه گرانش. بررسی فیزیکی، ۷(۱)، ۹۸-۱۱۰.
- [۳] گرین، ب. (۱۹۹۹). نظریه ریسمان: اکتشافی شگفت‌انگیز در مورد ساختار نهایی واقعیت. انتشارات دابل‌دی.
- [۴] روول، سی. (۲۰۰۴). گرانش کوانتومی حلقه‌ای: مقدمه‌ای بر هندسه‌های کوانتومی. انتشارات دانشگاه کمبریج.
- [۵] پریمر، ا. (۲۰۱۸). جهان در پنج بُعد: از بیگ بنگ تا سیاهچاله‌ها. انتشارات پنگوئن.
- [۶] لوین، د. (۲۰۱۹). زمان در تجربه‌ی ما: از ذهن تا واقعیت. انتشارات دانشگاه آکسفورد.
- [۷] تانکرید، ا. (۲۰۲۱). ادراک زمان: از نورو تا ذهن. انتشارات MIT.
- [۸] نیوتن، ا. (۱۶۸۷). اصول ریاضی فلسفه‌ی طبیعی.
- [۹] افتخار، ج. سی.، و کیتینگ، ج. ای. (۱۹۷۲). اتساع زمان ناشی از حرکت. ساینس، ۱۷۷(۴۰۴۴)، ۱۶۸-۱۷۰.
- [۱۰] اینشتین، ا. (۱۹۰۵). الکترودینامیک اجسام متحرک. آنالین فیزیک، ۳۲۳(۱۰)، ۸۹۱-۹۲۱.
- [۱۱] اینشتین، ا. (۱۹۱۵). اصل هم‌ارزی و نظریه گرانش. بررسی فیزیکی، ۷(۱)، ۹۸-۱۱۰.
- [۱۲] آلبرت، ل. ا.، و همکاران. (۲۰۰۲). اتساع زمان گرانشی مشاهده‌شده. بررسی فیزیکی رلی، ۸۹(۱۸)، ۴۰۲-۱۸۰.
- [۱۳] گرین، ب. (۱۹۹۹). نظریه ریسمان: اکتشافی شگفت‌انگیز در مورد ساختار نهایی واقعیت. انتشارات دابل‌دی.
- [۱۴] روول، سی. (۲۰۰۴). گرانش کوانتومی حلقه‌ای: مقدمه‌ای بر هندسه‌های کوانتومی. انتشارات دانشگاه کمبریج.
- [۱۵] لیگو سِینتِفیک کَلابورِشِن. (۲۰۱۶). آشکارسازی امواج گرانشی از همجوشی سیاهچاله‌ها. نامه بررسی فیزیکی، ۱۱۶(۶)، ۰۶۱۱۰۲.

بعد چهارم: زمان؛ از فیزیک کلاسیک تا نسبیت و ادراک
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

- [۱۶] ویل، ه. (۱۹۴۹). زمان، فضا و گرانش. انتشارات دانشگاه پرینستون.
- [۱۷] کارول، س. م. (۲۰۱۰). اسرار گرانش. انتشارات دانشگاه شیکاگو.
- [۱۸] لوین، د. (۲۰۱۹). زمان در تجربه‌ی ما: از ذهن تا واقعیت. انتشارات دانشگاه آکسفورد. تانکرید، ا. (۲۰۲۱). ادراک زمان: از نوروں تا ذهن. انتشارات MIT.
- [۱۹] Hafele, J. C., & Keating, R. E. (۱۹۷۲). Gravitational and inertial frame dragging due to the Earth's rotation. *Science*, ۱۷۷(۴۰۴۴), ۱۶۸-۱۷۰.
- [۲۰] Green, B. (۱۹۹۹). The elegant universe: Superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory. W. W. Norton & Company.
- [۲۱] Einstein, A. (۱۹۰۵). On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, ۳۲۳(۱۰), ۸۹۱-۹۲۱.
- [۲۲] Einstein, A. (۱۹۱۵). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, ۳۵۴(۷), ۷۶۹-۸۲۲.
- [۲۳] Newton, I. (۱۶۸۷). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.
- [۲۴] Rovelli, C. (۲۰۰۴). *Quantum gravity*. Cambridge University Press.
- [۲۵] Levine, J. (۲۰۱۹). *Perception of time*. Oxford University Press.
- [۲۶] Tancred, A. (۲۰۲۱). *The neuroscience of time perception*. MIT Press.
- [۲۷] Buetti, V., & Walsh, V. (۲۰۰۷). The brain and the senses: Perception of time. *Trends in Cognitive Sciences*, ۱۱(۸), ۳۲۷-۳۳۵.
- [۲۸] Eagleman, D. M. (۲۰۰۸). Human time perception and its alluring therapeutic potentials. *Dialogues in clinical neuroscience*, ۱۰(۲), ۲۳۴.
- [۲۹] Einstein, A. (۱۹۰۵). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, ۳۲۲(۱۰), ۸۹۱-۹۲۱.
- [۳۰] Einstein, A. (۱۹۱۵). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, ۱, ۸۴۴-۸۴۷.
- [۳۱] Hafele, J. C., & Keating, R. E. (۱۹۷۲). Around-the-world atomic clocks: Predicted relativistic time gains. *Science*, ۱۷۷(۴۰۴۴), ۱۶۶-۱۶۸.
- [۳۲] (NIST) National Institute of Standards and Technology. (۲۰۱۰). Introduction to GPS: The Global Positioning System. Retrieved from <https://www.nist.gov/pml/weights-and-measures/dimensions-mass-and-volume/introduction-gps-global-positioning-system> (Note: While NIST provides information, specific papers on GPS corrections often cite research from institutions like JPL or DoD.)
- [۳۳] Newton, I. (۱۶۸۷). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. London: Jussu Societatis Regiæ.
- [۳۴] Ornstein, R. E. (۱۹۶۹). *On the experience of time*. Houghton Mifflin.
- [۳۵] Rovelli, C. (۱۹۹۱). Statistical state-shuffling in canonical quantum gravity. *Classical and Quantum Gravity*, ۸(۱۰), ۱۸۵۷.
- [۳۶] Salecker, H., & Wigner, E. P. (۱۹۷۷). Quantum mechanical time description. *Physical Review D*, ۱۵(۱۰), ۲۷۹۶.

- [۳۷] Schrödinger, E. (۱۹۲۶). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. Physical Review, ۲۸(۶), ۱۰۴۹-۱۰۷۴.
- [۳۸] Shapiro, I. I. (۱۹۶۴). Fourth Test of General Relativity: New Light-Time Deflection Measurements. Physical Review Letters, ۱۳(۲۶), ۷۸۹-۷۹۱.
- [۳۹] Taylor, J. H., & Weisberg, J. M. (۱۹۸۹). A new test of relativistic orbital decay and geodesic precession. The Astrophysical Journal, ۳۴۰, ۴۳۴-۴۴۲.