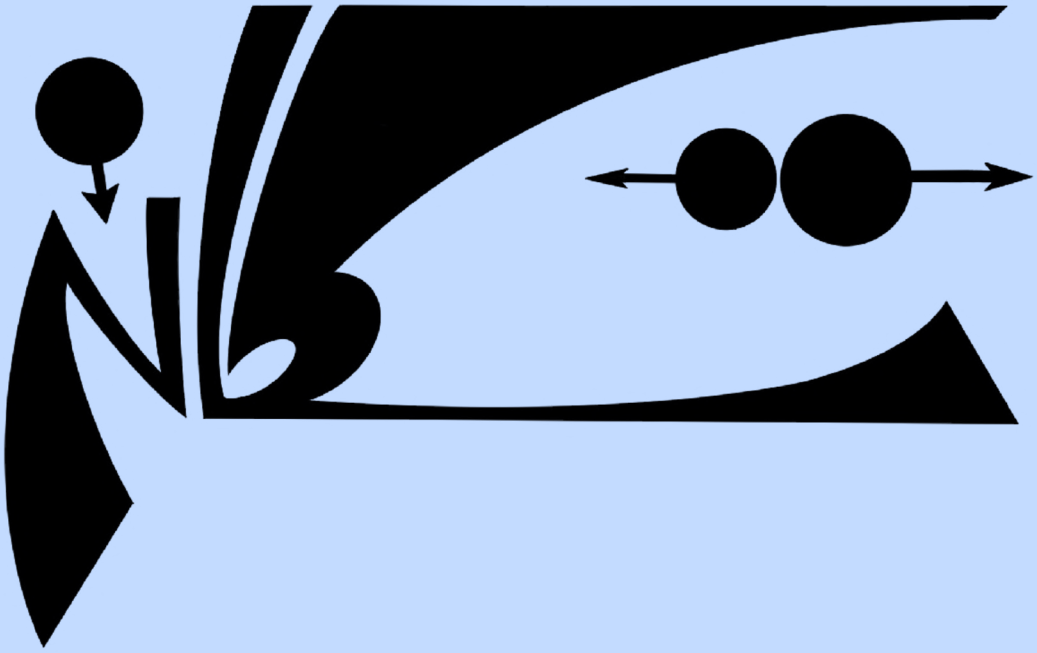
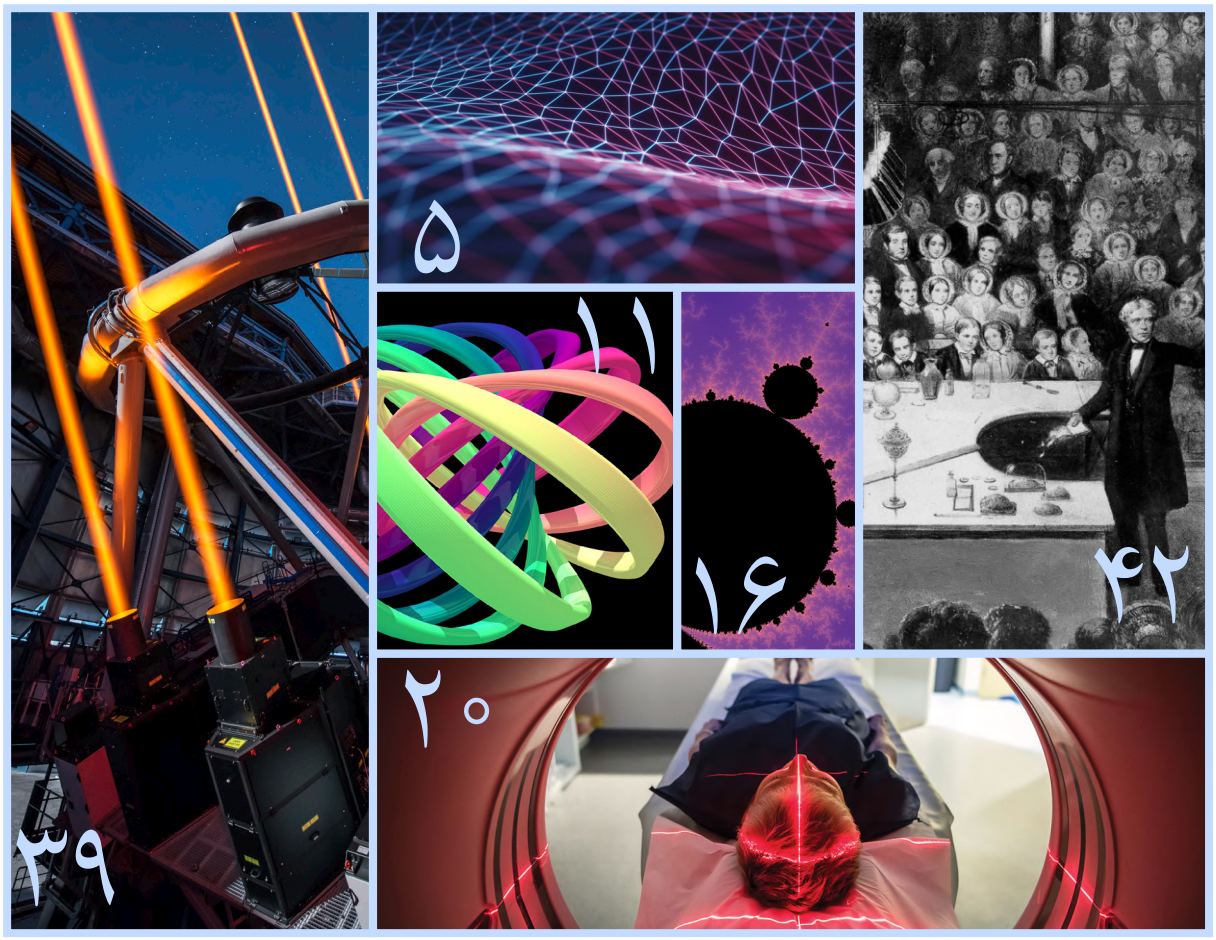
نشریه علمی آموزشی دانشجویان فیزیک دانشگاه شریف
شماره ۳۱
تابستان ۰۰



مدیر مسئول:	دکتر سامان مقیمی عراقی
شورای سردبیری:	یاسمین‌سادات پناهی، عرفان رهبری، مهیار عباسی
حمایت و پشتیبانی:	دبیرخانه مدیریت نشریات امور فرهنگی
طراحی جلد و صفحه آرایی:	زهرا اکبری، نگین باقری نقره‌ای، هانیه حاتمی، آرتین خانعلی، عرفان رهبری
ویراستاری:	علی اکرامیان، مریم شریفیان، آوین محبی، حانیه ملکی
گروه علمی:	یاسمین‌سادات پناهی، مهیار عباسی، حسین مهدئی
تحریریه‌ی این شماره:	ارمیا اعتمادی‌بروجنی، زهرا اکبری، نوید اکبری، مریم رحیمی، عرفان رهبری، محمد شریفی‌کیاسری، صالح شاملواحمدی، علی فعله، حمیدرضا علیمحمدی، امیرحسین فیض، علی گودرزی، الهه ملاحیدر، حانیه ملکی، سجاد مهدی‌زاده، محمدجواد ولی‌زاده
با تشکر از:	دکتر محمود بهمن‌آبادی، دکتر نعیمه ناصری

تکانه، نشریه علمی-آموزشی دانشجویان فیزیک دانشگاه صنعتی شریف
شماره ۳۱ تابستان ۰۰
نشانی: تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک، طبقه ۵، دفتر دانشکده

Web: www.physics.sharif.edu/~takaneh
E-mail: takaneh.magazine.official@gmail.com



فهرست

تشخیص سرطان با کمک یادگیری ماشین ۵

انیون‌ها و تمیزناپذیری در مکانیک کوانتومی ۱۱

صحت روش های‌کامپیوتری در دینامیک‌های غیرخطی ۱۶

چگونه در خانه‌ی خود PET Scanner بسازید ۲۰

مولد موج با مدارمجتمع ICL8038 ..... ۲۶

مروری بر سیستم‌های پیچیده و اصول حاکم بر کنترل‌پذیری آن‌ها ۳۱

معرفی کتاب: داستان لیزر: ماجراهای یک دانشمند ۳۹

مروری بر تاریخ شکل‌گیری نظریه‌ی الکترومغناطیس ۴۲

نقد و بررسی ارزشیابی مجازی در دانشکده ۴۸

مصاحبه: دکتر نعیمه ناصری ۵۵

سخن سردبیر

سپاسگزاریم که در حال خواندن نشریه‌ی ما، ۳۱امین نشریه‌ی علمی دانشجویان دانشکده فیزیک شریف هستید. خرسندیم که توانستیم با کوشش بسیار در طی فصل‌های بهار و تابستان ۰۰ این شماره را منتشر کنیم. این نشریه حاصل همکاری مشتاقانه‌ی اعضای مسئولیت‌پذیر کادر تکانه و همچنین اعلام آمادگی نویسنده‌های عزیز است. به‌وجودآمدن نشریه از کارهای فردی و گروهی، گاه منظم و منسجم، گاه نامنظم و شلخته و درکل، «فرآیند کاملاً انسانی» فعالیت در تکانه، در این دو شماره‌ای که به‌شکل الکترونیک چاپ کردیم، برای خود ما بسیار جالب و آموزنده بوده‌است. باید اشاره کنیم صرف نظر از دیگرجزئیات کار، معمولاً سه گروهی که در نخستین صفحه مشخص شده‌اند، با سرپرستی شورای سردبیری برای آماده‌سازی تکانه فعالیت کردند. گروه علمی، عموماً، وظیفه‌اش تنظیم محتوا، ارتباط و تعامل با نویسنده‌ها، خوانش مقالات و ویراستاری علمی (گاهی با مشورت استادان دانشکده) است. وظایف دو گروه دیگر هم باتوجه به عنوان، آشکار است.

تکانه حاصل کار دانشجویی است، بنابراین در هر سال تحصیلی حداقل یک و حداکثر دو شماره چاپ می‌شود. باوجود تلاش شورا برای کوتاه‌کردن مقالات، به‌خاطر دیربه‌دیر چاپ‌شدن تکانه، نهایتاً هر شماره حجم صفحات قابل توجهی می‌گیرد. خواننده‌ی عزیز بسته به سلیقه‌اش می‌تواند نشریه را تقسیم کرده و جزء به جزء بخواند اما صرفاً توصیه‌ی ما این است که در دو یا سه روز متوالی این نشریه خوانده شود. همانند شماره‌ی قبلی، ساده‌سازی مقالات را برای خوانش بهتر با نظر به توصیه‌ی مدیر مسئول گرامی، سرلوحه قرار دادیم. ارجاع‌های آخر مقالات برای خواننده‌ی علاقه‌مند به موضوع مهیا شده‌اند تا امکان مطالعه‌ی کامل‌تر وجود داشته‌باشد.

سردبیری تکانه معمولاً هر یک الی دو سال پوست‌اندازی می‌کند و همواره در تکانه اینگونه است که تخصیص نقش‌ها درون کادر، به‌طور سلسله‌مراتبی دینامیک دارد. تکانه تصمیم دارد برای مقالات نوشته‌شده توسط دانشجویان فیزیک خارج از دانشگاه شریف نیز در شماره‌های آینده، ظرفیتی در نظر گیرد. واضح است بهترین مقالات گزینش می‌شوند و سایر آنها در آرشیو برای شماره‌ی بعد محفوظ می‌ماند. برای ارسال مقاله پل ارتباطی در وبگاه ما قرارگرفته است؛ ایمیل رسمی تکانه و ارتباط با سردبیرها در پیام‌رسان‌های مجازی نیز برای تسریع روند توصیه می‌شود. چارچوب محتوایی مقالات تکانه تقریباً از فهرست این شماره و شماره‌های پیشین قابل فهم است. لطفاً قبل از ارسال چکیده، ضوابط بارگذاری‌شده روی وبگاه را در قسمت «ارتباط با ما» مطالعه فرمایید. به‌علاوه، از همه‌ی دوستانمان در دانشکده، از هر سال مقطع کارشناسی، در صورت علاقه‌مند بودن برای فعالیت در کادر تکانه یا نگارش مقاله، صمیمانه دعوت به‌عمل می‌آوریم.

عکس روی جلد این شماره، تصویر ریاضیدان و فیزیکدان قرن ۲۰-۱۹ میلادی، «اُلیور هِویساید» است (به مقاله‌ی تاریخی این شماره مراجعه کنید) که توسط گروه طراحی جلد و صفحه‌آرایی، انتخاب و نقاشی شد. از همه کسانی که به هر نحوی در انتشار این نشریه همکاری کردند به‌ویژه اعضای انجمن علمی دانشکده، کمال تشکر را داریم. امیدواریم این نشریه به دل شما خواننده‌ی عزیز اهل فیزیک بنشیند و پس از آن دیگرشماره‌های موجود در آرشیو وبگاه نیز مورد مطالعه‌تان قرار گیرد.

با آرزوی خوشحالی همه‌ی دانشجویان و بازگشتِ هر چه زودترِمان به محیط حقیقی دانشگاه،

شورای سردبیری تکانه‌های ۳۰ و ۳۱،

مهیار عباسی، یاسمین‌سادات پناهی، عرفان رهبری

تشخیص سرطان به کمک یادگیری ماشین

امیرحسین فیض

سرطان سینه[1] شایع‌ترین نوع سرطان در زنان در سراسر جهان است و میزان مرگ‌ومیر بسیار بالایی دارد. بر اساس گزارش اخیر انجمن سرطان آمریکا، تعداد موارد جدید سرطان سینه در ایالات‌متحده در سال ۲۰۱۹ حدود ۲۶۸،۶۰۰ نفر است. تشخیص به‌موقع می‌تواند درمان را موفقیت‌آمیزتر کند و به بهبود بیمار کمک کند.[۱]

یکی از بیشترین خطاهای پزشکی مربوط به تشخیص اشتباه پزشک است. اشتباهات پزشکی از موضوعاتی است که متخصصان تلاش می‌کنند تا آن را به حداقل برسانند. از حوزه‌هایی که درزمینه‌ی پزشکی و تشخیص بیماری‌ها به‌سرعت روبه رشد است، هوش مصنوعی و استفاده از کامپیوتر برای تشخیص بیماری‌ها است. به‌طوری‌که به پزشکان کمک می‌کند تا بیماری را در همان مراحل ابتدایی تشخیص و از رشد آن در بدن بیمار جلوگیری کنند.

amirhossein.feiz79@gmail.com

اکنون می‌خواهیم مروری بر مفاهیم هوش مصنوعی[۲]، یادگیری عمیق[۳] (از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی) و شبکه‌های عصبی[۴] (از زیرمجموعه‌های یادگیری عمیق) داشته باشیم.

کتاب‌های درسی هوش مصنوعی، این زمینه را به‌عنوان مطالعه «عوامل هوشمند» تعریف می‌کنند:

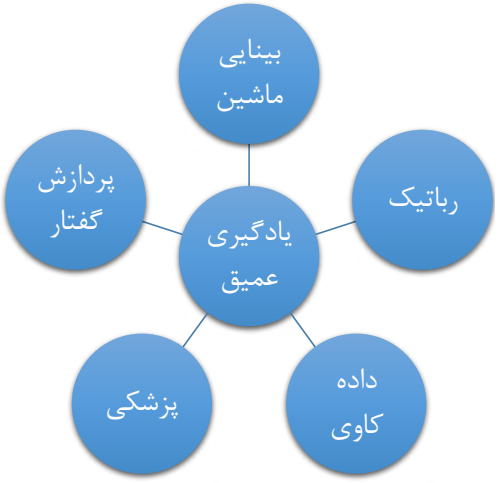
هر وسیله‌ای که محیط خود را درک کند و اقداماتی را انجام دهد که حداکثر شانس خود را برای دستیابی به موفقیت خود به حداکثر برساند. [۴]

به زبان عامیانه، اصطلاح «هوش مصنوعی» اغلب برای توصیف ماشین‌آلات (یا رایانه‌ها) استفاده می‌شود که عملکردهای «شناختی» را که انسان با ذهن انسان مرتبط می‌سازد تقلید می‌کند ، مانند «یادگیری» و «حل مسئله». [۵]

عکس ۱

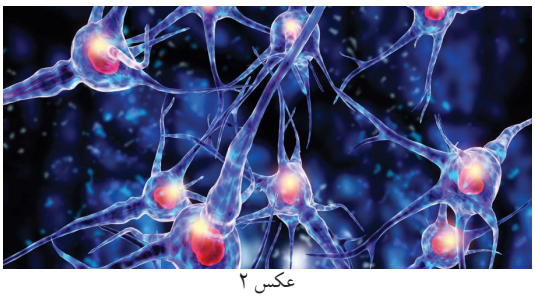
یادگیری عمیق یک عملکرد هوش مصنوعی است که عملکرد مغز انسان را در پردازش داده‌ها برای استفاده در تشخیص اشیا، تشخیص گفتار، ترجمه زبان‌ها و تصمیم‌گیری تقلید می‌کند.

در شکل زیر می‌توانید کاربردهای یادگیری عمیق را مشاهده کنید



نمودار ۱

یکی از زیرمجموعه‌های یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی است. شبکه‌های عصبی، سیستم‌های محاسباتی هستند که از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مغز حیوانات الهام گرفته‌شده‌اند.



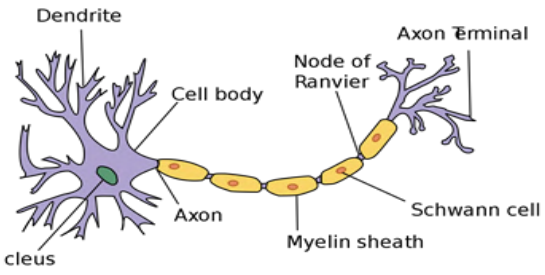
عکس ۲

من با استفاده شبکه‌های عصبی، شبکه‌ای را برای تشخیص خوش‌خیم یا بدخیم بودن سرطان سینه طراحی و آموزش دادم تا با ورود داده‌های جدید مربوط به یک بیمار جدید مبتلابه سرطان، بتواند خوش‌خیم یا بدخیم بودن سرطان را تشخیص دهد.

اما پیش از شروع تعدادی از الگوریتم‌های به‌کاررفته را موردبررسی قرار می‌دهیم تا درک بهتری از روند حل مسئله داشته باشیم.

شبکه‌های عصبی (Neural Networks)

همان‌طور که گفته شد، شبکه‌های عصبی از ساختار مغز حیوانات الهام گرفته‌شده‌اند. هر سلول عصبی را یک «نورون» می‌گویند. دستگاه عصبی از تعداد زیادی نورون تشکیل‌شده است. درون مغز جانداران، نورون‌ها[۵] از طریق دندریت‌ها[۶]، پیام‌های عصبی را دریافت و از طریق آکسون‌ها[۷] با نورون‌های دیگر در ارتباط هستند.

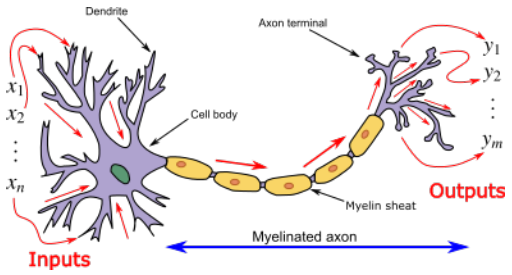


عکس ۳

در ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی ارتباط بین نورون‌ها با استفاده از روابط ریاضی تعریف‌شده است. این ارتباط از طریق وزن‌ها[۸] و بایاس‌ها[۹] برقرار خواهد شد. بدین‌صورت که درنهایت به تابع فرضیه‌ای[۱۰] دست

۱ Breast Cancer
۲ Artificial Intellegence
۳ Deep Learning
۴ Neural Networks
۵ Neuron
۶ Dendrite
۷ Axon
۸ Weight
۹ Bias
۱۰ Hypothesis

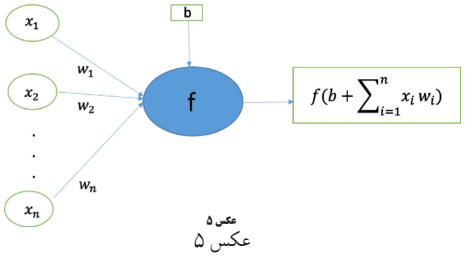
پیدا می‌کنیم که توصیف‌کننده ارتباط بین داده‌ها خواهد بود. بنابراین می‌توانیم بگوییم ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی شبیه ساختار نورون‌های مغز است.



عکس ۴

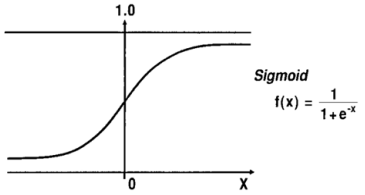
شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks):

ساختار زیر را در نظر بگیرید



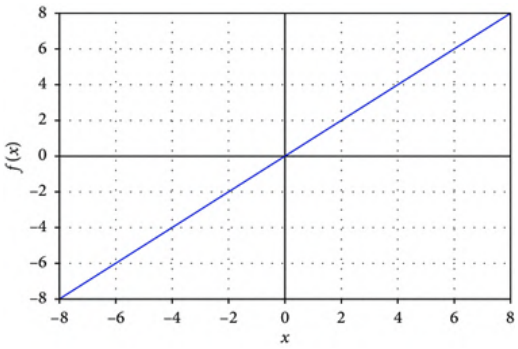
عکس ۵

در این ساختار ورودی هر نورون با وزن تعریف‌شده ضرب و با بایاس جمع می‌شود که در این صورت به تابع فرضیه‌ای[11] دست پیدا می‌کنیم که توصیف‌کننده رابطه بین داده‌هاست. خروجی لایه وارد تابعی به نام تابع فعال‌ساز[12] می‌شود. وظیفه تابع فعال‌ساز، غیرخطی[13] کردن تابع فرضیه است. تا تابع به‌دست‌آمده بتواند رابطه بین داده‌های پیچیده‌تر را هم یاد بگیرد. توابع فعال‌ساز متفاوتی نیز ازجمله relu، sigmoid ، linear، tanh و ... وجود دارند که هرکدام برای مسئله خاصی استفاده می‌شوند. برای مثال sigmoid برای مسائل طبقه‌بندی[14] استفاده می‌شود و linear برای مسائل رگرسیون[15] موجود در یادگیری ماشین و یادگیری عمیق استفاده می‌شود. در شکل زیر نمونه‌ای از توابع فعال‌ساز مختلف را مشاهده می‌کنید:



نمودار۲: Sigmond Activation function

۱۱ Hypothesis
۱۲ Activation Function
۱۳ Nonlinearity
۱۴ Classification



نمودار۳: Linear Activation function

وظیفه اصلی در طراحی یک شبکه عصبی، تعریف وزن‌های موجود بین نورون‌هاست. الگوریتم‌های مختلفی ازجمله forward-propagation و backward-propagation برای به دست آوردن وزن‌های موجود بین نورون‌ها به ما کمک می‌کنند. پس از یادگیری شبکه بایستی به بررسی عملکرد شبکه بپردازیم.

تابع هزینه[16] یا loss function، معیاری برای بررسی عملکرد شبکه است. هرچه مقدار تابع هزینه کمتر باشد شبکه عملکرد بهتری دارد.

عملکرد تابع هزینه بدین‌صورت است که فاصله بین مقدار خروجی شبکه و مقدار اصلی را محاسبه می‌کند. روابط متفاوتی نیز برای محاسبه این فاصله وجود دارند.MSE(Mean Squared error)، Categorical-crossentropy، Binary-crossentropy و.....

در رابطه‌ی زیر می‌توانید تعدادی از توابع هزینه را مشاهده کنید.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum(y-\hat{y})^2$$

رابطه‌ی ۱: Mean-Squared-Error(MSE)
- y : مقدار اصلی
- $\hat{y}$: مقدار خروجی شبکه

حال بایستی به کاهش تابع هزینه بپردازیم تا به بهبود عملکرد شبکه کمک کنیم. درواقع با این کار به بهترین تابع فرضیه دست پیدا خواهیم کرد. می‌توان از الگوریتم GradientDescent برای این منظور استفاده کرد. GradientDescent یکی از الگوریتم‌هایی است که برای بهینه‌سازی[17] یا به‌طور دقیق‌تر کمینه‌سازی[18] استفاده می‌شود. بدین معنا که برای مثال ما تابعی داریم و می‌خواهیم بدانیم این تابع در کجا دارای مینیمم است. درواقع GradientDescent تلاش می‌کند تا تابع $J(\theta)$ (تابع هزینه) را نسبت به θ کمینه[19] کند. یعنی θهایی را پیدا می‌کند که بهترین تابع فرضیه را به ما بدهد. (منظور از θ همان وزن‌های شبکه است).

۱۵ Regression
۱۶ Cost Function
۱۷ Optimization
۱۸ Minimization

	mean radius	mean texture	mean perimeter	mean area	mean smoothness	mean compactness	mean concavity	mean concave points	mean symmetry	mean fractal dimension	radius error	texture error	perimeter error
0	17.99	10.38	122.80	1001.0	0.11840	0.27760	0.30010	0.14710	0.2419	0.07871	1.0950	0.9053	8.589
1	20.57	17.77	132.90	1326.0	0.08474	0.07864	0.08690	0.07017	0.1812	0.05667	0.5435	0.7339	3.398
2	19.69	21.25	130.00	1203.0	0.10960	0.15990	0.19740	0.12790	0.2069	0.05999	0.7456	0.7869	4.585
3	11.42	20.38	77.58	386.1	0.14250	0.28390	0.24140	0.10520	0.2597	0.09744	0.4956	1.1560	3.445
4	20.29	14.34	135.10	1297.0	0.10030	0.13280	0.19800	0.10430	0.1809	0.05883	0.7572	0.7813	5.438
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
564	21.56	22.39	142.00	1479.0	0.11100	0.11590	0.24390	0.13890	0.1726	0.05623	1.1760	1.2560	7.673
565	20.13	28.25	131.20	1261.0	0.09780	0.10340	0.14400	0.09791	0.1752	0.05533	0.7655	2.4630	5.203
566	16.60	28.08	108.30	858.1	0.08455	0.10230	0.09251	0.05302	0.1590	0.05648	0.4564	1.0750	3.425
567	20.60	29.33	140.10	1265.0	0.11780	0.27700	0.35140	0.15200	0.2397	0.07016	0.7260	1.5950	5.772
568	7.76	24.54	47.92	181.0	0.05263	0.04362	0.00000	0.00000	0.1587	0.05884	0.3857	1.4280	2.548

area error	smoothness error	compactness error	concavity error	concave points error	symmetry error	fractal dimension error	worst radius	worst texture	worst perimeter	worst area	worst smoothness	worst compactness	worst concavity	worst concave points	worst symmetry	worst fractal dimension
153.40	0.006399	0.04904	0.05373	0.01587	0.03003	0.006193	25.380	17.33	184.60	2019.0	0.16220	0.66560	0.7119	0.2654	0.4601	0.11890
74.08	0.005225	0.01308	0.01860	0.01340	0.01389	0.003532	24.990	23.41	158.80	1956.0	0.12380	0.18660	0.2416	0.1860	0.2750	0.08902
94.03	0.006150	0.04006	0.03832	0.02058	0.02250	0.004571	23.570	25.53	152.50	1709.0	0.14440	0.42450	0.4504	0.2430	0.3613	0.08758
27.23	0.009110	0.07458	0.05661	0.01867	0.05963	0.009208	14.910	26.50	98.87	567.7	0.20980	0.86630	0.6869	0.2575	0.6638	0.17300
94.44	0.011490	0.02461	0.05688	0.01885	0.01756	0.005115	22.540	16.67	152.20	1575.0	0.13740	0.20500	0.4000	0.1625	0.2364	0.07678
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
158.70	0.010300	0.02891	0.05198	0.02454	0.01114	0.004239	25.450	26.40	166.10	2027.0	0.14100	0.21130	0.4107	0.2216	0.2060	0.07115
99.04	0.005769	0.02423	0.03950	0.01678	0.01898	0.002498	23.690	38.25	155.00	1731.0	0.11660	0.19220	0.3215	0.1628	0.2572	0.06637
48.55	0.005903	0.03731	0.04730	0.01557	0.01318	0.003892	18.980	34.12	126.70	1124.0	0.11390	0.30940	0.3403	0.1418	0.2218	0.07820
86.22	0.006522	0.06158	0.07117	0.01664	0.02324	0.006185	25.740	39.42	184.60	1821.0	0.16500	0.86810	0.9387	0.2650	0.4087	0.12400
19.15	0.007189	0.00466	0.00000	0.00000	0.02676	0.002783	9.456	30.37	59.16	268.6	0.08996	0.06444	0.0000	0.0000	0.2871	0.07039

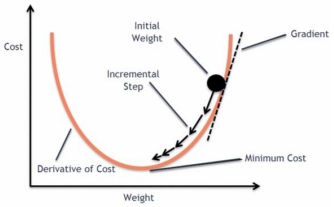
عکس ۸: تعدادی از داده‌های طبقه‌بندی‌شده مربوط به دیتاست Breast-Cancer

$$\theta_j := \theta_j - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left(h_\theta \left(x^{(i)} \right) - y^{(i)} \right) x_j^{(i)}$$

رابطه‌ی ۲

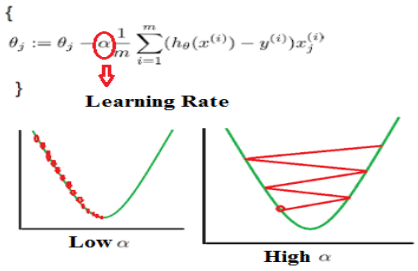
رابطه فوق آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا همگرا شود.

نمودار زیر نحوه عملکرد الگوریتم GradientDescent را به‌خوبی توصیف می‌کند.



عکس ۶

به ضریب آلفا[۲۰] در رابطه GradientDescent، نرخ یادگیری[۲۱] می‌گویند که اندازه گام ما برای حرکت را مشخص می‌کند. اگر اندازه گام بسیار بزرگ باشد ممکن است از مینیمم در نمودار فوق، که رسیدن به آن هدف ماست، عبور کنیم و واگرا[۲۲] شویم. اگر نرخ یادگیری کوچک انتخاب شود، ممکن است همگرایی دیر اتفاق بیفتد.



عکس۷

اکنون زمان مناسبی است تا به سراغ پروژه موردنظر برویم.

تشخیص سرطان سینه

برای آموزش شبکه عصبی، از مجموعه‌داده breast_cancer استفاده خواهد شد. در این دیتاست داده‌هایی مانند شعاع میانگین بافت سرطانی[۲۳]، بعد فراکتال متوسط[۲۴]، میانگین محیط[۲۵] بافت سرطانی و .... مربوط به ۵۶۹ بیمار طبقه‌بندی‌شده‌اند.

یادگیری(Training):

اگر بخواهیم یک مدل محکم بسازیم، باید پروتکل خاص تقسیم اطلاعات خود را به سه مجموعه دنبال کنیم: یکی برای آموزش[۲۶]، دیگری برای اعتبار سنجی[۲۷]

۱۹ Minimize
۲۰ Alpha
۲۱ Learning Rate

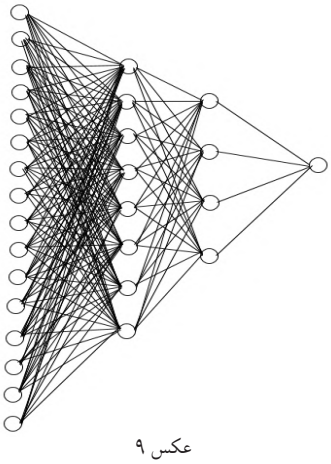
۲۲ Divergent
۲۳ Mean Radius
۲۴ Mean Fractal Dimension
۲۵ Mean Perimeter

و دیگری برای ارزیابی نهایی[۲۸].

ایده این است که مدل بر روی‌داده‌های train، آموزش می‌بینید و خود را با نتایج معیارها(دقت[۲۹]، خطا[۳۰]و غیره) که از مجموعه اعتبار سنجی دریافت می‌کند، تنظیم می‌کند.

مدل طراحی‌شده، مجموعه اعتبار سنجی را «نمی‌بیند» و به‌هیچ‌وجه روی آن آموزش داده نمی‌شود، اما ما به‌عنوان معمار، hyper parameter های مدل را مطابق با این داده‌ها تنظیم می‌کنیم[۳۱]. در یادگیری ماشین، hyper parameter، پارامتری است که مقدار آن برای کنترل روند یادگیری استفاده می شود. بنابراین به‌طور غیرمستقیم بر مدل ما تأثیر می‌گذارد زیرا به‌طور مستقیم بر تصمیمات طراحی ما تأثیر می‌گذارد. درواقع ما به مدل خود فشار می‌آوریم تا با داده‌های اعتبار سنجی به‌خوبی کار کند.

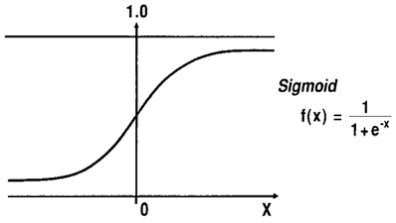
داده‌ها را به سه دسته train برای آموزش مدل، test برای ارزیابی نهایی مدل و validation برای اعتبارسنجی مدل تقسیم می‌کنیم. به‌طوری‌که ۳۳ درصد از کل داده‌ها را برای داده‌های test، ۶۷ درصد را برای داده‌های train و ۱۰ درصد از داده‌های train را برای داده‌های validation در نظر می‌گیریم. خوش‌خیم یا بدخیم بودن سرطان را به‌عنوان برچسب داده‌ها، به‌صورت صفر و یک(صفر برای بدخیم بودن و یک برای خوش‌خیم بودن سرطان) قرار می‌دهیم. شبکه عصبی طراحی‌شده شامل لایه‌های Dense (Fully-Connected) است. دلیل این نام‌گذاری این است که در این ساختار، لایه‌ها به‌صورت متوالی و پشت سرهم به هم متصل شده‌اند. می‌توانید ساختار این شبکه را در شکل زیر مشاهده کنید.



عکس ۹

با توجه به ساختار فوق، شبکه عصبی مصنوعی، بدین‌صورت طراحی‌شده است: ۱۶ نورون در لایه اول که به آن لایه ورودی[۳۲] گفته می‌شود و ۸ نورون در لایه دوم و ۴ نورون در لایه سوم که به آن‌ها لایه‌های پنهان[۳۳] گفته می‌شود و یک نورون خروجی که نشان‌دهنده خروجی شبکه است و به آن لایه خروجی[۳۴] گفته می‌شود.

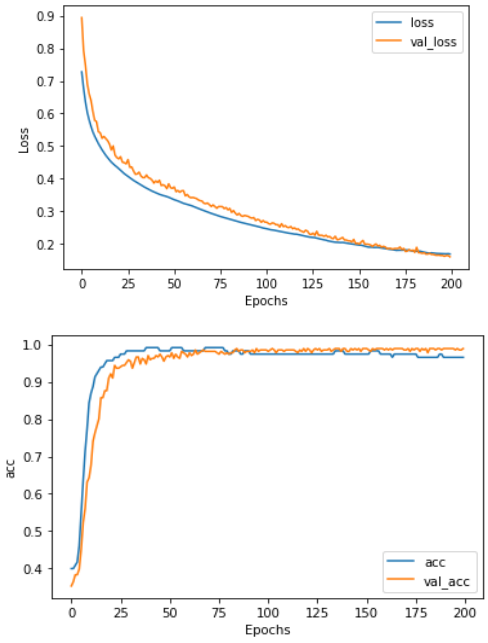
خروجی شبکه به‌صورت احتمالی بین صفر و یک است. زیرا تابع فعال‌ساز آخرین لایه sigmoid انتخاب‌شده که مقادیر بین صفر و یک را پوشش می‌دهد.



نمودار ۴

احتمال بالای ۵۰ درصد به‌عنوان سرطان خوش‌خیم و پایین‌تر از ۵۰ درصد به‌عنوان سرطان بدخیم در نظر گرفته می‌شود.در نمودار زیر می‌توانیم روند یادگیری شبکه را مشاهده کنیم.

در نمودارهای زیر خطوط مربوط به val_loss و val_acc، عملکرد مدل را روی داده های validation نشان میدهند و خطوط مربوط به loss و acc، عملکرد مدل را روی داده های train نمایش میدهد.



نمودار ۵ و ۶

می‌توان مشاهده کرد که دقت[۳۵] مدل به ازای هر دوره[۳۶] از یادگیری در حال افزایش است و همچنین میزان خطای[۳۷] مدل نیز در حال کاهش است. منظور از دوره

۲۶ Train
۲۷ Validation
۲۸ Test
۲۹ Accuracy

۳۰ Loss
۳۱ Hyper Parameters Tune
۳۲ Input Layer
۳۳ Hidden Layers
۳۴ Output Layers

این است که مدل چند بار داده‌ها را به‌صورت کامل می‌بیند که در این پروژه مقدار epoch را برابر ۲۰۰ قرار داده‌ایم. به‌طوری‌که شبکه داده‌ها را ۲۰۰ بار به‌طور کامل می‌بیند.

ارزیابی (Evaluation):

پس از آموزش، به ارزیابی مدل ایجادی می‌پردازیم. اکنون داده‌های test را که برای ارزیابی مدل از پیش جدا کرده بودیم، به مدل می‌دهیم. بدین‌صورت که ما داده‌های مربوط بیمار را به مدل می‌دهیم اما برچسب مربوط به آن داده‌ها را نزد خودمان نگه می‌داریم و پس‌ازاینکه مدل پیش‌بینی خودش را انجام داد، به مقایسه پیش‌بینی مدل و برچسب واقعی مربوط به داده‌ها می‌پردازیم.

در ارزیابی‌های انجام‌شده در مرحله آزمایش، دقت مدل ۹۹/۴ درصد بوده است.

نتیجه‌گیری:

به نظر می‌رسد هوش مصنوعی در کنار توانایی‌های ویژه خود برای حل مشکلات بشر، می‌تواند در حوزه پزشکی و تشخیص بیماری‌ها به‌ویژه بیماری‌های خاص، در خدمت بشر درآید. لذا در این پروژه سعی شده است تا از این امکان برای تشخیص خوش‌خیم یا بدخیم بودن سرطان سینه به‌عنوان یکی از بیماری‌های چالش ساز بهره برده شود.

مراجع:

1. American Cancer Society. Annual Report to the Nation 2018: National Cancer Statistics.1

2. Poole, Mackworth & Goebel 1998, p. 1

3. Russell & Norvig 2003, p. 55.

4. Definition of AI as the study of intelligent agents:

- Poole, Mackworth & Goebel (1998), which provides the version that is used in this article. These authors use the term "computational intelligence" as a synonym for artificial intelligence.[1]
- Russell & Norvig (2003) (who prefer the term "rational agent") and write "The whole-agent view is now widely accepted in the field".[2]
- Nilsson 1998
- Legg & Hutter 2007

5. Russell & Norvig 2009, p. 2.

۳۵ Accuracy
۳۶ Epoch
۳۷ Loss

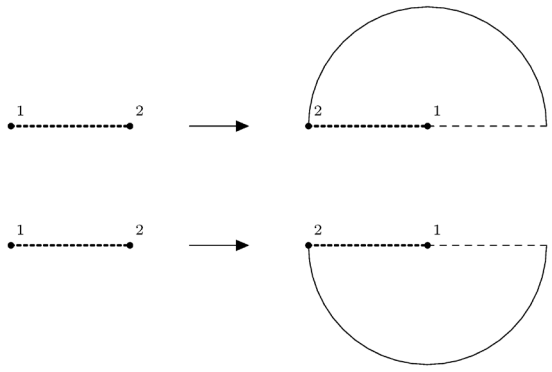
انیون‌ها[1] و تمیزناپذیری در مکانیک کوانتومی

محمد شریفی کیاسری

ذرات یکسان یکی از تفاوت‌های مکانیک کلاسیک و مکانیک کوانتومی است. به این صورت که در مکانیک کلاسیک می‌توانیم بدون ایجاد خللی در ذرات، مسیر آن‌ها را دنبال کنیم و آن‌ها را از هم تمایز دهیم. در نتیجه دو پیکربندی کلاسیک که با جابجایی دو ذره یکسان به‌هم تبدیل می‌شوند، از لحاظ فیزیکی معادل نیستند. ولی در مکانیک کوانتومی، با توجه به اینکه اندازه‌گیری با اختلال در سیستم همراه است؛ نمی‌توانیم چیزی از جنس مسیر را دنبال کنیم و استدلال قبل کار نمی‌کند. درحقیقت در مکانیک کوانتومی نمی‌توان بین دو ذره یکسان تفاوتی قائل شد و آزمایشی وجود ندارد که آن‌ها را از هم تمایز دهد. در نتیجه، دو پیکربندی کوانتومی که با جابجایی دو ذره یکسان به‌هم تبدیل می‌شوند، از لحاظ فیزیکی معادل هم هستند. به این خاصیت تمییزناپذیری می‌گوییم. در دروس دانشکده با بوزون‌ها و فرمیون‌ها آشنا شده‌ایم، قصد داریم در این نوشتار با انیون‌ها که نوعی دیگر از ذرات یکسان هستند آشنا شویم.

mohammadsharifi2079@gmail.com

وابستگی به بعد فضا



شکل۱: دو صورت ممکن جابجا کردن دو ذره

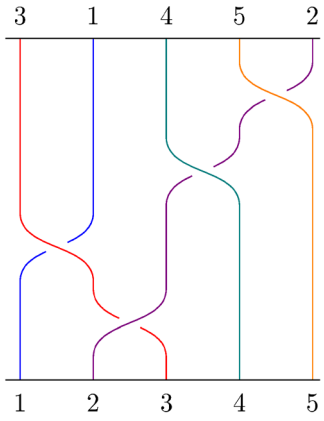
جابجا کردن دو ذره را می‌توان اینگونه انجام داد که یکی از ذرات را ۱۸۰ درجه ساعتگرد دور دیگری بچرخانیم و سپس با یک انتقال دو ذره را به جای قبلی‌شان باز گردانیم. حال این چرخاندن در حالتی که فضای ما دو بعدی است و ذرات ما در دو بعد محدود هستند، را می‌توان به گونه‌ی دیگری انجام داد. به این صورت که ذره‌ی دوم را ۱۸۰ درجه پادساعتگرد بچرخانیم (شکل ۱). این دو صورت جابجایی دو ذره با هم فرق دارند زیرا نمی‌توان به صورت پیوسته یکی را به دیگری تبدیل کرد، ولی در حالت سه بعدی و ابعاد بالاتر، می‌توان با چرخاندن مسیر ساعتگرد در بعد سوم به مسیر پادساعتگرد رسید و این دو صورت جابجایی دو ذره کاملاً شبیه هم خواهند شد. این محدودیت در فضای دو بعدی باعث می‌شود که انتظار رفتار نامعمولی از ذرات محدود در دو بعد داشته باشیم.

گروه گیسو[۲]

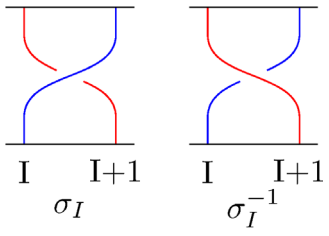
قبل از بررسی بیشتر و شروع تلاش برای پیدا کردن گروه تقارنی، گروه گیسو را معرفی می‌کنیم. گروه گیسو B_N معادل است با حالت‌های گیسویی که می‌توان با N ریسمان ساخت. برای فهم بهتر به شکل۲ توجه کنید. در این شکل یک عضو از گروه B_5 را داریم. گروه گیسو خیلی به گروه متقارن[۳] شبیه است با این تفاوت که نحوه‌ی جابجایی ریسمان‌ها، یعنی اینکه کدام ریسمان روی دیگری است مهم است.

گروه گیسو B_N را می‌توان با N مولد تولید کرد به این صورت که σ_I به معنای جابجایی ریسمان Iام و ریسمان $I+1$ام است به طوری که ریسمان I روی ریسمان $I+1$ قرار گیرد. عضو وارون آن هم σ_I^{-1} جابجایی همین دو ریسمان است ولی ریسمان $I+1$ روی I قرار می‌گیرد.

آنگاه داریم که $B_N = \langle \sigma_1, \cdots, \sigma_{N-1} \rangle$ و به ازای $|i-j| \geq 2$ داریم $\sigma_i\sigma_j = \sigma_j\sigma_i$ و $\sigma_i\sigma_{i+1}\sigma_i = \sigma_{i+1}\sigma_i\sigma_{i+1}$. درستی این روابط را با کشیدن شکل‌های هر رابطه می‌توان متوجه شد. دقت کنید که همین روابط را در گروه متقارن هم داریم ولی برای مولدهای گروه متقارن داریم $\sigma_i^2 = 1$ که در گروه گیسو اینگونه نیست. در حقیقت همین تفاوت باعث تفاوت رفتار ذرات یکسان در حالت دو بعدی و حالات ابعاد بالاتر است.



شکل۲: عضوی از گروه B_5



شکل۳: مولدهای گروه گیسو

فضای پیکربندی

با توجه به اینکه در این موضوع جابجا کردن مکان دو ذره مطرح است، فضای پیکربندی ما شامل اطلاعات مکان ذرات است. در نتیجه وقتی N ذره در یک فضای d بعدی داریم، فضای پیکربندی آن به نظر باید $(\mathbb{R}^d)^N$ باشد ولی دقت کنید که دو ذره نمی‌توانند یک مکان اشغال کنند و از طرفی با جابجا کردن ذرات همان پیکربندی را داریم؛ پس هر دنباله‌ی Nتایی از مکان‌ها با همه‌ی جایگشت‌های Nتایی آن معادل است و در نتیجه فضای پیکربندی به فضای زیر تقلیل می‌یابد.

$$M_N^d = \frac{(\mathbb{R}^d)^N - \Delta}{S_N}$$

۱ Anyons
۲ braid
۳ symmetric

که Δ حالاتی است که دو ذره مکان یکسان اشغال کرده‌اند و S_N گروه متقارن Nتایی. عملیات جابجا کردن دو ذره، به این معنا است که ما در این فضای پیکربندی از نقطه‌ای که در حال حاضر هستیم حرکت کنیم و دوباره به آن نقطه برگردیم؛ یعنی یک خم بسته (دور) در فضای پیکربندی. حال برای پیدا کردن روش‌های متفاوت جابجا کردن دو ذره و گروه تقارنی آن دست به دامن توپولوژی می‌شویم و از ابزارهای آن کمک می‌گیریم.

گروه بنیادی[۴]

در یک فضای توپولوژیک X، یک خم بسته‌ی گذرنده از نقطه‌ی P، معادل با یک تابع پیوسته $f : [0, 1] \to X$ است که $f(0) = f(1) = P$. یک هموتوپی[۵] بین دو خم بسته یک نگاشت پیوسته است که یک خم را به دیگری تبدیل می‌کند. به عبارتی یک هموتوپی بین دو خم $f, f' : [0, 1] \to X$ (گذرنده از نقطه‌ی P) یک نگاشت پیوسته‌ی $h : [0, 1] \times [0, 1] \to X$ است که $h(0, t) = h(1, t) = P$ ، $h(t, 0) = f(t)$ و $h(t, 1) = f'(t)$. دقت کنید که پارامتر اول نگاشت حکم زمان را دارد و روی خم‌ها حرکت می‌کند در نتیجه در لحظه صفر و یک همیشه روی نقطه‌ی P هستیم و در پارامتر دوم خم‌ها تغییر می‌کنند که در مقدار صفر خم f را داریم و در مقدار یک خم f' و در این بازه خم f به f' به صورت پیوسته تبدیل می‌شود. دو خمی که بین آن‌ها یک رابطه هموتوپی برقرار باشد را «هموتوپ» می‌نامند و می‌توان دید که هموتوپ بودن یک رابطه هم‌ارزی است و خم‌های یک فضای توپولوژیک را به یک‌سری کلاس هم‌ارزی افراز می‌کند. مجموعه‌ی این کلاس‌ها را با $\pi_1(X, P)$ نشان می‌دهند. ما در مسئله خودمان به دنبال روش‌های متفاوت جابجا کردن ذرات یکسان بودیم، که در فضای پیکربندی معادل خواهد شد با دورهای متفاوت گذرنده از یک نقطه یعنی اعضای $\pi_1(X, P)$. نکته‌ی جالبی که وجود دارد این است که یک ضرب طبیعی بین خم‌ها وجود دارد. ضرب دو خم f_1 و f_2 اینگونه تعریف می‌شود:

$$f_1 \cdot f_2 : [0, 1] \to X$$

$$(f_1 \cdot f_2)(t) = \begin{cases} f_1(2t) & t \in [0, 1/2] \\ f_2(2t - 1) & t \in (1/2, 1] \end{cases}$$

و سپس این ضرب را می‌توان به کلاس‌ها تعمیم داد

$$[f_1] \cdot [f_2] = [f_1 \cdot f_2]$$

حال با این ضرب می‌توان دید که $\pi_1(X, P)$ تبدیل به گروه خواهد شد. به $\pi_1(X, P)$ گروه بنیادی می‌گویند.

اگر فضای توپولوژیک X همبند مسیری باشد می‌توان با نگاشت پیوسته P را به نقاط دیگر برد و در نتیجه گروه بنیادی همه‌ی نقاط یکسان خواهد بود و در این صورت گروه بنیادی را با $\pi_1(X)$ نشان می‌دهیم. برای درک بهتر گروه بنیادی یک فضای توپولوژیک به دو مثال می‌پردازیم:

اگر X فضای اقلیدسی باشد، آنگاه به وضوح و شهوداً، هر دوری را می‌توان بدون هیچ مشکلی به صورت پیوسته به نقطه تبدیل کرد در نتیجه همه‌ی دورها با دور بدیهی ($f(t) = P$) هموتوپ هستند و گروه بنیادی، گروه بدیهی تک عضوی خواهدشد $\pi_1(\mathbb{R}^d) \cong \{e\}$. اگر X یک دایره باشد، مسئله نابدیهی خواهد بود. نقاط دایره را با زاویه‌ی مرکزی مدل کنید. آنگاه دو دور زیر باهم هموتوپ نخواهند بود.

$$e(t) = 0$$
$$f(t) = 2\pi t$$

دور e ، صرفاً در نقطه باقی می‌ماند ولی دور f دایره را یک دور پادساعتگرد می‌زند و می‌توان دید که هیچ هموتوپی بین این دو دور وجود ندارد. حال با توجه به ضربی که بالاتر تعریف شده است، می‌توان دید که اعضای گروه بنیادی معرف تعداد دور پادساعتگرد (یا ساعتگردی) هستند که یک دور دایره را دور می‌زند. (دقّت کنید که عضو وارون f دور پادساعتگرد است.) در نتیجه گروه بنیادی ما معادل با $\mathbb{Z}$ است با عمل جمع $\pi_1(S^1) \cong \mathbb{Z}$.

یک ویژگی دیگر گروه بنیادی این است که گروه بنیادیِ فضای توپولوژیک حاصل‌ضرب، معادل با حاصل‌ضربِ گروه بنیادی هر فضا است. به عبارتی:

$$\pi_1(A \times B) \cong \pi_1(A) \times \pi_1(B)$$

حال با این ابزار به بررسی فضای پیکربندی خود می‌پردازیم.

گروه تقارنی

ما به دنبال گروه تقارنی ذرات یکسان بودیم که معادل شد با نحوه‌های جابجا کردن N ذره. در ادامه دیدیم که در فضای پیکربندی معادل با نحوه‌های مختلف خم‌های بسته بود. در نهایت با معرفی هموتوپی خم‌هایی که یکسان هستند را در یک کلاس قرار دادیم و به گروه بنیادی رسیدیم. این گروه بنیادی همان گروه تقارنی است. در نتیجه ما درنهایت باید $\pi_1\left(M_N^d\right)$ را بیابیم. جواب نهایی به صورت زیر است

۴ fundamental group
۵ homotopy

$$(M_N^d) \cong \begin{cases} S_N & d \geq ۳ \\ B_N & d = ۲ \end{cases}$$

به دلیل پیچیدگی کار این حکم را برای حالت کلی اثبات نمی‌کنیم و صرفا برای گرفتن شهود تفاوت بین حالت دو بعدی و دیگر حالت‌ها به بررسی حالت دو ذره یعنی $N = ۲$ می‌پردازیم.

در حالت $N = ۲$، دو ذره دارای بردار مکان‌های $\mathbf{r}_۱$ و $\mathbf{r}_۲$ هستند، که $\mathbf{r}_۱ \neq \mathbf{r}_۲$ و $(\mathbf{r}_۱, \mathbf{r}_۲) \sim (\mathbf{r}_۲, \mathbf{r}_۱)$ حال با تغییر متغیر مرکز جرمی می‌توان $M_d^۲$ را بهتر شناخت. تعریف کنید $\mathbf{R} = \mathbf{r}_۱ + \mathbf{r}_۲$ و $\mathbf{r} = \mathbf{r}_۱ - \mathbf{r}_۲$. با این متغیرها خواهیم داشت که $M_d^۲$ عبارت است از دوتایی‌های $(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ که $\mathbf{R}$ شرطی ندارد ولی $\mathbf{r}$ نباید برابر با بردار صفر باشد و همچنین داریم $\mathbf{r} \sim -\mathbf{r}$. حال دقت کنید که $\mathbf{r}$ را نیز می‌توان به دو بخش تقسیم کرد $\mathbf{r} = |\mathbf{r}|\,\hat{\mathbf{r}}$ که اندازه‌ی $\mathbf{r} \sim -\mathbf{r}$ عضو اعداد حقیقی مثبت است یعنی $\mathbb{R}^+$ و شرطی که داشتیم یعنی $\mathbf{r} \sim -\mathbf{r}$ تبدیل خواهد شد به $\hat{\mathbf{r}} \sim -\hat{\mathbf{r}}$ که شرط فضای تصویری حقیقی[۶] $\mathrm{RP}^{d-۱}$ است در نتیجه خواهیم داشت:

$$M_۲^d = \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^+ \times \mathrm{RP}^{d-۱}$$

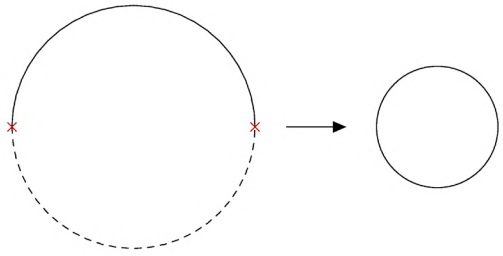
حال با استفاده از بحث فضاهای توپولوژیک حاصلضربی و بدیهی بودن گروه‌های بنیادی فضای اقلیدوسی و محور اعداد حقیقی مثبت خواهیم داشت:

$$\pi_۱\left(M_۲^d\right) \cong \pi_۱(\mathbb{R}^d) \times \pi_۱(\mathbb{R}^+) \times \pi_۱(\mathrm{RP}^{d-۱})$$
$$\cong \pi_۱(\mathrm{RP}^{d-۱})$$

در نتیجه کل مسئله تقلیل یافت به پیدا کردن گروه بنیادی فضای تصویری حقیقی که مسئله‌ی حل‌شده‌ای در ریاضیات است ولی در ادامه به بررسی حالات دو بعدی و سه بعدی آن می‌پردازیم.

حالت دو بعدی

در حالت دو بعدی فضای تصویری حقیقی $\mathrm{RP}^۱$ شامل همه‌ی بردار یکه‌های دو بعدی است که هر بردار یکه با قرینه خودش هم ارز است، به عبارتی دایره واحد که نقاط روبه‌رو قطری هم‌ارزند. حال این هم‌ارزی را می‌توان با انتخاب یک نیم‌دایره ساده کرد. در نتیجه این فضا با یک نیم‌دایره که دو سر آن با هم هم‌ارزند یکریخت است. حال دو سر نیم‌دایره، از آن‌جا که هم‌ارزند، یک نقطه هستند و می‌توانیم آن‌ها را به‌هم بچسبانیم و در نتیجه به یک دایره می‌رسیم. پس $\mathrm{RP}^۱$ با دایره یکریخت است.



شکل۴: $\mathrm{RP}^۱$ با دایره یکریخت است.

حال داریم:

$$\pi_۱(M_۲^۲) \cong \pi_۱(\mathrm{RP}^۱) \cong \pi_۱(S^۱)$$

گروه بنیادی دایره را هم پیشتر در متن دیدیم که با $\mathbb{Z}$ یکریخت است. از طرفی $B_۲$ تنها یک مولد دارد و شرطی روی آن ندارد، پس با $\mathbb{Z}$ یکریخت است و داریم

$$\pi_۱(M_۲^۲) \cong \pi_۱(S^۱) \cong \mathbb{Z} \cong B_۲$$

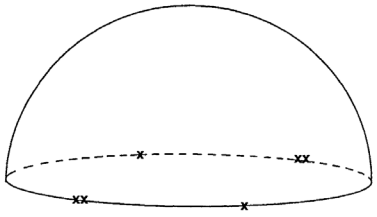
که همان چیزی است که می‌خواستیم.

حالت سه بعدی

در حالت سه بعدی فضای تصویری حقیقی $\mathrm{RP}^۲$ مشابه قسمت قبل یک کره خواهد شد که نقاط روبه‌رو قطری هم‌ارزند. از این رو می‌توان آن را یک نیم‌کره در نظر گرفت که نقاط روبه‌رو قطری روی قاعده‌ی نیم‌کره هم‌ارزند (شکل ۵). حال در این، خم‌های بسته دو نوع هستند، یک نوع آن مانند خم $q_۱$ در شکل ۶ است که می‌توان آن‌ها را جمع کرد و نوع دیگر از نوع هم‌های $q_۲$ است که نمی‌توان آن‌ها را جمع کرد و با $q_۱$ هموتوپ نیستند. از طرفی اثبات این موضوع سخت نیست که هر خم از نوع $q_۲$ را اگر به توان دو برسانیم به خمی از نوع $q_۱$ خواهیم رسید و در نتیجه گروه بنیادی این فضا، دو عضوی است یعنی با $\mathbb{Z}_۲$ یکریخت است که با گروه متقارن $S_۲$ یکریخت است. در نتیجه

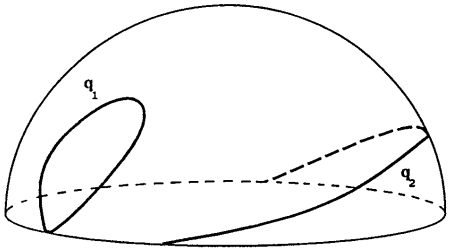
$$\pi_۱(M_۲^۳) \cong \mathbb{Z}_۲ \cong S_۲$$

که همان چیزی است که می‌خواستیم.



شکل۵: $\mathrm{RP}^۲$ با نیم‌دایره‌ای که نقاط روبرو قطری روی قاعده هم‌ارز هستند یکریخت است.

۶ real projective space



شکل۶: دو نوع خم بسته در RP^2.
q_1 جمع می‌شود و به خم بدیهی تبدیل می‌شود ولی q_2 را نمی‌توان جمع کرد.

نمایش گروه تقارن در فضای هیلبرت

حال به پیدا کردن نمایش یک بعدی این گروه‌های تقارن می‌پردازیم تا ببینیم این تقارن در فضای هیلبرت چه صورتی پیدا می‌کند. در حالت $d \geq 3$ گروه تقارن ما S_N خواهد بود. در این حالت برای مولدهای گروه داریم $\sigma_i^2 = 1$. اگر P نمایش یک بعدی این گروه در فضای هیلبرت باشد داریم:

$$P(\sigma_i)^2 = P(\sigma_i^2) = P(1) = 1$$

در نتیجه داریم $P(\sigma_i) = \pm 1$. از طرفی با استفاده از رابطه‌ی $\sigma_i\sigma_{i+1}\sigma_i = \sigma_{i+1}\sigma_i\sigma_{i+1}$ و خاصیت ضربی نمایش، خواهیم‌داشت که $P(\sigma_i) = P(\sigma_{i+1})$. در نتیجه، نمایش همه‌ی مولدها یکی است. حال دو جواب داریم، یکی این است که نمایش همه‌ی مولدها و در نتیجه همه‌ی اعضا یک شود، یعنی نمایش بدیهی، که به ما رفتار بوزون‌ها را می‌دهد.

$$\forall \alpha \in S_N : P(\alpha)\,|\psi\rangle = |\psi\rangle$$

و دیگری اینکه نمایش‌ها همه مولدها «-1» شود، یعنی نمایش علامت، که به ما رفتار فرمیونی را می‌دهد.

$$\forall \sigma_i : P(\sigma_i)\,|\psi\rangle = -\,|\psi\rangle$$

و برای جایگشت دلخواه، در صورتی که عدد جایگشت زوج باشد، حالت کوانتومی تغییر نمی‌کند و اگر فرد باشد، حالت کوانتومی در «-1» ضرب خواهد شد. در حالت $d = 2$ گروه تقارن ما B_N است و شرط $\sigma_i^2 = 1$ را نداریم و با استفاده از دو رابطه‌ی باقی‌مانده هم تنها به این رابطه می‌رسیم که $P(\sigma_i) = P(\sigma_{i+1})$. در نتیجه هیچ شرطی روی این مقدار نداریم و تغییر فاز حالت می‌تواند هر مقداری باشد

$$\forall \sigma_i : P(\sigma_i)\,|\psi\rangle = e^{i\nu\pi}|\psi\rangle$$

که نتیجه می‌دهد اسپین ذره، s برابر با $\nu/2$ است و هر مقداری می‌تواند داشته باشد (Any-one!) و به این ذرات انیون می‌گویند.

در نتیجه اگر ما در سیستمی، ذرات را مقید به دو بعد فضایی بکنیم، رفتار آماری آن‌ها نه لزوما بوزونی خواهد شد و نه لزوما فرمیونی و رفتاری انیونی خواهند داشت.

مراجع:

1)Julian Lang, Anyons, Braid statistics in quantum mechanics. (2018)

2)F. Wilczek, Quantum Mechanics of Fractional-Spin Particles. (1982)

صحت روش‌های کامپیوتری در دینامیک‌های غیرخطی

مریم رحیمی | علی گودرزی
| محمدجواد ولی‌زاده

استاد راهنما: دکتر فاخته قنبرنژاد

هنگامی که سخن از روش‌های کامپیوتری و خطای آن‌ها در حلّ مسائل می‌شود، ناخودآگاه خطای حل‌های عددی مربوط به روش‌های معروفی مثل رونژ-کوتا[1]، اویلر[2] و... در ذهنمان می‌آید. این مسائل، در طی سال‌ها، بسیار مورد بحث بوده‌اند. ولی این همه‌ی ماجرا نیست! در کامپیوتر خطاهای دیگری هم وجود دارند که ممکن است در نگاه اول توجه‌مان را جلب نکنند؛ اما همین بی‌توجهی می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای را در پی داشته‌باشد.

Alitlou.goodarzi@gmail.com

محاسبات عددی در معادله‌ی لورنز تعمیم‌یافته

شاید اگر با یک سامانه‌ی خطّیِ خوش‌رفتار مواجه باشیم، بررسی خطای کامپیوتر خیلی مهم نباشد امّا در سامانه‌های غیرخطّی و به خصوص آشوبناک، مسئله فرق می‌کند. می‌دانیم که سامانه‌های آشوبناک، بی‌نهایت به شرایط اوّلیه حسّاس هستند و اختلافی کوچک در شرایط اوّلیه‌ی دو مسیر در فضای فاز[3]، به صورت نمایی با گذشت زمان بیشتر می‌شود:

$$\|\delta(t)\| \sim \|\delta_0\| e^{\lambda t} \qquad (1)$$

که به λ نمای لیاپانوف[4] می‌گویند. هر چه نمای لیاپانوف سامانه از صفر بزرگتر باشد، به منزله‌ی این است که با آشوب شدیدتری مواجه هستیم. با توجه به رابطه‌ی (۱)، توقّع این‌که خطای کوچک محاسبات کامپیوتر نیز باعث شود که با گذشت زمان به شکل نمایی از جواب اصلی مسئله فاصله بگیریم، دور از انتظار نیست. شاید بگویید اگر نتوانیم از روش‌های عددی با خیال آسوده استفاده کنیم، بدبخت می‌شویم! زیرا اکثر تحلیل‌های ما از دینامیک‌های غیر خطی مبتنی بر حل‌های عددی است. بگذارید از یک مثال شروع کنیم تا وخامت موضوع آشکارتر شود. برای اینکار از یک معادله‌ی لورنز[5] تعمیم‌یافته استفاده می‌کنیم (Strogatz, 2015):

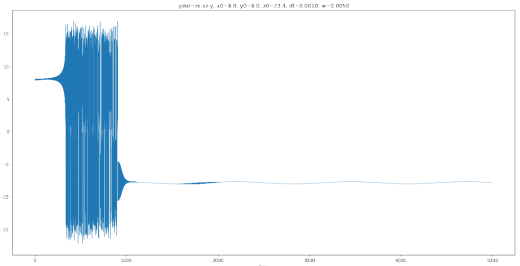
$$\dot{x} = \sigma(y - x) \qquad (2)$$

$$\dot{y} = rx - xz - y \qquad (3)$$

$$\dot{z} = xy - bz \qquad (4)$$

که در آن $b = 8/3$ و $\sigma = 10$ و $r = 24.4 + \sin(\omega t)$ می‌باشد.

از روش رونژ-کوتای مرتبه‌ی ۴ برای بررسی تحوّل این سامانه استفاده می‌کنیم. برای شرایط اوّلیه‌ی مشخّص، دستگاه معادلات دیفرانسیل بالا را حل و تحوّل مؤلفه‌ی x را برحسب زمان رسم می‌کنیم.

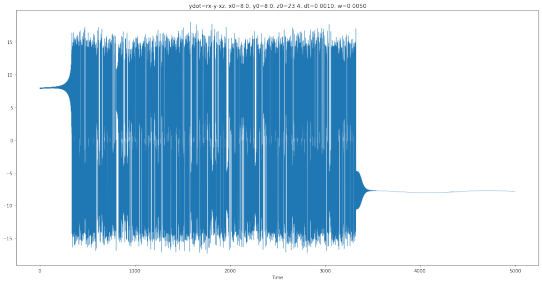


شکل۱: نمودار تحوّل x برحسب زمان بر اساس رابطه‌ی (۳)

حال رابطه‌ی (۳) را به شکل دیگری می‌نویسیم که از لحاظ ریاضی با هم معادل‌اند:

$$\dot{y} = rx - y - xz \qquad (5)$$

انتظار داریم روابط بالا یکسان باشند. برای بررسی این موضوع، دوباره نمودار تحوّل سامانه را رسم می‌کنیم.



شکل۲: نمودار تحوّل x برحسب زمان بر اساس رابطه‌ی (۵)

همان‌طور که می‌بینیم، نتیجه متفاوت است. در حقیقت سامانه‌ای که با رابطه‌ی (۵) به جای رابطه‌ی (۳) تحوّل پیدا کرده‌است، حدود دو هزار واحد زمانی بیشتر در فاز آشوبناک می‌ماند. امّا علّت این اختلاف چیست؟ مشکل از روابط ما نیست؛ بلکه این کامپیوتر است که به علّت روش‌های عددی مورد استفاده‌اش برای جمع، با $\dot{y} = rx - y - xz$ دقیقاً مانند $\dot{y} = rx - xz - y$ رفتار نمی‌کند!

خب، احتمالاً تا الآن تا حدودی به صحّت روش‌های کامپیوتری شک کرده‌اید؛ امّا اجازه دهید شک شما را بیشتر کنیم.

آشوب محاسباتی مفهومی است که اوّلین بار توسط لورنز (Lorenz, 1989) بوجود آمد و مورد مطالعه قرار گرفت. لورنز نشان داد که گاهی اوقات، سامانه‌ای که آشوبناک نیست می‌تواند به خاطر گسسته‌سازی در روش عددیِ استفاده‌شده، آشوبناک شود. به این آشوب، که آشوبِ ذاتی سامانه نیست و به علّت خطای روش‌های عددی ایجاد می‌شود، آشوب محاسباتی می‌گویند. عکس این قضیه هم ممکن است اتفاق بیفتد؛ به این معنا که سامانه‌ای که آشوب ذاتی دارد، به علّت خطای روش‌های عددی، دیگر رفتار آشوبناک نشان ندهد که به این پدیده، سرکوب آشوب می‌گویند.

آشوب محاسباتی در شبکه‌های پیچیده

امروزه، بررسی شبکه‌های پیچیده در طیف وسیعی از علوم کاربرد دارد. حضور آشوب در شبکه‌های پیچیده هم متداول است و آشوب محاسباتی نیز در آن به تازگی

۱ Runge-Kutta
۲ Euler
۳ Trajectory
۴ Lyapunov Exponent
۵ Lorenz Equation

دیده شده‌است (Erivelton G Nepomuceno, Matjaž Perc, 2019).

شبکه‌ی لجستیک

هر شبکه، با یک سری ویژگی شناخته می شود؛ تعداد رأس‌ها، N، تعداد یال‌ها، k و ماتریس مجاورت، A، که وضعیت وجود یا عدم وجود یال (ارتباط) بین هر دو رأس شبکه را نشان می‌دهد. همسایگان یک رأس، همه‌ی رئوسی هستند که با یال به آن رأس متصل شده‌اند و با آن ارتباط دارند. حال اگر شبکه دچار تحوّل شود، یعنی رئوس آن دینامیک داشته باشند، قانون تحوّل رئوس را هم باید مشخص کرد.

شبکه‌ای که ما بررسی کرده‌ایم، شبکه ای با N=۱۰۰۰ و k=۳۰۰۰ است که ماتریس مجاورت آن، به صورت تصادفی تعیین می‌شود؛ به عبارت دیگر شبکه اردوش-رنی[۶] است. اساس تحوّل هر رأس شبکه، با نگاشت لجستیک[۷] (رابطه‌ی(۶)) و تاثیر رئوس همسایه بر همدیگر داده می‌شود. (رابطه‌ی (۷))

$$x^{k+1} = f(x^k) = \mu x^k(1 - x^k) \qquad (۶)$$

که x^k ، حالت در قدم زمانی k ام را نشان می‌دهد و همچنین $\mu \in [0,4]$.

$$x_i^{k+1} = f(x_i^k) - c\sum_{j=1}^{N} a_{ij} f(x_j^k) \qquad (۷)$$

که $x_i{}^k$، حالت راس iام در قدم زمانی kام را نشان می‌دهد. همچنین $c>0$ ضریب جفت‌شدگی شبکه است که قدرت اثرگذاری رئوس همسایه را بر هم مشخص می‌کند و a_{ij}ها، عناصر ماتریس لاپلاسین (رابطه‌ی(۹)) هستند:

$$L = A - D, \qquad (۸)$$

$$A: Adjacency\ matrix, D: Degree\ matrix$$

$$L = \begin{pmatrix} d_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & d_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{pmatrix} \qquad (۹)$$

$$d_{ii} = -\sum_{j=1, j\neq i}^{N} a_{ij} \qquad (۱۰)$$

بنابراین، رابطه‌ی (۷) به فرم ماتریسی به شکل رابطه‌ی (۱۱) در می‌آید:

$$X^{k+1} = (I - cL) f(X^k) \qquad (۱۱)$$

که I ماتریس همانی N × N است. استفاده از ماتریس لاپلاسین برای تحقّق این خواسته است که در هر مرحله چیزی از بیرون وارد نشود مگر خود تحوّلی که بر اساس معادله‌ی لجستیک برای هر رأس به وجود می‌آید. جملات قطری که علامت منفی دارند، باعث می‌شوند این اتّفاق بیفتد؛ بدین صورت که بین رئوس i و j ، هر مقدار که از اولی کم شده، به دومی اضافه می‌شود و بالعکس. برای درک بهتر شبکه‌ی دینامیکی داده شده، فرض کنید در یک کشور (شبکه)، انسان‌ها می‌توانند در N حزب عضو (یا طرفدار آن) باشند (که بخشی از افراد جامعه می‌توانند طرفدار حزبی نباشند و به مرور زمان به یکی از احزاب گرایش پیدا کنند). هر کدام از این احزاب را یک رأس شبکه در نظر بگیرید که حالت هر رأس، تعداد افراد عضو آن حزب هستند. در هر گام زمانی، تعداد همه‌ی طرفداران پایسته است (یعنی پایستگی جمعیت داریم). نتیجه ی ارتباط این حزب با باقی احزاب، در زبان شبکه یعنی جمعیت (حالت) قدم زمانی بعدی هر حزب، مطابق رابطه‌ی(۱۱)، به صورت تفاضل یک و تأثیر تعداد احزاب رقیب (همسایه)، که اعضای آن تحت تأثیر تبلیغات آن هستند (که ضریب جفت‌شدگی قدرت اثرگذاری تبلیغات را در شبکه نشان می دهد)، ضربدر جمعیت قدم زمانی بعدی حزب که با نگاشت لجستیک داده می‌شود، به‌دست می‌آید.

در این بررسی، μ=۲/۵ و حالت اولیه‌ی تمامی رئوس در نزدیکی نقطه‌ی ثابت این نگاشت لجستیک، یعنی x_0=۰/۶ داده شده‌است. در شبکه‌ی ساخته شده، به تحوّل رأس با بیش‌ترین درجه به ازای ضرایب جفت‌شدگی مختلف توجه شده‌است.

دوشاخگی واقعی یا خیالی؟

به ازای ضریب جفت‌شدگی c=۰/۰۶۹۹۴۰ ابتدا از رابطه‌ی (۱۲) برای تحوّل سامانه استفاده می‌کنیم و در آخر، نمودار تحوّل زمانی رأس با بیش‌ترین درجه را رسم می‌کنیم (شکل ۳-آ):

$$f(x_i^k) = \mu x^k(1 - x^k) \qquad (۱۲)$$

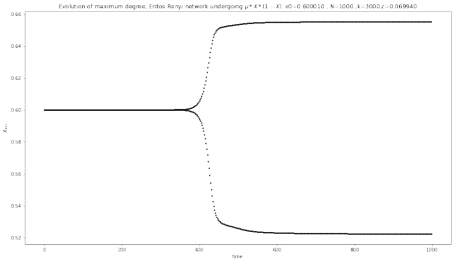
حال فقط یک پرانتز به سیستم اضافه می‌کنیم که معادله را از لحاظ ریاضیاتی تغییر نمی‌دهد:

$$f(x_i^k) = \mu(x^k(1 - x^k)) \qquad (۱۳)$$

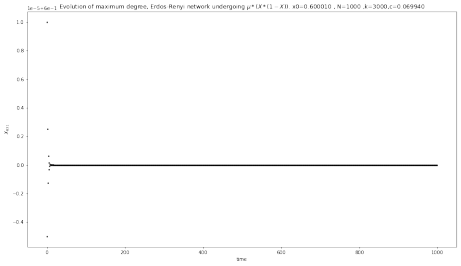
انتظار داریم که همان نتیجه را دوباره مشاهده کنیم ولی

۶ Erdös–Rényi
۷ Logistic map

نتیجه مطابق انتظار ما پیش نمی‌رود. نتیجه در شکل ۳-ب آمده است.



آ) تحوّل بر اساس رابطه‌ی (۱۲)



ب) تحوّل بر اساس رابطه‌ی (۱۳)

شکل۳: نمودار تحوّل رأس با بیش‌ترین درجه برحسب زمان برای شبکه‌ی اردوش-رنی و تحت تحوّل رابطه‌ی (۱۱)

می‌بینیم که نتیجه به طور کلّی عوض می‌شود. در حالت اوّل ما یک دوشاخگی مشاهده می‌کنیم که در حالت دوّم، خبری از آن نیست. چه نتیجه ای باید بگیریم؟ آیا باید بگوییم تحوّل واقعی همان نقطه‌ی ثابت به دست آمده است و دوشاخگی به علّت خطای محاسبات ایجاد شده‌است و یا برعکس، بگوییم دوشاخگی واقعی است و خطای محاسباتی باعث سرکوب این دوشاخگی شده‌است؟ بحران قضیه این‌جا مشخّص‌تر می‌شود که ما تقریباً به غیر از روش‌های کامپیوتری چاره‌ی دیگری نداریم و اگر قرار است به کامپیوتر استناد کنیم کدام جواب را باید در نظر بگیریم!؟

نتیجه‌گیری

با اینکه تعدادی راه برای مقابله با خطاهای این‌چنینی ارائه شده‌است، بررسی‌های ما در مورد برخی از آن‌ها، نشان می‌دهد که این روش‌ها جامعّیت ندارند. برای مثال، یکی از این روش‌ها، استفاده از میانگین‌گیری است (Erivelton G Nepomuceno, Matjaž Perc, 2019). در این روش، روی تمام جایگشت‌های معادل از نظر ریاضی میانگین‌گیری می‌کنیم. مثلاً در مثال آخر از رابطه‌ی (۲۰) استفاده کنیم:

جایگشت‌های معادل رابطه‌ی (۱۲):

$$L_۱ = \mu x^k(۱ - x^k) \qquad (۱۴)$$

$$L_۲ = \mu(x^k(۱ - x^k)) \qquad (۱۵)$$

$$L_۳ = \mu x^k - \mu x^k x^k \qquad (۱۶)$$

$$L_۴ = (\mu - \mu x^k)x^k \qquad (۱۷)$$

$$L_۵ = \mu(x^k - x^k x^k) \qquad (۱۸)$$

$$L_۶ = \mu x^k - \mu(x^k x^k) \qquad (۱۹)$$

$$f(x_i^k) = \frac{۱}{۶}\sum_{i=۱}^{۶} L_i \qquad (۲۰)$$

انتظار داریم با این کار، احتمال بوجود آمدن پدیده‌هایی مثل آشوب محاسباتی کمتر شود؛ ولی باز هم تضمینی بر نبود آن‌ها نیست. به نظر می‌رسد برای اینکه بتوانیم با اطمینان بیشتری از روش‌های عددی استفاده کنیم، نیازمند بازنگری و دقّت بیشتری در روش‌های‌مان هستیم. با این حال، هنوز بررسی‌های زیادی در این حوزه انجام نشده‌است.

مراجع:

۱ Erivelton G Nepomuceno, Matjaž Perc. (2019). Computational chaos in complex networks. Journal of Complex Networks, 1–16.

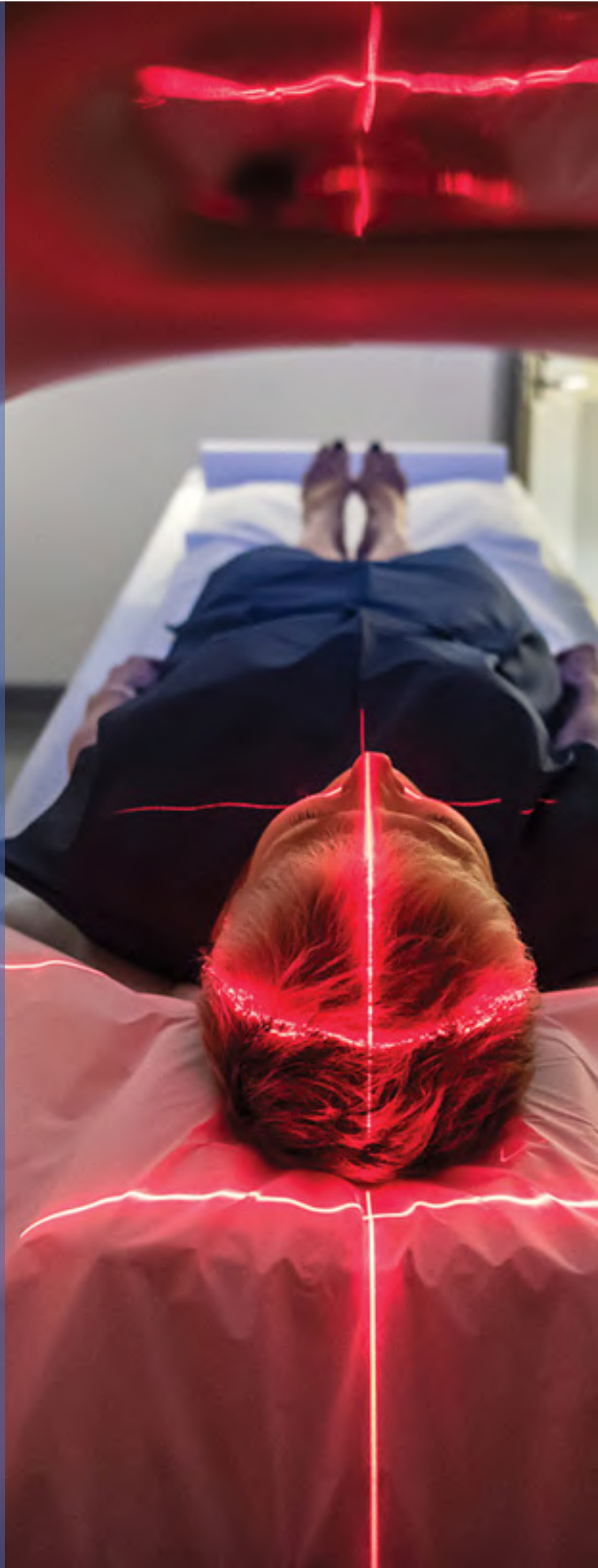
۲ Lorenz, E. N. (1989). Computational chaos—a prelude to computational instability. Physica D: Nonlinear Phenomena, vol.35, 299–317.

۳ Strogatz, S. H. (2015). Nonlinear dynamics and Chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. Boulder: Westview Press, a member of the Perseus Books Group.

چگونه در خانه‌ی خودتان PET Scanner بسازید:

فهم روش کار دستگاه PET Scanner به کمک اتاقک ابر دست‌ساز خانگی

علی فعله | الهه ملاحیدر



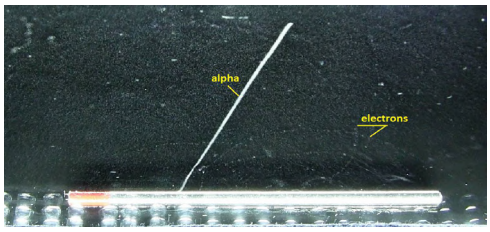
پادماده، موجودی است که جرمی دقیقاً برابر جرم همتای ماده‌ی خود، اما بار فیزیکی (همانند بار الکتریکی) مخالف بار فیزیکی آن دارد. ایده‌ی وجود پادماده به صورت نوین اولین بار در سال ۱۹۲۸ توسط دیراک مطرح شد. او وقتی می‌خواست نسخه‌ی نسبیتی معادله‌ی شرودینگر را برای الکترون حل کند، وجود آنتی‌الکترون (پوزیترون) را پیشنهاد کرد. سپس «کارل اندرسون» هنگامی که درحال مطالعه‌ی اثر ذرات در اتاقک ابر بود، متوجه وجود ذراتی شبیه الکترون -با ردی دقیقاً قرینه‌ی مسیر ذرات الکترون- شد. این ذره، اولین پادماده‌ای بود که بشر مشاهده کرد.

elahe.mollaheydar@gmail.com
ali.fele@gmail.com

اتاقک ابر چیست؟

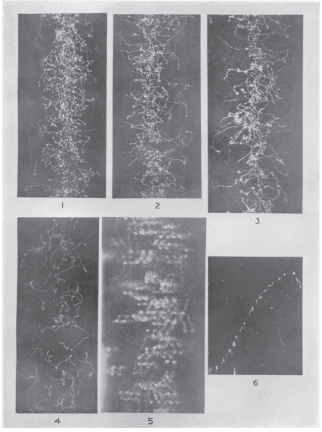
اتاقک ابر محفظه‌ای است برای آشکارسازی ذرات یونیزه‌شده و باردار در آن محیط.

این دستگاه، خود ذرات را به تنهایی آشکار نمی‌کند بلکه نشانگر مسیری که این ذرات از آن گذشته‌اند هستند.



تصویر شماره‌ی ۱

در واقع ذرات دنباله‌ای متراکم از خود به جای می‌گذارند که به صورت مه قابل مشاهده است و نمایانگر مسیر حرکت آن ذره است. ذراتی که در این اتاقک مورد بررسی قرار می‌گیرند، معمولاً عناصر رادیواکتیو مثل تابش‌های آلفا و بتا هستند. علاوه بر آن‌ها، اشعه‌های کیهانی(cosmic rays) نیز از این طریق آشکار می‌شوند. (سؤال چالشی: در مکانیک کوانتومی دیدیم ذرات، مسیر حرکت معین ندارند. پس، فکر کنید: باریکه‌ای که می‌بینیم مربوط به چیست؟)



تصویر شماره‌ی ۲

اتاقک ابر چگونه کار می‌کند؟

محیط اتاقک، حاوی بخار فوق اشباع از آب یا الکل است. وقتی یک ذره‌ی پرانرژی با ترکیب گازی برهم‌کنش می‌کند، طی برخوردهایش با اتم‌های گاز تبادل الکترون انجام می‌دهد و باعث باردار شدن گاز می‌شود و دنباله‌ای از مولکول‌های یونیزه‌شده همراه خود تشکیل می‌دهد. اگر ترکیب گازی در نقطه‌ی چگالش خود باشد، باریکه‌ی مه‌مانندی به دنبال ذره، برای چند ثانیه مشاهده می‌شود که نمایانگر مسیر حرکتش هم خواهد بود.

این دنباله‌ها شکل‌های متفاوتی دارند و از همین طریق، ذرات شناسایی می‌شوند. به عنوان مثال، دنباله‌ی ذره‌ی آلفا ضخیم و مستقیم است در حالی که برای یک الکترون حلقه‌مانند است و انحراف حاصل از برخوردها را واضح‌تر نشان می‌دهد.

اولین اتاقک ابر ساخته‌شده، حاوی بخار آب بود و محفظه‌ی آن هم قابلیت افزایش حجم را داشت. بنابراین با بزرگ‌تر کردن حجم اتاقک، دمای گاز افت می‌کند و این پدیده، بخار آب را به چگال‌تر شدن سوق می‌دهد و این غلیظ‌تر شدن باعث به جا ماندن ردی از ذرات می‌شود.

در اتاقک‌های جدیدتر که به نام اتاقک دیفیوژن (diffusion chamber) شناخته می‌شوند، از بخار الکل استفاده می‌کنند و حجم محفظه هم قابل تغییر نیست؛ بلکه برای پایین آوردن دمای گاز داخل، به جای آن، از یخ خشک استفاده می‌کنند.

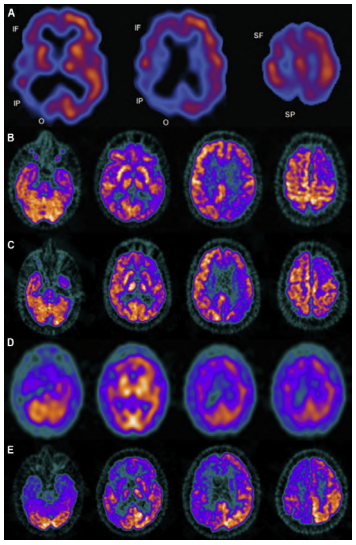
اتاقک ابر نقش مهمی در فیزیک ذرات تجربی از سال ۱۹۲۰ تا ۱۹۵۰ ایفا کرده است. کشف ذرات پوزیترون (۱۹۳۲) و میون (۱۹۳۶) و کائون (۱۹۴۷) همگی با استفاده از همین دستگاه بوده‌اند.

PET Scanner:

PET مخفف کلمه‌ی Positron Emission Tomography است. همانطور که از اسمش پیداست، نوعی تصویربرداری است که در آن از پادماده‌ی پوزیترون استفاده می‌شود. در شکل زیر می‌توانید تصویری از این اسکنر را ببینید:

«تصویر پت»

لازم به ذکر است که عکس‌برداری PET از جمله عکس برداری‌های عملکردی (functional) است. به این معنی که اگر به کمک این وسیله از مغز تصویربرداری بکنید، خروجی‌ای که می‌گیرید، عملکرد مغز در نقاط مختلف مغز خواهدبود.



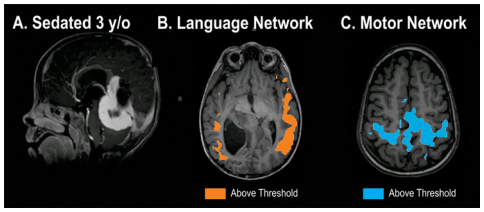
تصویر شماره‌ی ۳

برای مثال، تصویر شماره‌ی [۳] را مشاهده کنید.

همان‌طور که در این تصویر می‌بینید، ساختار مغز

خیلی مشخص نیست (به صورت مات غیرواضح است). دلیلش آن است که این تصویر یک تصویربرداری عملکردی است. به این معنی که عملکرد بخش‌های مختلف مغز را به تصویر می‌کشد. بخشی از مغز که دارای متابولیسم بیشتری است به صورت روشن‌تر و بخشی که دارای متابولیسم کمتری است به صورت خاموش‌تر نمایانده می‌شود.

از این نوع تصویربرداری می‌توان برای منظورهای مختلفی استفاده کرد. یکی از کاربردهایش این است که به کمک این تصویربرداری می‌توان فهمید بخش‌های مختلف مغز مسئول چه کارهایی هستند. برای مثال شکل [۴] را در نظر بگیرید:



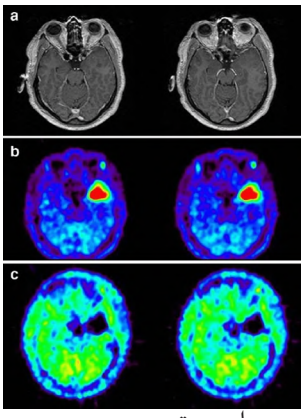
تصویر شماره‌ی ۴

البته برای تعیین محل دقیق سیگنال‌های PET می‌توان از ترکیب آن با یکی از تصویربرداری‌های ساختاری بهره برد. به طور مثال MRI یا magnetic resonance imaging تکنیکی است که به کمک آن می‌توانید ساختار دقیق مغز را مطالعه کنید و سپس با قرار دادن تصویر پت روی MRI، به مکان دقیق فعالیت مغزی پی ببرید.

یکی دیگر از کاربردهای PET مربوط به پیدا کردن تومورهای پنهان است. وقتی صحبت از تومور می‌شود، همه‌ی ما تصور می‌کنیم غده‌ی عجیبی در مغز وجود دارد که اسمش تومور می‌باشد. بله، این تصور برای بسیاری از غدد مغزی درست است، اما تعدادی از غدد مغزی هستند که هیچ نشانه‌ی ساختاری در مغز برجا نمی‌گذارند؛ بلکه متابولیسم آن ناحیه از مغز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین تشخیص دادن این تومورها با عکس‌برداری‌های ساختاری همچون MRI ممکن نیست. اینجاست که تصویربرداری پت مؤثر واقع می‌شود. برای مثال عکس شماره‌ی [۵] را ببینید.

همان طور که مشاهده می‌شود، در تصویر a هیچ نشانی از تومور مغزی به صورت واضح دیده نمی‌شود. اما اگر تصاویر b و c را مشاهده کنید به سادگی می‌توانید متوجه شوید که متابولیستم عجیبی در یک ناحیه از مغز همیشه ثابت است.

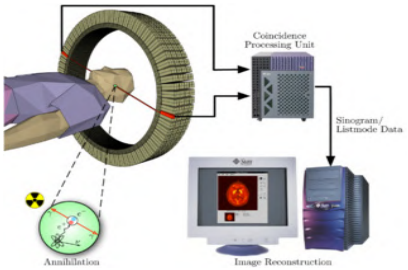
این مشاهده می‌تواند به ما کمک کند به وجود تومور پی ببریم. با ترکیب عکس PET با MRI می‌توانیم به محل دقیق تومور پی برده و به کمک عمل‌های جراحی تومور را از محل خارج کنیم.



نحوه‌ی کار تصویربرداری پت:

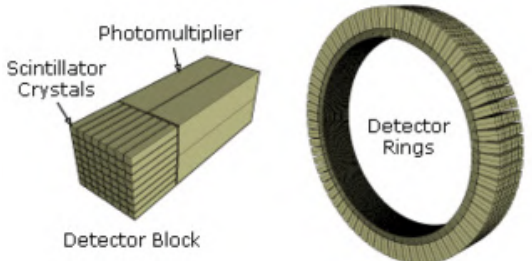
اساس کار تصویربرداری پت روی برهم‌کنش ماده با پادماده است. در این نوع تصویربرداری از موادی به نام radiotracer استفاده می‌کنند. این تریسرها در بدن تزیق می‌شوند تا در جریان خون راه پیدا کرده و در بدن پخش شوند. این مواد که مواد ناپایداری هستند، در طول زمان واپاشی انجام داده و از خود پوزیترون (پاد ماده‌ی الکترون) آزاد می‌کنند. این پوزیترون‌های آزاد شده در مسیر خود به اتم‌های بدن برخورد کرده و پرتوی گاما ساطع می‌کنند. این پرتوهای گاما به کمک آرایه‌ی آشکارسازهای حلقوی که دور مریض را فراگرفته‌اند آشکار سازی می‌شوند و بعد از پردازش‌هایی به تصویر مطلوب می‌رسند.

به شکل‌های [۶]، [۷] مراجعه کنید.



تصویر شماره‌ی ۶

نکته‌ای که درباره‌ی radiotracerها وجود دارد این است که می‌توان برای منظورهای مختلف از تریسرهای مختلف استفاده کرد. برای مثال تریسر 18F-FDG برای تشخیص‌های مربوط به سرطان، تریسر NaF-F18 برای رویش استخوان، و oxygen-15 برای مشاهده و مطالعه‌ی جریان خون کاربرد دارد.



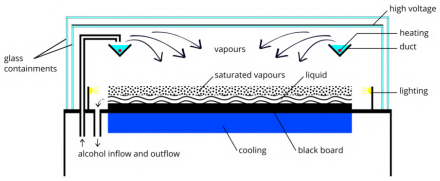
تصویر شماره‌ی ۷

مطالبی که در این بخش بیان شد، توضیح بسیار

ساده و مختصر و شهودی از طرز کار تکنیک PET بود. برای مطالعه‌ی بیشتر توصیه می‌شود به کتاب Nuclear Medicine Physics: The Basics نوشته‌ی Arman Rahmim مراجعه کنید. در فصل ۱۵ این کتاب به صورت کامل درباره‌ی PET بحث شده‌است. همچنین مطالبی درباره‌ی تصویربرداری‌های مختلف آورده شده‌است که مطالعه‌ی آن‌ها خالی از لطف نیست.

ساخت چیدمان آزمایش:

در این بخش قصد داریم آشکارسازی بسازیم که می‌تواند الکترون، پوزیترون، و گاما را آشکارسازی کند. به کمک این ستاپ می‌توان هم به نحوه‌ی کار PET و فیزیک پشت سر آن بهتر پی برد و هم می‌توان پرتوهای کیهانی را مشاهده کرد و لذت برد. در تصویر زیر می‌توانید یک نمای ساده‌شده از اتاقک ابر مشاهده کنید [تصویر شماره ۸]:

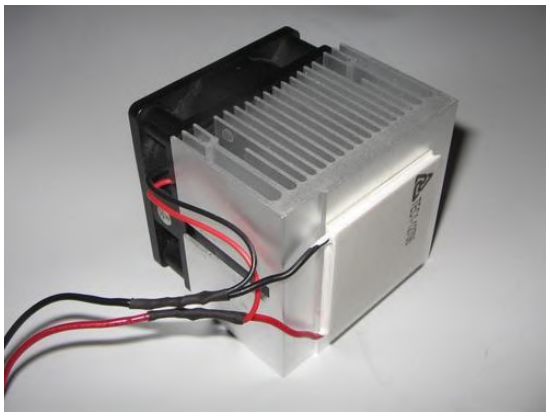


تصویر شماره‌ی ۸

همان طور که می‌بینید، در قسمت زیرین اتاقک ابری قسمتی قرار گرفته است که الکل را بسیار خنک می‌کند و به اندازه‌ای خنک است که بتواند یک گرادیان دمایی در فضای نزدیک سطح خودش به وجود بیاورد، به طوری که بخار فوق اشباع در این ناحیه به وجود بیاید. برای قسمت سردکن می‌توان از یخ خشک استفاده کرد. اما از آنجایی که تهیه‌ی آن سخت است، ما در این مطلب یک روش سردکننده‌ی دائمی پیشنهاد می‌کنیم.

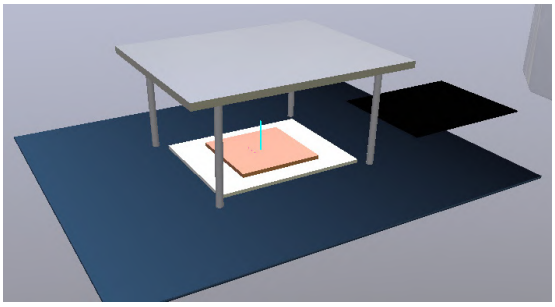
تصویر شماره‌ی ۹

قطعه‌ای که در شکل شماره‌ی ۹ مشاهده می‌کنید یک المان سردکننده است. به صورتی که اگر به آن ولتاژ ۱۲ ولت اعمال کنید، یک طرف آن از طرف دیگر آن ۶۰ درجه خنک‌تر می‌شود. توجه کنید که در هنگام استفاده از این وسیله، حتماً باید قسمتی را که گرم می‌شود به «گرماگیر[۱]» وصل کنید. در غیر این صورت قطعه خواهد سوخت. همچنین بهتر است که گرماگیر را در معرض باد یک فن قرار دهید که دفع گرما از آن به خوبی اتفاق بیفتد (تصویر شماره‌ی ۱۰). توجه کنید که هرچقدر سمت گرم را خنک‌تر کنید، سمت سرد، حدود ۶۰ درجه از سطح گرم سردتر خواهد بود. از بورد توسعه‌ای که برای کنترل اتاقک ابر در نظر گرفته شده است (بخش بعدی را ببینید) می‌توانید این قطعه را درایو کنید.



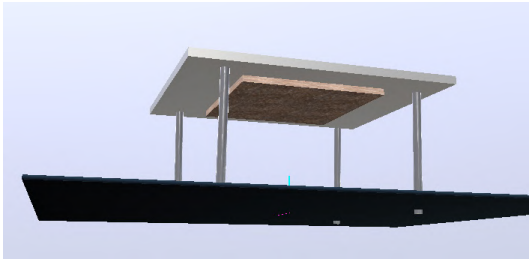
تصویر شماره‌ی ۱۰

در مرحله‌ی بعدی لازم است که یک قطعه‌ی مسی روی قسمت سردشونده‌ی المان بچسبانید. به شکل زیر توجه کنید:



تصویر شماره‌ی ۱۱

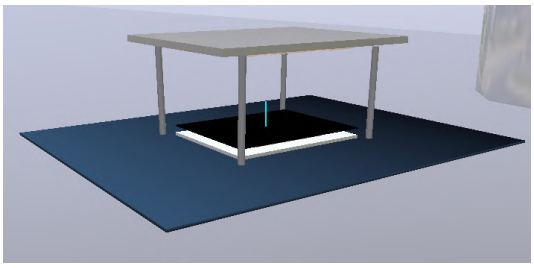
در شکل بالا قطعه‌ی سفیدرنگ همان المان سردکننده است که روی آن صفحه‌ی مسی قرار گرفته است. سپس لازم است در قسمت سقف چیدمان، یک اسفنج بچسبانید که آغشته به الکل باشد. مثل تصویر زیر:



تصویر شماره‌ی ۱۲

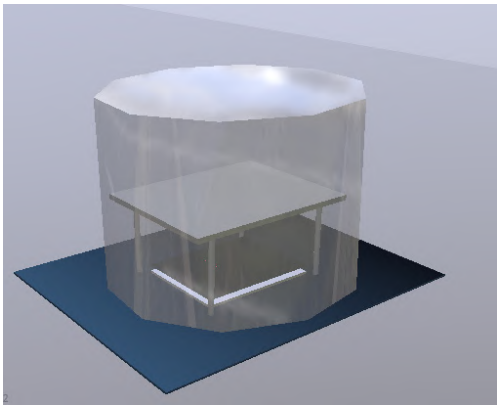
حال یک پوشش پلاستیکی مشکی‌رنگ روی صفحه مسی قرار دهید که مشاهده‌ی پرتوها توسط آشکارساز راحت‌تر شود:

۱ Heat Sink



تصویر شماره‌ی ۱۳

حال یک محفظه‌ی شیشه‌ای شفاف لازم داریم که روی سیستم قرار بگیرد و از خارج شدن الکل از سیستم جلوگیری کند. تصویر نهایی به این شکل خواهد بود:



تصویر شماره‌ی ۱۴

حال کافی است المان سردکننده را به ولتاژ ۱۲ ولت وصل کنید و کمی صبر کنید. بعد از مدتی اثرهایی شبیه شکل زیر مشاهده خواهید کرد [شکل ۱۵]. فراموش نکنید که برای مشاهده‌ی راحت‌تر، لازم است روی صفحه‌ی مشکی نور بتابانید.

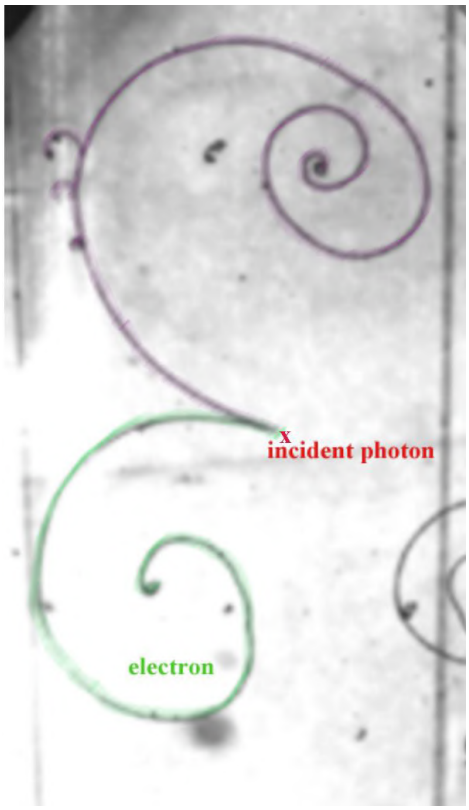
تصویر شماره‌ی ۱۵

ارتباط با PET Scan:

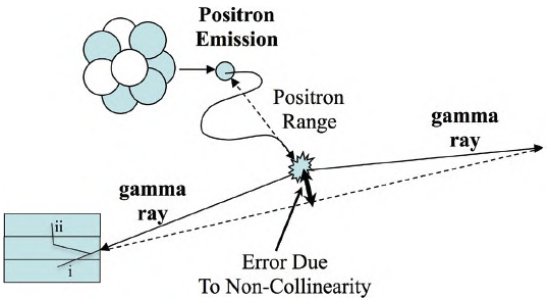
اگر خوش‌شانس باشید بعد از مدتی می‌توانید شکلی مثل شکل زیر مشاهده کنید [شکل ۱۰] (البته توجه کنید برای اینکه بتوانید شکل بالا را مشاهده کنید، باید از کویل مغناطیسی هم استفاده کنید. به صورتی که روی صفحه‌ی مشکی‌رنگ در سیستم، میدان مغناطیسی یکنواخت وجود داشته باشد).

همان طور که مشاهده می‌کنید، در یک نقطه از تصویر، پرتوی گامایی تبدیل به یک زوج الکترون-پوزیترون شده است. این دقیقاً عکس مکانیزم تصویربرداری PET است. در تصویربرداری PET یک پوزیترون سر راه خود به یکی از اتم‌های بدن برخورد می‌کند و دو پرتوی گاما آزاد می‌کند که توسط آشکارسازها ثبت می‌شود.

تصویر زیر [تصویر ۱۶] گویای مطالب گفته‌شده است:



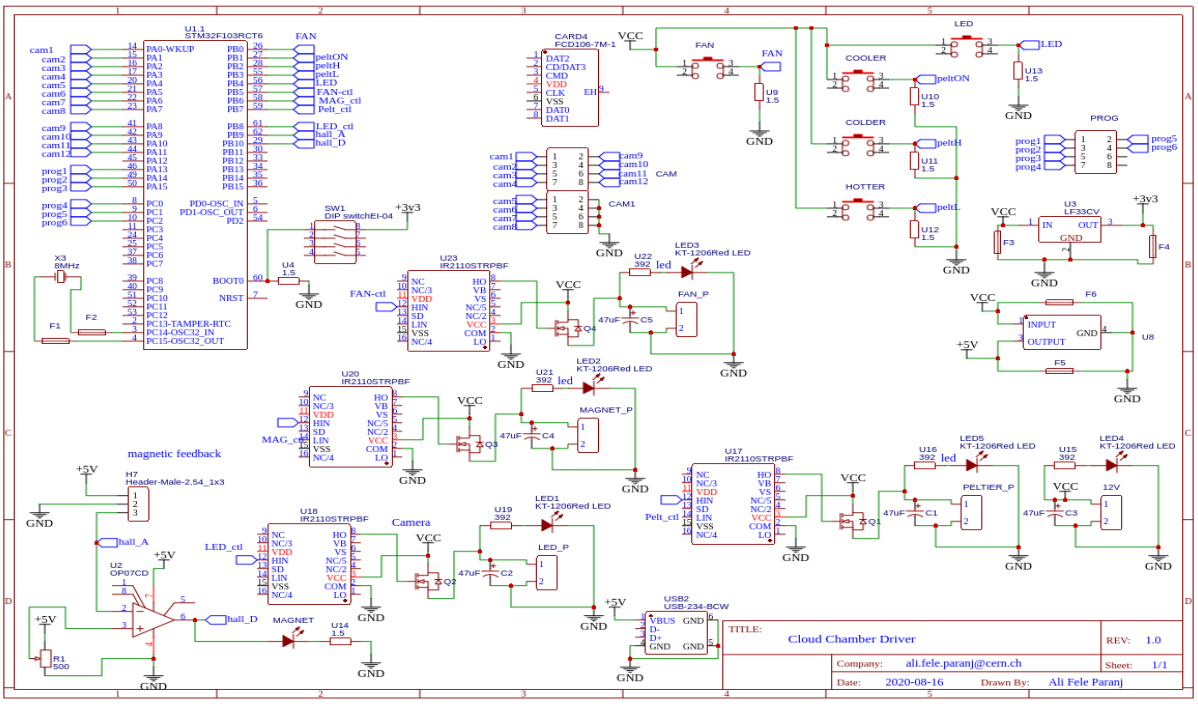
تصویر شماره‌ی ۱۶



تصویر شماره‌ی ۱۷

بورد توسعه‌ی اتاقک ابر (development board):

به کمک این بورد توسعه می‌توانید عنصر خنک‌کننده، فن عنصر خنک‌کننده، کویل میدان مغناطیسی، LED های نوردهنده به سیستم را به کمک دکمه‌های فشاری که در پایین برود قرار دارند کنترل کنید. برای اینکه متوجه شوید در این بورد توسعه‌ی المان‌ها به چه صورتی به همدیگر وصل شده‌اند، به شماتیک آورده‌شده در شکل ۱۸ مراجعه کنید:



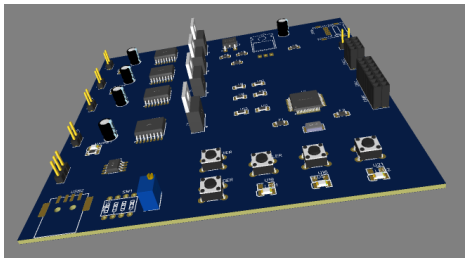
تصویر شماره‌ی ۱۸

راهنمای استفاده از بورد توسعه:

همه‌ی سورس کد و همچنین نقشه‌ي کامل شماتیک سیستم در صفحه‌ی گیت‌هاب[۲] قرار خواهد گرفت. همچنین دستورالعمل‌های لازم جهت برنامه‌ریزی micro controller را نیز می‌توانید در این صفحه پیدا کنید. اما اگر خودتان می‌خواهید این سیستم را راه‌اندازی کنید و firmware خودتان رو بنویسید، برای راهنمایی لازم است توجه کنید که برای راه‌اندازی خروجی‌های مدار (فن و LED و ...)لازم است از برنامه‌ریزی تایمر و تولید موج PWM کمک بگیرید.

در نهایت، پس از سفارش دادن PCB، مونتاژ کردن قطعات روی بورد، بورد کنترلی شما چنین نمایی خواهد داشت:

از این به بعد می‌توانید ذرات کیهانی را ببینید و لذت ببرید.



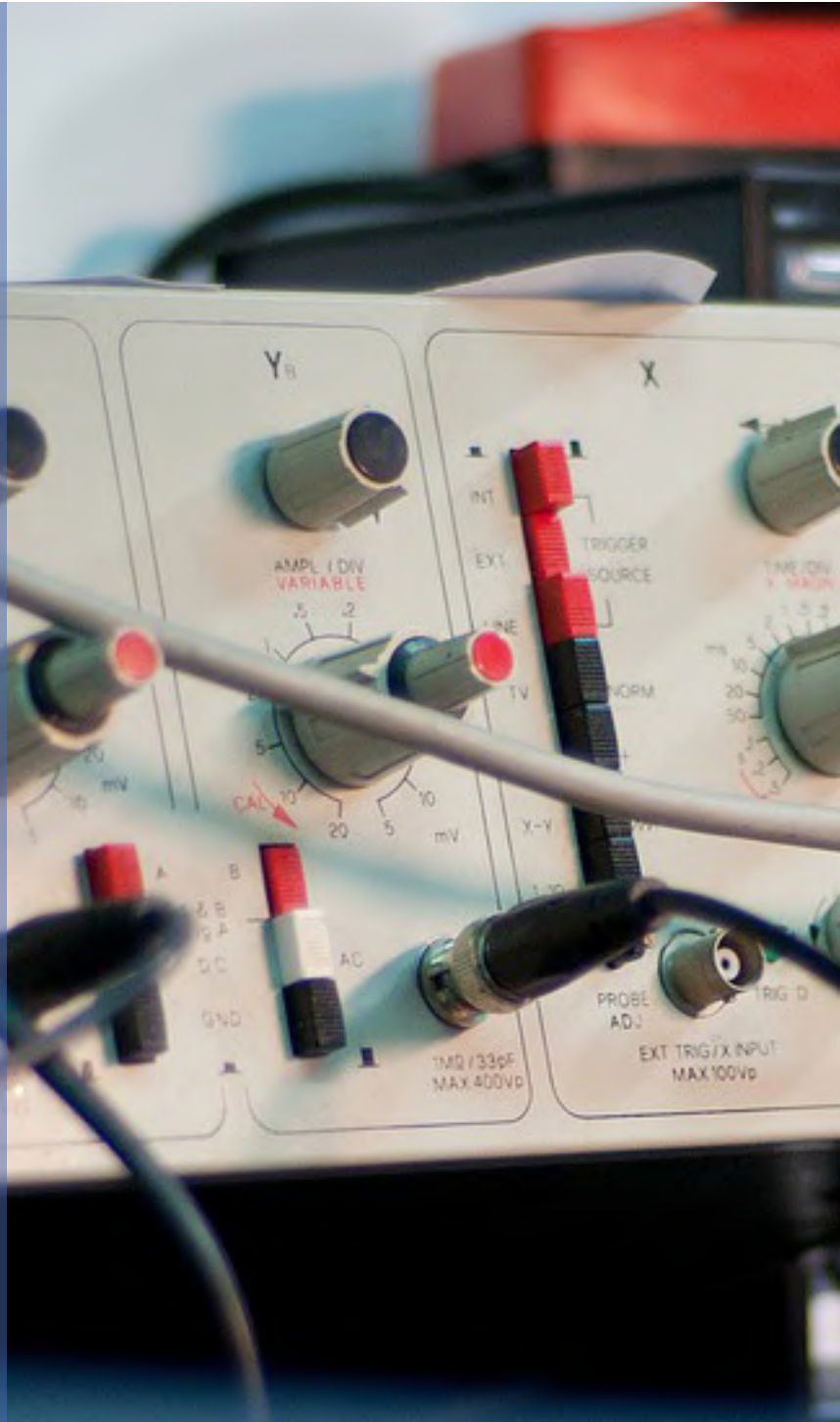
تصویر شماره‌ی ۱۹

۲ https://github.com/alifele/OpenSource-Cloud-chamber

مولد موج با مدارمجتمع ICL8038

ساده و ارزان برای خانه، مدرسه و آزمایشگاه

سجاد مهدی‌زاده
دانش‌آموخته‌ی کارشناسی و ارشد دانشگاه شریف



مدارمجتمع[1] ICL8038، یک مولد موج[2] است و هدف این مقاله معرفی آن به خواننده‌ی علاقه‌مند به فیزیک تجربی است. ابتدا به معرفی مولد موج و کاربردهای آن در فیزیک می‌پردازیم؛ سپس به سراغ مدار مجتمع موردنظر رفته و قابلیت‌ها و ویژگی‌هایش را مرور می‌کنیم. در پایان به تجربه‌ی نگارنده در ساختن یک مولد موج خانگی پرداخته و نمونه‌هایی از سیگنال‌های تولیدشده را تا حدی تحلیل می‌کنیم.

smahdiz1@smail.uni-koeln.de

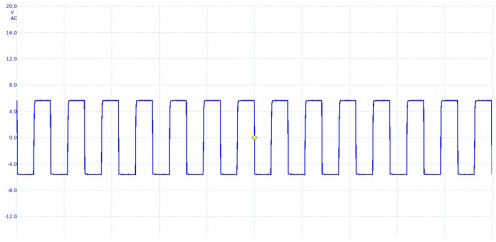
مولد موج چیست؟

مولد موج یکی از تجهیزات پایه‌ی آزمایشگاهی است. این دستگاه سیگنالی الکتریکی با پتانسیل متغیّر با زمان تولید می‌کند. محبوب‌ترین توابعی که تولید می‌شوند متشکل از سینوسی، مربعی، مثلثی، دندانه ارّه‌ای، پالس کوتاه و نویز هستند. نمونه‌های رومیزی این دستگاه‌ها اغلب امکان تنظیم دامنه، فرکانس و تقارن سیگنال را می‌دهند.

شکل ۱: نیمه‌ی سمت چپ مولد موج آزمایشگاهی HM8030 ساخت شرکت Hameg است.

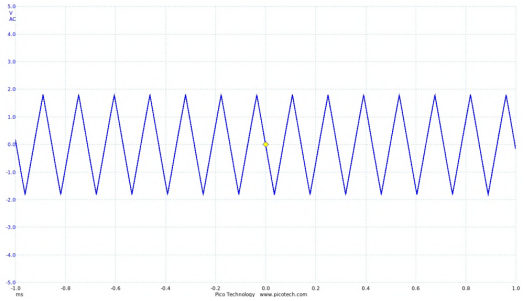
برخی کاربردهای مولد موج

شاید یک کاربرد ملموس از چنین دستگاهی، اندازه‌گیری ثابت زمانی یک شبکه‌ی ساده‌ی مقاومتی-خازنی باشد. ایده این است که یک افزایش یا کاهش ناگهانی، یا پله‌ای شکل، در پتانسیل مدار ایجاد کنیم و بعد با اندازه‌گیری شکل نمایی افزایش یا کاهش ولتاژ، ثابت زمانی را به‌دست آوریم. برای انجام چنین آزمایشی سیگنال مربعی مناسب است چرا که تحریکی مداوم به شکل قطع و وصل سریع ولتاژ است.



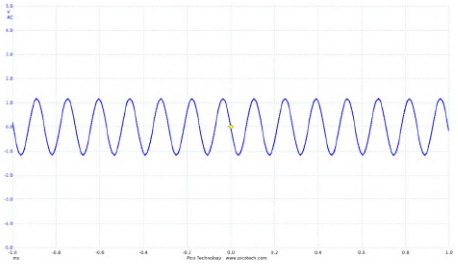
شکل ۲: نمونه‌ی موج مربعی متقارن که با ICL8038 تولید و با اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت شده‌است.

تصویر مقایسه‌ی سقوط یک پر و یک گوی آهنی را بارها در کتاب‌ها دیده‌ایم. چگونه این عکس ثبت شده‌است؟ می‌توانیم دوربین عکاسی را روی نوردهی نسبتاً بلند بگذاریم، اتاق را تاریک کنیم و یک منبع نور داشته‌باشیم که پالس‌های نوری کوتاه و منظم تولید کند. به‌طور مثال ۱۰ms پالس نوری، سپس ۹۰ms تاریکی، دوباره ۱۰ms پالس نوری، و به همین ترتیب ادامه دهیم. پس عکاسی استروبوسکوپی[3] کاربردی از سیگنال مربعی است که دوره‌ی کاری[4] آن را به‌دلخواه کوچک کرده‌ایم. (در اینجا پالس با دوره‌ی کاری ۱۰٪).



شکل ۳: نمونه‌ی موج مثلثی تولیدشده با ICL8038 و ثبت‌شده با اسیلوسکوپ.

فیزیک حالت جامد امکان فهم قطعاتی حیاتی در دنیای امروز مانند دیود و ترانزیستور را به ما می‌دهد. از مشخصات کلیدی این قطعات رفتار غیرخطی جریان بر حسب ولتاژ است. مثلاً در پیوند دو نیم‌رسانای نوع p و n یا همان دیود، تابعی نمایی را برای جریان بر حسب ولتاژ انتظار داریم. بیایید فکر کنیم چگونه این اندازه‌گیری ممکن است. احتمالاً ولتاژ دو سر دیود را گام‌به‌گام بیشتر کرده و در هر مرحله، جریانی را که از آن عبور می‌کند اندازه می‌گیریم. چرا این کار را با مولد موج نکنیم؟ گام‌به‌گام زیاد کردن ولتاژ مثل یک شیب ثابت است، پس موج مثلثی را انتخاب می‌کنیم. کافی است پتانسیل مثلثی را از مولد موج به دیود اعمال کنیم و ولتاژ و جریان را هم‌زمان با اسیلوسکوپ اندازه بگیریم و ترجیحاً در مد XY اسیلوسکوپ آن‌ها را نسبت به هم رسم کنیم، این هم از منحنی ولتاژ-جریان. رادیومترهای هواشناسی، امروزه از آشکارسازهای دیود شاتکی[5] استفاده می‌کنند و تلسکوپ‌های رادیویی و زیر میلی‌متری علاوه بر دیود شاتکی از آشکارسازهای ابررسانا مانند اتصال ابررسانا-عایق-ابررسانا[6] و تابش‌سنج الکترون داغ[7] بهره می‌برند. از اصول تنظیم چنین گیرنده‌هایی، بررسی منحنی ولتاژ-جریان آشکارساز و بر آن اساس تنظیم و انتخاب نقطه‌ی کاری مناسب است.



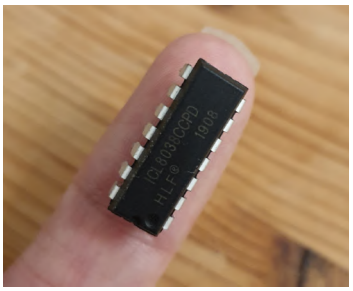
شکل ۴: نمونه‌ی موج سینوسی تولیدشده با ICL8038.

در طیف‌سنجی خیلی اوقات نیاز پیدا می‌کنیم که چشمه‌ی نور یا چشمه‌ی رادیویی را مدوله کنیم، یعنی در دامنه یا فرکانس موج به خواست خودمان یک جمله‌ی مثلاً سینوسی اضافه کنیم و از این کار بهره‌ی فراوانی، مثل حذف کردن نویز و سیگنال‌های ناخواسته

۱ Integrated Circuit (IC)
۲ Function Generator
۳ Stroboscope
۴ Duty Cycle

۵ Schottky Diode
۶ Superconductor Isolator Superconductor (SIS)
۷ Hot Electron Bolometer

ببریم. اینجا مولد موج برای تولید سیگنال مدوله‌کننده به کار می‌آید. موج را به ورودیِ مدولاتور چشمه‌ی نور یا چشمه‌ی رادیویی می‌دهیم و سپس به‌طور مثال با بهره‌گیری از تقویت‌کننده‌ی قفل‌شونده[۸]، دقت آزمایشمان را حتی تا چندین مرتبه‌ی بزرگی افزایش می‌دهیم. مثال دیگر نیاز به سیگنال مدوله‌کننده در طیف‌سنجیِ تشدیدِ مغناطیسی هسته[۹] است که در آنجا سهمی میدان مغناطیسی بایستی یک سینوسی متغیّر با زمان باشد.

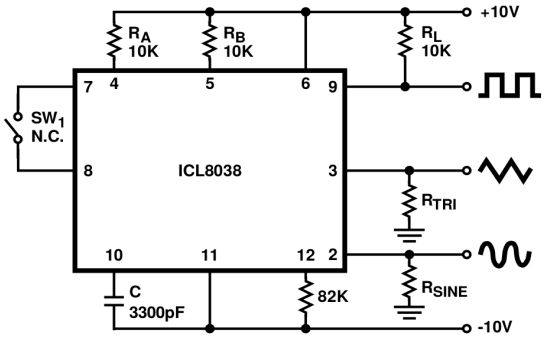


شکل ۵: مدار مجتمع ICL8038، مولد موجی در ابعاد بند انگشت کوچک!

معرفی ICL8038

ICL8038 یک مدار مجتمع است، یعنی بیش از ۱۰۰ قطعه شامل ده‌ها ترانزیستور، مقاومت و دیود، همگی یک مدار آماده برای این کاربرد مشخص (تولید موج) را تشکیل داده و در بسته‌بندی DIP۱۴ عرضه شده‌است. اگر می‌خواستیم این مدار را خودمان بسازیم علاوه بر زحمت زیاد و کیفیت ناچیز، احتمالاً فضایی به اندازه‌ی یک بشقاب غذاخوری اشغال می‌شد!

این مدار مجتمع محصولِ صنایع نیمه‌هادی Harris است. در برگه‌ی اطلاعاتی‌اش[۱۰] این‌گونه خودش را معرفی می‌کند: «مولد موج دقیق/نوسان‌ساز قابل کنترل با ولتاژ». این مدار مجتمع قادر است سیگنال‌های با شکل موج سینوسی، مربعی، مثلثی، دندانه اره‌ای و پالس را در فرکانس‌های ۰٫۰۰۱Hz تا ۳۰۰KHz بسازد؛ پوشش فرکانسی که به‌خوبی فروصوت تا فراصوت را شامل می‌شود. مقاومت‌های R_A و R_B و خازن C در شکل ۶، فرکانس را تنظیم می‌کنند. پس در صورت نیاز می‌توان با داشتن کلیدی که از میان چندین خازن یکی را به مدار متصل کند و نیز با استفاده از مقاومت متغیّر، بازه‌ی وسیعی از فرکانس‌ها را پوشش داد. همچنین تقارن سیگنال تولیدشده با مقاومت‌های RA و RB قابل‌کنترل بوده و با برابر بودن آن‌ها موج خروجی متقارن است. (توضیحات و معادلات فرکانس و تقارن سیگنال در صفحات ۵ و ۶ برگه‌ی اطلاعاتی). درباره‌ی امپدانس و جریانِ ممکن از هر خروجی برگه‌ی اطلاعاتی را ببینید. حتماً برای هر کاربردی در صورت نیاز از مقاومت متغیّر برای تنظیم دامنه و از بافر برای تطبیق امپدانس و یا تقویت استفاده کنید. (شکل ۶ برگه‌ی اطلاعاتی)



شکل ۶: مدار تستِ داده‌شده در برگه‌ی اطلاعاتی ICL8038. علاوه بر سادگی حیرت‌انگیز مدار دقت کنید که هر سه خروجی مثلثی، مربعی و سینوسی هم‌زمان قابل استفاده هستند.

از جمله قابلیت‌هایی که در این مولد موج دیده شده، امکان مدولاسیون فرکانس[۱۱] (FM) است. همان طور که خواندیم سازندگانش آن را نوسان‌ساز قابل کنترل با ولتاژ معرفی می‌کنند، به این معنی که علاوه بر مقاومت‌های RA و RB و خازن C، ولتاژ روی پایه‌ی ۸ نیز کنترل فرکانس مولد موج را به عهده دارد. فرض کنیم که با تنظیم اولیه و با ولتاژ بایاس ثابت Vb روی پایه‌ی ۸، خروجی سینوسی مدار در فرکانس پایه‌ی f نوسان دارد:

$$V(t)=A\sin(2\pi f\, t) \qquad (۱)$$

حال اگر یک موج سینوسی کوچک مدوله‌کننده با فرکانس fm:

$$V_m(t)=A_m\sin(2\pi f_m t) \qquad (۲)$$

را به پایه‌ی ۸ یعنی ورودی FM مدار بدهیم، فرکانس مولد موجمان را به این شکل مدوله می‌کنیم:

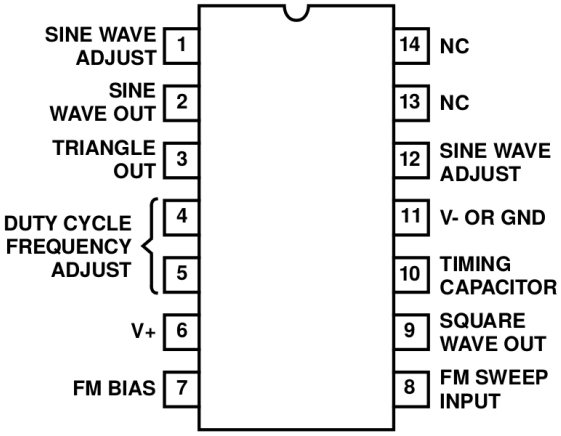
$$V(t)=A\sin\left(2\pi f\cdot t+\frac{\Delta f}{f_m}\cdot\sin(2\pi f_m t)\right) \qquad (۳)$$

در این صورت فرکانس موج خروجی به اندازه‌ی $\Delta f=K_f\cdot A_m$ حول فرکانس پایه‌ی f به شکل سینوسی کم و زیاد میشود و بیشینه‌ی انحراف از فرکانس پایه با ثابت K_f به دامنه‌ی موج مدولاتور مرتبط خواهد بود.

پایه‌ی شماره‌ی ۷ فقط یک مقسّم ولتاژ به منظور تهیه‌ی ولتاژ ثابت است. وقتی نمی‌خواهیم ICL8038 را مدوله کنیم یا برای مدولاسیون‌های کوچک، کافی است که این پایه به عنوان V_b برای بایاس پایه‌ی ۸ استفاده شود. کار دیگری که می‌توان با ورودی FM انجام داد، ایجاد سوییپ فرکانس است. کافی است که اتصال پایه‌ی ۷ به ۸ را قطع کنیم و خودمان با ولتاژ مطلوبمان

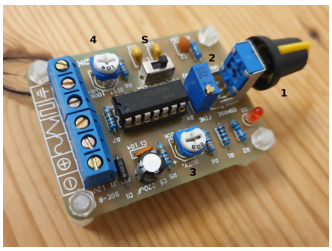
۸ Lock-in Amplifire
۹ Nuclear Magnetic Resonance (NMR)
۱۰ Data Sheet
۱۱ Frequency Modulation

پایه‌ی ۸ را کنترل کنیم. برای ایجاد سوییپ کافی است ولتاژ پایه‌ی ۸ را بین کمینه و بیشینه‌ی مقدور جاروب کنیم (مثلاً با موج دندانه اره‌ای یک مولد موج دیگر). بدین ترتیب فرکانس خروجی اسیلاتور به صورت خطی از کمینه تا بیشینه جاروب می‌شود، سیگنالی که اگر به آن گوش دهید شبیه چهچه پرنده‌ها است! و از این روی در فیزیک و مهندسی به آن سیگنال چهچه[۱۲] می‌گویند. از جمله کاربردهایش اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی سیستم‌ها است. مثلاً اینکه یک میکروفون در فرکانس‌های مختلف صوتی چقدر خوب کار می‌کند را با چنین سیگنال‌هایی به‌سرعت و خودکار می‌توان اندازه گرفت. (به‌جای اندازه‌گیری نقطه‌به‌نقطه و دستی)(صفحه‌ی ۶ و شکل‌های ۵ برگه‌ی اطلاعاتی).



شکل ۷: پایه‌های مدار مجتمع ICL8038

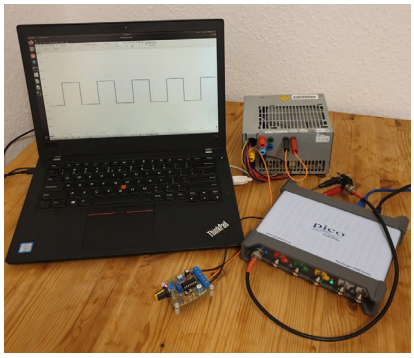
فرکانس ICL8038 پایداری خوبی با دما دارد و برگه‌ی اطلاعاتی مقدار ۲۵۰ppm/°C را برای تغییر فرکانس برحسب دما گزارش می‌کند؛ با این وجود اگر حتی همین مقدار هم در بعضی موارد قابل چشم‌پوشی نباشد، با داشتن ورودی FM پایدارسازی فرکانس هم ممکن است. ایده این است که در یک مقایسه‌گر فاز، فاز یک سیگنال مرجع دقیق و پایدار را با فاز موج ساخته‌شده توسط ICL8038 مقایسه کنیم و اختلاف آن‌ها را به‌جهت جبران کردن به ورودی FM بدهیم. بدین‌گونه ICL8038 با دقتی عالی، فاز سیگنال مرجع را دنبال خواهد کرد. سیگنال مرجع می‌تواند نوسان‌سازی بر پایه‌ی بلور کوارتز با پایداری فرکانس مثلاً ۱ppm/°C یا حتی فرکانس مرجع گیرنده‌ی GPS[۱۳] یا ساعت اتمی سزیم باشد! (چه آزمایش یا کاربردی را می‌شناسیم که چنین دقت‌هایی را خواستار باشد؟) این تکنیک که قفل فاز[۱۴] نام دارد، نه تنها برای پایدارسازی فرکانس، بلکه برای ساختن دمودولاتور FM[۱۵] هم مفید است. یعنی در ورودی به‌جای سیگنال مرجع، سیگنال معادله‌ی ۳ را می‌دهیم و ضریب ثابتی از سیگنال مدوله‌کننده‌ی آن، سیگنال معادله‌ی ۲، را تحویل می‌گیریم. (صفحه‌ی ۸ و شکل ۹ برگه‌ی اطلاعاتی)



شکل ۸: مدار ساخته‌شده مولد موج. چهار مقاومت متغیّر در این تصویر دیده می‌شوند: ۱ و ۲ برای تنظیم زمخت و ظریف فرکانس،۳ برای تنظیم تقارن و ۴ برای تنظیم اعوجاج خروجی سینوسی. همچنین کلید S برای تغییر گستره‌ی فرکانس کاری بین کم و زیاد است و یکی از دو خازن زرد کنارش را به مدار متصل می‌کند.

ساخت مدار

تا اینجا تقریباً تمام ویژگی‌های مهم ICL8038 را مرور کردیم و اکنون به تجربه‌ی نگارنده با این مدار مجتمع می‌پردازیم. پس از سفارش، حدود یک ماه طول کشید تا کیت به دستم برسد و وقتی رسید هم فکر نمی‌کردم با این قیمتی که خریداری شده اصلاً کار کند![۱۶] بسته‌ی ارسالی تمام قطعات، کاغذ کوچکی به عنوان راهنما و برد مدارچاپی ساده، قابل فهم و یک رو را شامل می‌شد. قراردادن قطعات روی برد و انجام لحیم‌کاری ۳۰ دقیقه طول کشید. مدار پس از ساخت بدون هیچ عیبی از اولین تست شروع به کار کرد.



شکل ۹: چینش وسایل برای تست. منبع تغذیه‌ی مولد موج را راه می‌اندازد. موج تولیدی به ورودی اسیلوسکوپ رومیزی داده می‌شود. اسیلوسکوپ رومیزی توسط رایانه و نرم‌افزارش خوانده شده و شکل موج بر صفحه‌ی نمایش رایانه نقش می‌بندد.

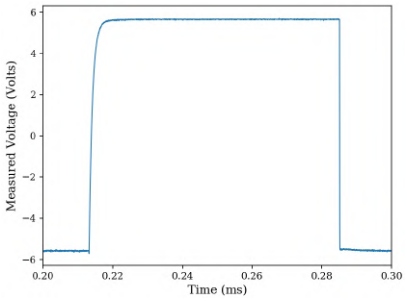
تست

در این بخش نمونه‌ی موج‌های ثبت شده را تحلیل و نتایج را با مقادیر ادعا شده در برگه‌ی اطلاعاتی مقایسه می‌کنیم. ولتاژ منبع تغذیه در تمام این تست ها ۱۲ ولت بوده، فرکانس مدار روی ۷KHz و موج متقارن (دوره‌ی کاری ۵۰٪) تنظیم شده‌است. از آنجا که شرایط تست انجام شده با شرایط برگه‌ی اطلاعاتی تفاوت دارد، مقایسه‌ی نتایج نمی‌تواند موجب تأیید یا رد چیزی باشد، لیکن انجام مقایسه خالی از لطف نیست. به‌طور ویژه ولتاژ ۱۲ ولت استفاده شده نزدیک کمینه‌ی ولتاژ کاری مدار است و این می‌تواند بر کیفیت نتایج اثر قابل

۱۲ Chirp
۱۳ GPS Frequency Standard
۱۴ Phase Locking
۱۵ FM Demodulator

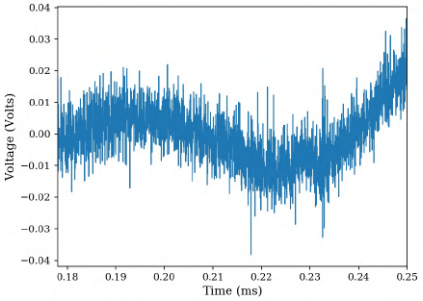
۱۶ من این کیت را از سایت چینی Aliexpress.com، با هزینه‌ی ارسال به قیمت دو یورو خریدم. در تهران، پاساژ امجد و یا فروشگاه‌های اینترنتی باید بتوان آن‌را یافت.

توجهی بگذارد. نخست به‌سراغ موج مربعی می‌رویم. برای موج مربعی قصد داریم زمان خیز[17] (بالا رفتن) و افت[18] (پایین آمدن) پالس را اندازه بگیریم. اسیلوسکوپی که برای تست استفاده شده‌است، خود امکان این اندازه‌گیری را داشت. برای زمان خیز مقدار ۲٫۲us و برای زمان افت مقدار ۵۶ns ثبت شد. برگه‌ی اطلاعاتی مقدار این دو کمیت در شرایط تست را به ترتیب ۱۸۰ns و ۴۰ns گزارش می‌کند. با مطالعه‌ی برگه‌ی اطلاعاتی مشخص شد که برای موج مربعی، مقدار مقاومت R_L در ثابت زمانی خیز پالس تأثیر زیادی می‌گذارد. مقدار R_L در کیت ساخته‌شده ۱۰KOhm است. (شکل ۶ این مقاله و نمودار ۱۴ برگه‌ی اطلاعاتی)



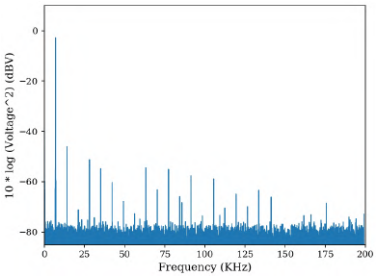
شکل ۱۰: بزرگ‌نمایی روی یکی از پالس‌های مربعی. به تفاوت زمان خیز و زمان افت توجه کنید. ثابت زمانی خیز پالس ۱us است.

برای موج مثلثی (شکل ۳) می‌خواهیم میزان خطی بودن را بررسی کنیم. هر یک از پاره‌خطوط سازنده‌ی این موج در واقع اندکی انحراف از خط ایده‌آل دارد. در اینجا برای یکی از آن‌ها نخست یک خط به یکی از این پاره‌خطوط برازش و سپس تفاضل برازش و داده را رسم کرده‌ایم. با تقسیم بیشینه‌ی انحراف ۰٫۰۲V بر دامنه‌ی قله تا قله‌ی موج که ۳٫۶۵V است به مقدار اعوجاج حدود ۰٫۵۵ ٪ می‌رسیم؛ مقداری که برای شرایط تست در برگه‌ی اطلاعاتی ۰٫۱ ٪ است.



شکل ۱۱: انحراف موج مثلثی از خط ایده‌آل و نویز که بر روی آن سوار است. بیشینه‌ی انحرافِ ۰٫۰۲V در سمت راست مشاهده می‌گردد.

اگر موج سینوسی ایده‌آل باشد با نگاه‌کردن به طیفش در فرکانس‌های مختلف انتظار می‌رود که فقط یک پیک در فرکانسش دیده‌شود. از سوی دیگر یک مولد غیرایده‌آل، اگر چه ضعیف، تعدادی از هارمونیک‌های موج اصلی را هم تولید می‌کند. برای بررسی خلوص طیفی موج سینوسی تولیدشده (شکل ۴)، اسیلوسکوپ را در حالت تبدیل فوریه سریع گذاشته و طیف شکل ۱۲ ثبت شده‌است. موج پایه در فرکانس ۷KHz به‌صورت سیگنال پرقدرت و سایر هارمونیک‌ها در مضارب ۷KHz قابل‌مشاهده هستند. جذر مربعات دامنه‌ی هارمونیک‌ها ۷mV و دامنه‌ی موج پایه ۰٫۷۳V است و تقسیم این دو بر هم، یعنی اعوجاج کل[19]، معادل ۰٫۹۵٪ می‌شود. پایه‌های ۱ و ۱۲ از ICL8038 می‌توانند برای کاهش هارمونیک‌های موج سینوسی استفاده شوند که کیت ساخته‌شده فقط امکان تنظیم یکی از آن‌ها را دارد. مقدار اعوجاج کل در برگه‌ی اطلاعاتی در شرایط تست برای حالت تنظیم‌شده و تنظیم نشده به ترتیب ٪ ۰/۵ و ٪۱ اعلام شده‌اند.



شکل ۱۲: طیف انرژی خروجی موج سینوسی ICL8038. موج پایه در ۷KHz، هارمونیک‌ها در مضارب آن و سطح نویز قابل‌توجه هستند.

جمع‌بندی

در این مقاله به معرفی مولد موج و برخی کاربردهای آن پرداختیم. مدار مجتمع مولد موج ICL8038 را معرفی و با قابلیت‌ها و برخی نکات طراحی با آن آشنا شدیم. سپس تجربه‌ی نگارنده در ساخت کیت ساده‌ای با این مدار مجتمع را از نظر گذرانده و کیفیت موج‌های تولیدشده را هم مقداری بررسی کردیم. سادگی، قیمت کم و کیفیت خوب همگی به ارزش این مدار مجتمع می‌افزایند. همچنین نگاه‌کردن به مدار مجتمع جدیدتر XR2206 هم توصیه می‌شود.

مراجع:

طبیعتا کاملترین منبع برای این مدار مجتمع برگه اطلاعاتی آن است:

ICL8038 datasheet, Harris Semiconductor, Sep 1998

پس از استقبال فراوان از ICL8038، مهندسان شرکت با سوالات بسیاری از سوی مشتریان روبرو شدند که پس از مدتی برخی از آنها را هم در سندی ارزشمند منتشر کردند:

Everything You Always Wanted to Know About the ICL8038, Bill O'Neil, Harris Semiconductor

برای یافتن پاسخ سوالات احتمالی در الکترونیک این اثر سترگ را ببینید:

The Art of Electronics, Paul Horowitz and Winfield Hill ,3rd edition

این کتاب کاربردهایی از مولد موج در فیزیک تجربی را پوشش داده:

هنر فیزیک تجربی، نوشته پرستون و دیتس، ترجمه محمد لامعی رشتی و نادر حیدری، مرکز نشر دانشگاهی

برای آشنایی با تکنیک تقویت کننده قفل شونده این متن را ببینید:

Application note #3: About Lock-in amplifiers, Stanford Research Systems (www.thinkSRS.com)

یا که به بخش آشنایی با تکنیک در راهنمای کاربری هر یک از مدل ها مثلا SR510 مراجعه کنید.

۱۷ Rise Time
۱۸ Fall Time
۱۹ Total Harmonic Distorsion (THD)

مروری بر سیستم‌های پیچیده و اصول حاکم بر کنترل‌پذیری آن‌ها

حمیدرضا علیمحمدی

برای مدت مدیدی رویکرد فروکاست گرایانه[1] در علم رویکردی محبوب و مقبول تلقی می‌شد. این رویکرد بر این اصل استوار است که هر سیستم خاصی را می‌توان بر پایه‌ی اصول بنیادی حاکم بر مقیاس‌های کوچک‌تر آن سیستم و یا واحدهای سازنده‌ی آن مورد مطالعه قرار داد. در حقیقت این رویکرد پایه و اساس شکل‌گیری بسیاری از زمینه‌ها و مطالعات بنیادی اعم از فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی بوده است.

با وجود اینکه در دنیای علم تقریباً همه موافق این هستند که علم شیمی، مبتنی بر علم فیزیک بوده و تقریباً هر پدیده‌ی شیمیایی با اصول بنیادی فیزیک قابل توصیف است و همینطور اینکه اصول بنیادی علم شیمی پایه‌ی مطالعات زیست‌شناسی مولکولی است؛ اما این رویکرد فروکاست گرایانه در برخی موارد بسیار بحث برانگیز بوده‌است؛ برای مثال، توجیه پدیده‌های روانشناسی از اصول حاکم بر زیست شناسی مولکولی. سوالی که مطرح می‌شود: چنین رویکردی تا کجا می‌تواند معتبر باشد؟

alimohammadi.hamidreza@gmail.com

حد اعتبار این رویکرد با ظهور به اصطلاح «برآمدگی[۲]» تعیین می شود؛ خواصی نوظهور، حاصل اندرکنش مجموعه‌ای از زیر سیستم‌های متصل که هیچ‌یک از آن‌ها به تنهایی قادر به بروز آن‌ها نیستند. برای مثال، مغز انسان را در نظر بگیرید که شبکه‌ای بزرگ و درهم تنیده از سلول‌های عصبی است که اندرکنش‌های نابدیهی[۳] و غیرخطی میان آن‌ها، در ذهن و روان پیچیده‌ی او انعکاس پیدا می‌کند. خواصی که مشابه آن را، هرگز در این ابعاد نمی‌توان از یک سلول عصبی انتظار داشت. با وجود این که می‌توان این خواص را -که در طبیعت نیز به وفور یافت می شوند- در نهایت به همان قوانین بنیادی حاکم بر طبیعت کاهش داد اما نمی‌توان از مسیر عکس، یعنی با استفاده از همان مجموعه اصول بنیادی آن‌ها را توصیف و یا پیش‌بینی کرد. بنابراین سیستم‌هایی وجود داشتند که برای توصیف و مطالعه رفتار آن‌ها در مقیاس‌های بزرگتر به چارچوب و رویکرد جدیدی نیاز بود چرا که رویکرد پایین به بالا یعنی -تعمیم جزء به کل- از پیش بینی بسیاری از مشاهدات ناتوان بود؛ رویکردی که بعدها «مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده» نام‌گرفت.

یکی از مقالاتی که از لزوم وجود چنین نگرشی صحبت کرد و هم اکنون نیز مورد توجه جامعه‌ی علمی قرار دارد و به آن استناد می‌شود مقاله‌ی ف. اندرسون[۴] ، فیزیکدان نظری برنده‌ی جایزه‌ی نوبل، تحت عنوان «بیشتر، متفاوت است»[۵] بوده‌است. در این مقاله که بیان راحت و شیوایی هم دارد، از شکست تقارن در مقیاس‌های بالاتر ماده صحبت می‌شود در حالی که در مقیاس‌های بنیادی و ذره‌ای، تقارن وجود دارد. او این شکست تقارن را نشانگر ساختار سلسله مراتبی علم[۶] می‌داند و ادعا می‌کند که «حتما سطوح ساختاری به مراتب بیشتری بین یک مولکول DNA و کردارشناسی[۷] (روانشناسی رفتاری) انسان وجود دارد تا میان الکترودینامیک کوانتومی و DNA، و هر مرحله نیازمند چارچوب ادراکی کاملاً جدیدی است». او ادعا می‌کند که دانستن قوانین بنیادی حاکم بر طبیعت برای توصیف همه‌ی پدیده‌ها کافی نیست و در هر سطحی از پیچیدگی، نیازمند قوانین بنیادی حاکم در همان سطح هستیم.

برای سال‌ها این تصور رایج وجود داشت که عدم توانایی ما در فروکاستن سیستم‌های به اصطلاح پیچیده، به موجب درک ضعیف ما و اطلاعات ناقصی است که از متغیرهای بسیار زیاد در چنین سیستم‌هایی داریم و همین باعث دیده نشدن قاعده‌مندی‌هایی است که به دنبال آن هستیم. اما طی چند دهه‌ی گذشته داده‌های تجربی و دستاوردهای نظری این را ثابت کرده‌است که پیچیدگی اطلاق شده به این دست سیستم‌ها بر خلاف تصور در حقیقت ریشه در همان قوانین بنیادی فیزیک دارند. این درک از پیچیدگی در سال‌های اخیر راهگشای مطالعات گسترده و به‌شدت بین رشته‌ای در شاخه‌ای از علم تحت عنوان «سیستم‌های پیچیده» شده‌است که محل تلاقی بسیاری از ابزارها و مفاهیم علمی از شاخه‌های مختلف همچون دینامیک غیرخطی، فیزیک آماری، نظریه‌ی اطلاعات، احتمال، علوم تحلیل‌داده و .... شده‌است.

همانطور که اشاره شد، طی دهه‌های اخیر به تبع پیشرفت تکنولوژی و درک بیشتر ما از پدیده‌ها در مقیاس‌های بزرگتر و پیچیده‌تر، نیاز به یک رویکرد جدید قویاً احساس می‌شد و اینگونه بود که پارادایم «سیستم‌های پیچیده» برای توصیف بسیاری از پدیده‌ها جایگزین فروکاستگرایی در دنیای علم شد. در حقیقت، سیستم‌های پیچیده زیرمجموعه‌ای از نظریه‌ی سیستم‌ها است و مشخصاً به کلاسی از سیستم‌ها می‌پردازد که رفتاری بیش از مجموع رفتار اجزایشان را به نمایش می‌گذارند. تا به‌حال نظریه‌ی واحدی برای سیستم‌های پیچیده ارائه نشده‌است، گرچه می‌توان در مورد برخی خواص‌شان بطور کلی نظر داد برای مثال در مورد پویایی سیستم، اما در حالِ حاضر مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده به تناسب مقیاس و زمینه‌ی علمی مرتبط انجام می‌شود و یک نسخه‌ی کلی برای آن در نظر گرفته نمی‌شود.

با وجود اینکه تا به‌حال تعریف دقیق و مشخصی از این گونه سیستم‌ها ارائه نشده است، امّا می‌توان یک سیستم پیچیده را مجموعه‌ای از تعداد بسیار زیادی از اجزا که به واسطه‌ی اتصالات غیربدیهی برهمکنش‌های غیرخطی با یکدیگر دارند در نظر گرفت، آنچنان‌که در مقیاس‌های بزرگتر از مقیاس طبیعی زیر سیستم‌هایش، رفتارهای برآمده و جدید بروز می‌دهد و چنین رفتارهایی هرگز از هیچ کدام از زیرسیستم‌هایش قابل انتظار نیست. در حقیقت، چنین رفتارهایی که مستقیماً به واسطه‌ی غیرخطی بودن اندرکنش‌ها ایجاد می‌شوند، مهم‌ترین خصیصه‌ی متمایز کننده‌ی سیستم‌های پیچیده است. همچنین یکی دیگر از خصوصیت‌هایی که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد؛ این است که این سیستم‌ها در حقیقت سامانه‌های باز هستند و با محیط اطراف خود اندرکنش دارند و همین امر است که به این سامانه‌ها اجازه‌ی گذار به حالت‌هایی دور از تعادل را می‌دهد که نتیجه‌ی آن ظهور رفتارهای جمعی[۸] و خود-ساماندهی[۹] خواهدبود.

آنچه که سال‌ها در علوم مختلف با آن سر و کار داشته‌ایم، سیستم‌هایی با ابعاد بسیار کوچک و یا ابعاد

۱ Reductionist Hypothesis
۲ Emergence
۳ Non-trivial
۴ P. W. Anderson
۵ More is different
۶ Hierarchical Structure
۷ Ethology
۸ Collective Behavior
۹ Self-organization

بسیار بزرگ بوده‌اند ولی زیبایی سیستم‌های پیچیده این است که به مطالعه‌ی پدیده‌های مهمی می‌پردازد که در آن‌ها سامانه و مشاهده کننده در مقیاس‌های هم مرتبه‌ی زمانی و فضایی تکامل می‌یابند. همچنین، در پدیدارشناسی رفتار غیرخطی این دست سیستم‌ها می‌توان به دینامیک دور از تعادل، مقیاس‌های توانی[10]، فراکتالیتی چندگانه[11]، آشوب، بحرانیت خود سامانده، آوالانش و آمار غیرگاوسی اشاره‌کرد.

اما ابزارهای مطالعه‌ی چنین سیستم‌هایی چه هستند؟ یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین ابزاری که برای مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد شبکه‌ها هستند. این شبکه‌ها در حقیقت گراف‌هایی هستند با تعدادی گره، که تحت یک هندسه‌ی نابدیهی و پیچیده، به توسط یال‌هایی جهت‌دار و یا بی‌جهت، وزن‌دار و یا بدون وزن به یکدیگر متصل شده‌اند. استفاده از این ابزار در دهه‌های اخیر در بسیاری از شاخه‌ها رایج شده‌است و بنیان وسیع ریاضیاتی آن یعنی نظریه‌ی گراف‌ها، ابزار و مفاهیم کاربردی بسیاری برای مطالعه‌ی انواع شبکه‌های پیچیده، فراهم آورده‌است. در واقع دو مورد از مهمترین ابزار مطالعه‌ی این سیستم‌ها «شبکه‌های پیچیده»[12] و «علوم تحلیل داده»[13] هستند که ما در این مقاله با استفاده از شبکه‌های پیچیده، به مرور اجمالی برخی اصول بنیادی کنترل سیستم های پیچیده -شاخه‌ای که اخیراً بسیار مورد توجه واقع شده‌است- خواهیم پرداخت.

از زمان اولین مطالعات و پژوهش‌ها در زمینه‌ی مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده تا همین دهه‌ی اخیر، تلاش عمده‌ی جامعه‌ی علمی بر روی اندازه‌گیری، مشاهده و مدل‌سازی این نوع سیستم‌ها متمرکز بوده‌است. اما در دهه‌ی اخیر و به‌خصوص چند سال گذشته، مباحث و مسائل مرتبط با کنترل سیستم‌های پیچیده، تبدیل به موضوعی جذاب و البته بسیار مهم در این زمینه شده‌است. در واقع، محرک این حجم از مطالعات و پژوهش‌ها، تلاش چالش بر انگیز برای درک اصول و قواعد حاکم بر کنترل سیستم‌های خود-سامانده بوده‌است. اخیراً، درک روبه‌رشدی از این واقعیت شکل گرفته‌است که اصول طراحی سیستم‌های پیچیده، مطابق نیازی که برای کنترل رفتار این دست سیستم‌ها وجود دارد، معین می‌شوند. به عنوان مثالی شهودی، می‌توان به این اشاره کرد که ساختار شبکه‌ای و دینامیکی روزمره‌ی یک موسسه یا نهاد، عمیقاً با اصول مدیریتی (کنترلی) حاکم در آن بازه‌ی زمانی مرتبط است. همچنین در خصوص شبکه‌های برق و اینترنت، امروزه مطالعات و پژوهش‌های بسیاری صرف طراحی کنترل‌پذیرترین ساختار به منظور تطابق با نیازها و عملکردهای جدید می‌شود. این کاربردهای بسیار و واقعیت‌های مشاهده شده، منجر به حجم عظیمی از کارهای پژوهشی به‌منظور مطالعه‌ی ارتباط میان ساختار و کنترل پذیری سیستم‌های پیچیده شده‌است.

پیشرفت‌های دو دهه‌ی اخیر در علوم شبکه[14] راه را برای مطالعات در زمینه‌ی کنترل پذیری سیستم‌های پیچیده هموار کرده‌است. یکی از نتایج بسیار مهم این بوده‌است که ساختار شبکه‌ی سیستم، و فرایندهای دینامیکی که در آن جریان دارد، می‌توانند از یکدیگر متاثر شوند. به عبارت دیگر، در عین اینکه کاشف به عمل آمد بسیاری از شبکه‌های واقعی، مشخصات کلی ساختاری یکسانی دارند (که درواقع حاصل اصول دینامیکی مشترکی هستند که حاکم بر شکل‌گیری و رشد آن‌ها هستند)، همزمان نیز تاثیرگذاری بنیادی ساختار سیستم بر پروسه‌های دینامیکی که در آنها به وقوع می‌پیوندد، مانند شیوع اپیدمی و یا همگامی[15] گزارش شده است و همین موجب شد تا تاثیرگذاری احتمالی ساختار بر کنترل‌پذیری نیز، مورد بررسی قرارگیرد.

با وجود اینکه عبارت «کنترل» در گستره‌ای از زمینه‌های مختلف تحت معانی متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما تعریف دقیقی که از آن در نظریه‌ی کنترل-شاخه‌ای بین رشته‌ای و بسیار تکامل یافته- ارائه می‌شود اینگونه بیان می‌کند که چگونه می‌توانیم رفتار یک سیستم دینامیکی را با ورودی‌های مناسب تحت تاثیر قرار دهیم، به‌طوری‌که خروجی سیستم، یک مسیر مطلوب و یا یک حالت نهایی مطلوب دلخواه باشد. یکی از مفاهیم کلیدی در کنترل، بازخورد[16] است، و همین مفهوم است که می‌تواند دینامیک سیستم را به سمت حالت دلخواه سوق دهد. کنترل بازخوردی، در فیزیک و مهندسی سابقه‌ای طولانی دارد، و می‌توان این واقعیت را در طراحی موتور بخار جیمز وات که توصیف ریاضی آن، در نوشته های ماکسول در اواسط قرن هفدهم یافت می‌شود، مشاهده کرد. در این مقاله، تعدادی از روش‌های شناخته‌شده و اصول بنیادی را که به منظور کنترل حالت سیستم‌های پیچیده تاکنون ارائه‌شده‌است، مرور خواهیم کرد.

قبل از اینکه در مورد چگونگی کنترل یک سیستم تصمیم‌گیری کنیم، ابتدا باید در مورد اینکه آیا درکل سیستم مورد نظر کنترل‌پذیر است یا نه، اطمینان حاصل کنیم، از این رو، مفهومی تحت عنوان کنترل‌پذیری[17] تعریف می‌شود. کنترل‌پذیری، مفهومی کلیدی، در نظریه‌ی کنترل امروزی محسوب می‌شود و در حقیقت، سنجه ایست از توانایی ما برای هدایت یک سیستم دینامیکی به سمت حالت مطلوب نهایی در زمان

۱۰ Power-law Scaling
۱۱ Multi-fractality
۱۲ Complex Networks
۱۳ Data Science
۱۴ Network Science
۱۵ Synchronization
۱۶ Feedback
۱۷ Controllability

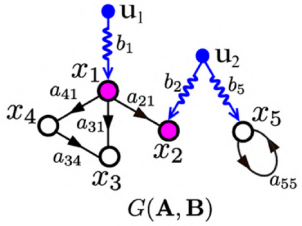
محدود. همانطور که در ادامه خواهیم دید، مطابق تعریف کالمن[18] ، یک سیستم کنترل‌پذیر است، اگر بتوانیم آن را از هر حالت اولیه‌ای به هر حالت دلخواه نهایی، در زمان محدود انتقال دهیم. بنابراین، چالش اصلی این خواهد بود که بتوانیم برای یک سیستم دینامیکی دلخواه، تحت کنترل مجموعه‌ای از سیگنال‌های ورودی، تصمیم بگیریم که آیا این سیستم کنترل‌پذیر هست یا نه؟ به طور کلی، کنترل‌پذیری پیش نیاز کنترل است، پس درک خواص ساختاری شبکه‌ی سیستم تحت مطالعه که کنترل‌پذیری سیستم را مشخص می‌کند بسیار مهم است.

قسمت قابل توجهی از منابع موجود در زمینه‌ی نظریه‌ی کنترل، منحصراً به سیستم‌های خطی می‌پردازند، به چند دلیل: اول اینکه سیستم‌های خطی، مدل دقیقی برای بعضی از مسائل واقعی می‌تواند باشد. دوم اینکه، در حالی که بسیاری از سیستم‌های پیچیده‌ی دنیای واقعی، توسط اندرکنش‌های غیرخطی بین اجزای خود توصیف می‌شوند، اما قدم اول در هر تلاشی برای کنترل، بررسی کنترل‌پذیری سیستم خطی شده در یک ناحیه‌ی محدود خواهد بود. و دلیل سوم نیز این است که تحت مطالعه‌ی سیستم خطی شده، قبل از هر چیزی می‌توانیم تاثیر ساختار سیستم‌های پیچیده را که مطالعه‌ی آن در شرایط غیرخطی به مراتب سخت‌تر می‌تواند باشد را بر روی کنترل‌پذیری بررسی کنیم. در ادامه، چارچوب‌های بررسی کنترل‌پذیری نوع خاصی از سیستم‌ها را مرور خواهیم کرد.

نقطه‌ی شروع تقریباً تمام رهیافت‌های کنترل، سیستم‌های خطی ناوردای زمانی ست، که در این نوشتار، تحت عنوان سیستم LTI[19] به آن اشاره خواهیم کرد. چنین سیستمی را، با N عنصر برهمکنشی که توسط M سیگنال ورودی کنترل می‌شود، به صورت زیر می‌توان توصیف کرد:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \qquad (۱)$$

که در آن $x(t) \in \mathbb{R}^N$ بردار حالت سیستم در زمان t و ماتریس $A_{N\times N}$(ماتریس مجاورت)، توصیف کننده‌ی برهمکنش‌های موجود در سیستم است. همچنین بردار $u(t) \in \mathbb{R}^M$ بعدی M مشخص کننده‌ی سیگنال ورودی است که از طریق ماتریس $B_{N\times M}$ بر روی دینامیک سیستم تاثیر می‌گذارد. راس‌هایی که از سیگنال ورودی غیر یکسان تاثیر می‌پذیرند، راس‌های محرک سیستم نامیده می‌شوند. مثالی از چنین سیستم تحت‌کنترلی در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است. در ادامه، شرایط کنترل‌پذیری را مرور خواهیم کرد.



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} ; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_5 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

شکل۱: مثالی از ماتریس مجاورت و ماتریس کنترل یک سیستم ساختاری.

شرط کنترل‌پذیری کالمن تعیین می‌کند که آیا یک سیستم LTI با مجموعه‌ی مشخصی از ورودی‌ها، قابل کنترل است یا خیر. براساس این شرط، سیستم با مجموعه‌ی ورودی‌های خاص و برهم کنش‌های مشخص (یعنی با (A, B) مشخص)، کنترل‌پذیر خواهدبود اگر و تنها اگر ماتریس $N \times NM$ بعدی کنترل‌پذیری آن یعنی:

$$C \equiv [B, AB, A^2B, ..., A^{N-1}B] \qquad (۲)$$

مرتبه کامل[21] داشته باشد.

مرتبه‌ی یک ماتریس به معنای ابعاد فضای برداری است که توسط ستون‌های آن گسترانیده می‌شود و رنک کامل بودن ماتریس، به این معناست که «همه»‌ی بردارهایی که از ستون‌های ماتریس ساخته می‌شوند، مستقل‌خطی باشند. این شرط از آن جا ناشی می‌شود که جواب معادله‌ی ۱ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$x(t) = \int_0^t \exp[A(t-\tau)]Bu(\tau)d\tau \qquad (۳)$$

که اگر در آن عبارت $\exp[A(t-\tau)]$ را به صورت سری بسط دهیم، در می‌یابیم که بردار $x(t)$ در واقع برحسب ستون‌های ماتریس $[B, AB, A^2B, ..., A^{N-1}B]$ بسط داده‌می‌شود. پس اگر این ستون‌ها مستقل خطی باشند، می‌توان $x(t)$ را در هر راستای دلخواهی جابه‌جا کرد، بدون آنکه مقدار آن در راستای دیگری تحت تاثیر قرار گیرد.

اما، در حقیقت چک کردن شرط کنترل پذیری کالمن، به صورت عددی، کاری بسیار وقت‌گیر خواهدبود؛ چرا

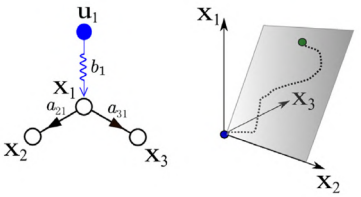
۱۸ Kalman
۱۹ Linear-time-invariant
۲۰ Driver node
۲۱ Full Rank

که برای بسیاری از سیستم‌های پیچیده، پارامترهای سیستم (برای مثال عناصر ماتریس مجاورت)، به شکل دقیق مشخص نیستند؛ در اغلب موارد، اندازه‌گیری وزن اندرکنش‌ها در سیستم امکان‌پذیر نیست و اطلاعات ما اغلب محدود می‌شود به اینکه آیا صرفاً چنین اندرکنش‌هایی بین هر دو زیرسیستم وجود دارد یا نه و در آخر اینکه در برخی موارد، اتصالات و وزن آنها وابستگی زمانی خواهنداشت به این معنی که در مقیاس‌های زمانی خاصی تغییر می‌کنند. از همین روی، به منظور درک کنترل‌پذیری سیستم‌های پیچیده با همه‌ی خصوصیاتی که مطرح شد، مفهوم «کنترل‌پذیری ساختاری[۲۲]» ارائه شد. در ادامه، به این چارچوب کنترل‌پذیری می‌پردازیم.

در ابتدا، سعی می‌کنیم تا با مفهوم «سیستم ساختاری[۲۳]» آشنا شویم. یک سیستم LTI تحت اتصالات و کنترل (A, B)، یک سیستم ساختاری محسوب می‌شود، اگر همه‌ی عناصر این دو ماتریس یا صفر باشند و یا «متغیرهای آزاد مستقل[۲۴]». با وجود چنین تعریفی می‌توانیم کنترل‌پذیری را بدون انجام محاسبات وقت‌گیر شرط کالمن به ازای مقادیر عددی، صرفاً با بررسی برای پارامترهای شبکه‌ی تحت کنترل، مطالعه کنیم. مثالی در شکل ۲ آورده شده است که ماتریس کنترل‌پذیری آن به شکل زیر خواهدبود:

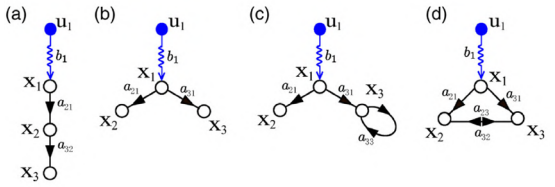
$$\mathcal{C} = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21}b_1 & 0 \\ 0 & a_{31}b_1 & 0 \end{pmatrix}$$

و می‌بینیم که در این مثال دو سطر آخر وابسته‌ی خطی هستند و بنابراین ماتریس مرتبه‌ی کامل نیست، پس سیستم کنترل‌پذیر نخواهد بود.



شکل۲: مثالی از یک سیستم ساختاری که شرط کالمن را اقناع نمی‌کند، بنابراین حالت‌های قابل دسترس به یک صفحه محدود خواهندبود.

قدرت کنترل ساختاری از اینجا ناشی می‌شود که اگر برای یک انتخاب از پارامترها، تحت یک گراف مشخص مجاورت و چینش مشخص سیگنال‌های کنترلی، سیستم کنترل‌پذیر باشد، آنگاه برای همه‌ی انتخاب‌های دیگر، تحت همان (A, B)، سیستم کنترل‌پذیر خواهدماند مگر برای تعدادی از انتخاب‌ها که منجر به معیار «لبِگ‌صفر»[۲۵] می‌شوند (شکل ۳). اگر تحت اتصالات پارامتریک مشخص، هیچ معیار صفری وجود نداشته‌باشد، به آن سیستم، «کنترل‌پذیر قوی ساختاری[۲۶]» می‌گویند.



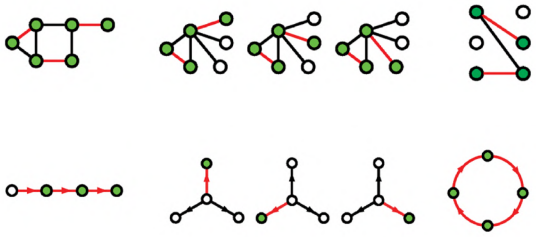
شکل۳: مثال‌هایی از کنترل‌پذیری شبکه‌های ساختاری. چیدمان‌های (a) و(c) کنترل پذیرند، (b) کنترل پذیر نیست و (d) کنترل پذیر است مگر در شرایط معیار لبگ‌صفر که در آن $a_{32}a_{21}^2 = a_{23}a_{31}^2$

تاکنون در این مورد صحبت کردیم که با داشتن یک سیستم دلخواه تحت کنترل چگونه می‌توان کنترل‌پذیری آن را تعیین کرد، اما اینکه چه ترکیبی از رأس‌های شبکه که تعداد معقولی هم داشته‌باشند می‌توانند کنترل‌پذیری را تضمین کنند و اصولاً یافتن کمترین تعداد رئوس محرک برای تضمین کنترل‌پذیری موضوعی بسیار پراهمیت است که در ادامه به آن خواهیم‌پرداخت.

به منظور یافتن سیستم (A, B)ای که با کمترین تعداد رئوس کنترل‌پذیر باشد، با استفاده از روش‌های آزمون کنترل‌پذیری که در بخش‌های گذشته مطرح شد، باید حدود 2^N ماتریس B متفاوت را مورد بررسی قرار دهیم، که این حتی در حد ابعاد شبکه (N های) کوچک نیز از لحاظ محاسباتی بسیار هزینه‌بر است. اما در سال‌های گذشته چندین حل برای چنین مسئله‌ای ارائه شده‌است که در ادامه به دو مورد از آن‌ها اشاره خواهیم‌کرد.

اولین حلی که برای مسئله‌ی کمترین تعداد راس‌های محرک[۲۷] ارائه شد، در حقیقت از یک مفهوم نظریه‌ی گراف تحت عنوان «حداکثر تطابق[۲۸]» بهره می‌برد. در یک گراف، به مجموعه‌ای از یال‌های گراف که با هم، راس هموند[۲۹] (مشترک) ندارند، تطابق یا مجموعه‌ی ناوابسته‌ی یال‌ها گفته می‌شود. گرچه در گراف‌های جهت‌دار این تعریف به مجموعه‌ای از یال‌ها نسبت داده می‌شود که راس‌های آغازین و پایانی مشترک نداشته‌باشند. بزرگترین زیر مجموعه از چنین مجموعه‌هایی، که می تواند یکتا هم نباشد، مجموعه‌ی یال‌های حداکثر تطابق نامیده می‌شوند. مثال‌هایی از چنین مجموعه‌هایی در شکل ۴ آورده‌شده‌است.

۲۲ Structural Controllability
۲۳ Structural System
۲۴ Free Independent Variables
۲۵ Lebesgue Measure zero
۲۶ Strong Structurally Controllable
۲۷ Minimum Driver Nodes
۲۸ Maximum Matching
۲۹ Commen Vertice



شکل۴: مثال‌هایی از مجموعه حداکثر تطابق، برای شبکه‌های نوعی جهت‌دار و بدون‌جهت. راس‌های سبز رنگ، منطبق شده و سفیدها منطبق نشده اند. همچنین یال‌های قرمز رنگ، عضو مجموعه‌ی حداکثر تطابق هستند.

می‌توان نشان داد، که کوچک‌ترین مجموعه‌ی رئوس لازم برای ارضای شرط کنترل‌پذیری ساختاری، در حقیقت همان راس‌های «منطبق نشده[۳۰]» خواهندبود که باز هم در شکل ۴ مشهود است. اما به منظور یافتن مجموعه‌ی حداکثر تطابق، می‌توان از روش «هاپکرافت-کارپ[۳۱]» استفاده کرد. این روش در حقیقت شبکه‌ی جهت‌دار را به یک شبکه‌ی بدون‌جهت و دوتایی[۳۲] تبدیل کرده و سپس مجموعه‌ی حداکثر تطابق آن را با پیچیدگی زمانی $\mathcal{O}(\sqrt{N}E)$ که در آن، N تعداد رئوس شبکه و E تعداد یال‌های موجود در شبکه است، محاسبه می‌کند. پس از مشخص شدن راس‌های منطبق‌نشده، آن‌ها را با سیگنال‌های کنترلی متمایز باید کنترل کرد.

امّا، واقعیتی که وجود دارد، آن است که در کنترل‌پذیری ساختاری -همانطور که قبلا هم اشاره شد- فرض شده‌است که عناصر ماتریس مجاورت یا صفر و یا پارامترهایی مستقل و آزاد باشند و این، به این معناست که تحت این روش، تنها می‌توان شبکه‌های جهت‌دار و وزن‌دار (بدون وزن‌های یکسان) را در نظر گرفت. بنابراین، نیاز به یک چارچوب برای بررسی کنترل‌پذیری و همچنین استخراج تعداد کمترین راس‌های محرک، برای هر نوع شبکه‌ی دلخواهی وجود داشت که پس از مدتی روش دیگری برای بررسی کنترل‌پذیری پیشنهاد شد که در ادامه آن را معرفی می‌کنیم.

باز هم در ابتدا همانند قبل یک سیستم خطی ناوردای زمانی LTI را در نظر می‌گیریم. نظریه‌ی PBH[۳۳] اینگونه عنوان می‌کند که، چنین سیستمی کاملاً کنترل‌پذیر خواهدبود اگر و فقط اگر چنین شرطی برقرار باشد:

$$rank[c\mathbb{I}_N - A, B] = N \qquad (۴)$$

که در آن $\mathbb{I}_N$ ماتریس واحد است و c هر عدد دلخواهی از مجموعه‌ی اعداد موهومی است. اما می‌توان ثابت کرد:

$$\forall c \in \mathbb{C} \quad | \quad c \ni \{\lambda_i(A)\} \rightarrow rank[c\mathbb{I}_N - A, B] = N \qquad (۵)$$

که در آن $\{\lambda_i(A)\}$ در حقیقت مجموعه‌ی ویژه مقادیر ماتریس مجاورت شبکه است، بنابراین در شرط (۴) تنها کافیست مقادیر $c \in \{\lambda_i(A)\}$ مورد بررسی قرارگیرند.

ما در واقع به دنبال یک ماتریس مناسب B هستیم، تا تحت این آزمون کنترل‌پذیری، مجموعه‌ی کمترین رئوس محرک را پیدا کنیم. بنابراین برای تشخیص اینکه سیگنال کنترل به کدام قسمت‌های شبکه باید تزریق شود، ابتدا باید کمبود مرتبه‌ی[۳۴] $[c\mathbb{I}_N - A]$ را درک کنیم، به این معنا که کدام سطرها به‌صورت خطی وابسته هستند. مشاهده می کنیم که اگر حداکثر کمبود مرتبه مرتبط با مثلاً ویژه‌مقدار λ_m جبران شود، آنگاه برای انتخاب‌های $c \in \{\lambda_i(A)\}$ شرط PBH ارضا خواهدشد، به بیانی دیگر اگر:

$$rank[\lambda_m\mathbb{I}_N - A] = min\big(rank[\lambda_i(A)\mathbb{I}_N - A]\big)\ \forall i, \qquad (۶)$$

آنگاه تعداد ستون‌هایی از B که لازم است برای جبران کمبود مرتبه تغییر داده‌شوند برابر خواهدبود با:

$$N - rank[\lambda_m\mathbb{I}_N - A], \qquad (۷)$$

و بدین ترتیب، شرط مورد نظر برای همه‌ی ویژه‌مقادیر دیگر اقناع خواهد شد.

به بیان دیگر، کمترین تعداد راس‌ها که باید برای کنترل‌پذیری کامل، مستقلاً کنترل شوند برابر است با:

$$N_D = max\{\mu(\lambda_i(A))\} \qquad (۸)$$

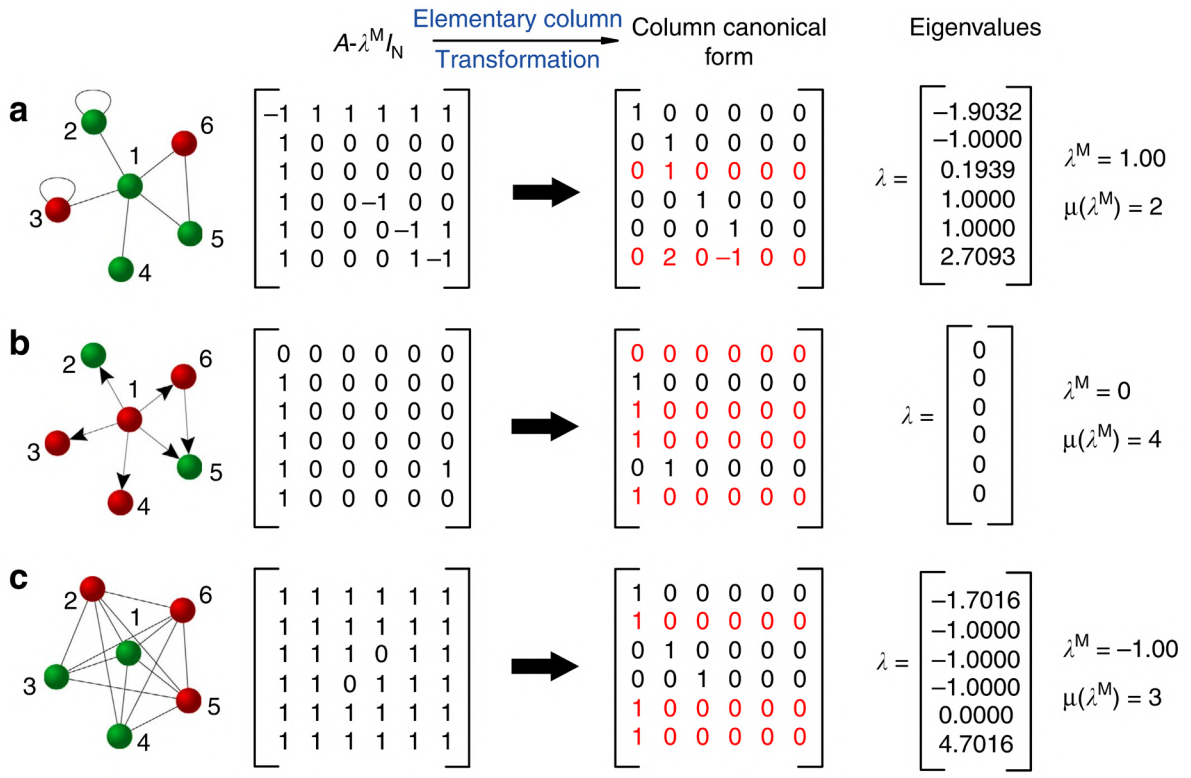
که در آن $\mu(\lambda_i)$ چند بارگی هندسی[۳۵] است که حداکثر تعداد ویژه‌بردارهای مستقل خطی متناسب با ویژه‌مقدار λ_i است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(\lambda) = N - rank[\lambda\mathbb{I}_N - A]. \qquad (۹)$$

در عمل، به منظور محاسبه‌ی مرتبه و تعیین مجموعه‌ی کمترین رئوس محرک، می توان از تبدیل ستونی[۳۶]ماتریسی استفاده کرد و در نهایت با تبدیل $A - \lambda_m\mathbb{I}$ به فرم کانونیک ستونی[۳۷] ، رئوس مرتبط با سطرهای وابسته‌ی خطی را به عنوان رئوس محرک به یک سیگنال‌های کنترلی متصل کرد. در شکل ۵ نمونه‌هایی از این روند نمایش داده شده‌است.

مشاهده می‌کنیم، این چارچوب کنترل‌پذیری که در عین حال کوچکترین مجموعه‌ی راس‌های محرک را نیز مشخص می‌کند، قابلیت اعمال بر روی هر شبکه

۳۰ Unmatched Nodes
۳۱ Hopcroft-Karp
۳۲ Bipartite
۳۳ Popov-Belevitch-Hautus
۳۴ Rank Deficiency
۳۵ Geometrical Multiplicity
۳۶ Elementary Column Transform
۳۷ Column Canonical Form



شکل۵: نمونه‌هایی از اعمال چارچوب «کنترل دقیق» و یافتن حداقل راس‌های محرک برای همه‌ی انواع شبکه‌ها (بدون جهت، جهت‌دار، دارای خود-حلقه، تنک، چگال).

با هر نوع ساختاری را دارد. اما در عین حال، به دلیل اینکه آزمون کنترل‌پذیری این روش، مبتنی بر ویژه‌مقادیر و مرتبه‌ی ماتریس است، و همچنین در نظر گرفتن این واقعیت که محاسبه‌ی ویژه‌مقدار و مرتبه‌ی یک ماتریس به ناچار خطاهای محاسباتی به همراه خواهد داشت، می توان گفت که خطاهای محاسباتی به ازای ابعاد بزرگ شبکه و چگالی اتصالات بالا، محتمل خواهندبود. بنابراین، در شبکه‌هایی که شرط کنترل ساختاری را اقناع می‌کنند، استفاده از چارچوب کنترل ساختاری به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر نسبت به این روش -که پیچیدگی زمانی محاسبه‌ی آن از مرتبه‌ی $\mathcal{O}(N^2(log(N))^2)$ خواهدبود- منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

در این نوشتار ما به تعریف سیستم‌های پیچیده، تعریف کنترل‌پذیری و اصول آن و همچنین مرور دو تا از معروف‌ترین روش‌هایی که کنترل خطی سیستم‌های پیچیده را مستقیماً به ساختار هندسی آن‌ها مربوط می‌کنند پرداختیم. مشاهده کردیم که چگونه تلفیق نظریه‌ی کنترل و همینطور مفاهیم نظریه‌ی گراف‌ها و آمار علوم شبکه می‌توانند در همین گوشه‌ی خاص از این شاخه‌ی علم، ذات بین رشته‌ای بودن آن را به نمایش بگذارد. اما آنچه می‌توان در مورد کنترل سیستم‌های پیچیده گفت، می‌تواند وسیع‌تر و گسترده‌تر باشد چرا که به دلیل اهمیت فوق‌العاده‌ی آن در رام‌کردن سیستم‌های طبیعی و ساخته‌ی بشر توجه بسیاری را طی سالیان اخیر به خود معطوف کرده‌است و در حال حاضر یکی از موضوعات داغ میان رشته‌ای محسوب می‌شود. فرض کنید که بتوان با کنترل بخشی از یاخته‌های زنده‌ی بیمار آن را به حالت نرمال هدایت کرد و یا اینکه بتوان تنها با اعمال مقادیر خاصی از جریان الکتریکی به قسمت‌هایی از مغز شبکه‌ی عصبی را آن‌طور که مطلوب است تغییر داد و یا اینکه در آستانه‌ی حمله‌ی صرع، بشود آن را شناسایی و خنثی کرد.

هم اکنون علوم بین رشته‌ای در دنیا رشد و تقاضای فوق‌العاده‌ای دارند و پیشرفت تکنولوژی و حجم عظیمی از داده در هر زمینه‌ای سوال‌های فراوانی ایجادکرده‌است که برای پاسخ به آن‌ها، نیازمند دانش و ابزارهای متخصصین علوم پیچیدگی است و همین امر، از اهمیت فراوان این شاخه‌ی جوان دنیای علم حکایت می‌کند. و در آخر، نقل‌قول مورد علاقه‌ی همه‌ی کسانی که از علوم پیچیدگی می‌گویند و می‌نویسند؛ سال‌ها پیش در مصاحبه‌ای از فیزیکدان معروف «استیون هاوکینگ»

پرسیده می‌شود که نظر او در مورد این گزاره که می‌گویند «قرن بیستم قرن زیست‌شناسی بوده و قرن بعدی از آن فیزیک خواهدبود» چیست؟ او پاسخ می‌دهد: «قرن بیست و یکم قرن «پیچیدگی» خواهدبود».

پی‌نوشت:

من و دوستانم در گروه سیستم‌های پیچیده‌ی دانشکده‌ی فیزیک شریف -ورودی ۹۴ ارشد- به راهنمایی دکتر رحیمی‌تبار، بر روی مفاهیم کنترل و تاب‌آوری شبکه‌های پیچیده (همگامی سیستم‌های آشوبناک، شبکه‌های عصبی و شبکه‌ی برق) تحقیق و مطالعه کردیم و نتایج آن که حاصل کار همه‌ی گروه بود اکنون در مرحله‌ی نهایی چاپ در ژورنال «گزارش‌های علمی[۳۸]» به سر می‌برد. علاقه‌مندان می‌توانند نتایج پایان‌نامه‌های ارشد گروه ما را که در دفتر دکتر رحیمی‌تبار هم وجود دارد مطالعه کنند.

تاریخ نگارش: شهریور ۹۸

مراجع :

[1] Rahimi Tabar, M. (2019). analysis and data-based reconstruction of complex nonlinear dynamical systems. [s.l.]: Springer Nature.

[2] Liu, y. y., & Barabási, a. l. (2016). control principles of complex systems. Reviews of Modern Physics, 88(3), 035006.

[3] Liu, y. y., Slotine, j. j., & Barabási, a. l. (2011). controllability of complex networks. Nature, 473(7346), 167-173.

[4] Yuan, z., Zhao, c., di, z., Wang, w. x., & Lai, y. c. (2013). exact controllability of complex networks. Nature Communications, 4

[5] Alimohammadi, H. R. (2018). studying synchronization control in complex systems (master dissertation). Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

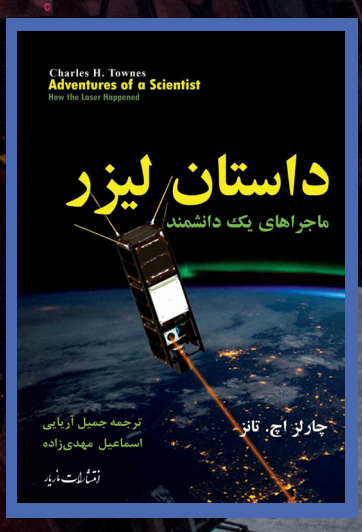
[6] Gregoire Nicolis and Catherine Rouvas-Nicolis (2007), Scholarpedia, 2(11):1473.

معرفی کتاب:

داستان لیزر: ماجراهای یک دانشمند

نوید اکبری

نظریه‌ی مکانیک کوانتومی در قرن بیستم، دیدگاه ما نسبت به طبیعت را دگرگون کرده است. یکی از دستاوردهای این نظریه، فناوری‌هایی است که برپایه‌ی اصول آن ساخته شده‌اند. بدون شک لیزر، یکی از افزاره‌هایی است که در انقلاب کوانتومی اول[1] ساخته شد و نه تنها بخش‌های مختلف فیزیک را دگرگون کرد، بلکه در زندگی انسان نیز کاربرد روزافزونی پیدا کرد. در این نوشته، کتاب «داستان لیزر» را معرفی می‌کنیم. نویسنده‌ی کتاب، چارلز هارد تاونز[2] مبدع ایده‌ی لیزر است که در سال ۱۹٦٤ نوبل فیزیک را به پاس تلاش‌های بنیادی در زمینه‌ی الکترونیک کوانتومی دریافت کرد. او در این کتاب داستان زندگی علمی خود را بیان کرده و هدف از نوشتن این کتاب را، توضیح روند توسعه‌ی علم و فناوری در برخورد انسان‌ها با یکدیگر و به زبان خودش «جامعه‌شناسی علم» می‌داند.



na78sam@gmail.com

این کتاب اوّلین بار توسط انتشارات دانشگاه آکسفورد Oxford University Press در سال ۱۹۹۹ چاپ شده و در ایران، توسط جمیل آریایی و اسماعیل مهدی‌زاده ترجمه و توسط انتشارات مازیار منتشر شده است. چارلز تاونز که یکی از فیزیک‌دانان تاثیرگذار قرن بیستم است، در این کتاب از مباحث مختلف سخن گفته است: از داستان پیشرفت علمی خود تا دریافت مدرک دکتری از انیستیتو فناوری کالیفرنیا Caltech، از کار در آزمایشگاه‌های بل در زمان جنگ‌جهانی دوم، از چالشی که بر سر ثبت اختراع لیزر برای او پیش آمد، از دانشجویان با استعداد خود چون علی جوان که لیزر گازی را ساخته است و از داستان ریاست خود برانجمن فیزیک آمریکا و مشاوره‌های علمی که در مسائل نظامی و دولتی داده است.

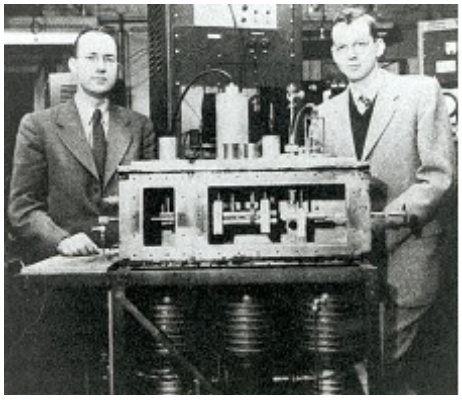
چارلز تاونز در سال ۱۹۱۵ در گرین‌ویل، ایالت کارولینای جنوبی، به دنیا آمد. کارهای پژوهشی او در زمینه‌ی اپتیک در قرن ۲۰ تحول عظیمی را به وجود آورد به‌طوری که راینهارد گنتزل[۳]، برنده‌ی نوبل فیزیک ۲۰۲۰، او را یکی از تاثیرگذارترین فیزیک‌دانان تجربی قرن بیستم می‌داند. لیزرها و میزرها، تداخل‌سنج مکانی مادون قرمز، سالیتون تاونز و حد تاونز–شوالو از مفاهیم و افزاره‌هایی هستند که تاونز در توسعه‌ی آن‌ها سهیم بوده است. تاونز در سال ۲۰۱۵ و هنگامی که ۹۹ سال داشت، در کالیفرنیا درگذشت.

متن کتاب ساده است و نویسنده در فصل اوّل، مفاهیم مورد نیاز برای توصیف عملکرد لیزر را به زبان ساده توضیح داده است. برای فهم برخی از جزئیات کتاب نیاز است با مکانیک کوانتومی و الکترومغناطیس آشنا باشید امّا حتی اگر فیزیک هم نخوانده باشید، به راحتی می‌توانید ایده‌ی کلی تاونز را درک کنید و با او همراه شوید. ترجمه‌ی کتاب به خوبی صورت گرفته و از واژگان جایگزین مناسب در متن کتاب استفاده شده است و غیر از چند اشتباه تایپی، مشکل دیگری در کتاب مشاهده نمی‌شود.

کتاب از ۱۰ فصل تشکیل شده است. تاونز در فصل اول به بررسی مفهوم تابش القائی و عملکرد لیزر می‌پردازد و کاربردهای مختلف لیزر را بیان می‌کند. از فصل دوم به بررسی زندگی خویش می‌پردازد. اینکه چگونه از کالج فورمن در نزدیکی محل زندگی خود ابتدا به دانشگاه دوک و سپس به کلتک می‌رود و در زمینه‌ی طیف‌سنجی به پژوهش می‌پردازد. علاقه‌ی او به فیزیک در سال اوّل کالج فورمن شکل می‌گیرد و اینکه با چند قانون بنیادی کل ساختار هر نظریه بنا می‌شود همیشه برای او جذّاب بوده است. شاید بتوان ویژگی شاخص او را توانایی‌اش در کار مهندسی دانست. تاونز توانایی اعجاب‌انگیزی در راه‌اندازی و کار با وسایلی همچون وان‌دو گراف‌ها ، پمپ‌های خلأ و .. داشته است و همین توانایی بعد از دریافت مدرک دکتری، او را در ۱۹۳۹ به آزمایشگاه‌های بل می‌کشاند.

تاونز در آزمایشگاه‌های بل، به بررسی امواج مایکرویو و ساخت رادار می‌پردازد که در زمان جنگ کمک بزرگی به ارتش محسوب می‌شد. پس از فروکش کردن تب جنگ، با تجربه‌ای که از امواج مایکرویو به‌دست آورده بود به حیطه‌ی طیف‌سنجی در این امواج کشیده می‌شود و این اوّلین گام برای سروکار داشتن با مولکول‌ها و حرکت به سمت ایده‌ی لیزر است. او در سال ۱۹۴۸ با پیشنهاد آی. آی. رابی[۴]، استاد دانشگاه کلمبیا می‌شود.

شاید بتوان فصول ۴ تا ۶ را قلب کتاب دانست. تاونز در این فصول به چگونگی طرح ایده‌ی میزر (لیزر مایکرویو) برمبنای تابش القایی و حرکت به سمت طول‌موج‌های کم‌تر و ساخت لیزر می‌پردازد. ورود او به کلمبیا دوران تازه‌ای در پژوهش‌هایش رقم می‌زند. او در آنجا با فیزیک‌دانان و دانشجویانی مواجه می‌شود که بسیاری از آن‌ها برنده جایزه نوبل شدند مانند رابی، کوش ، لمب و آرتور شوالو که بعداً با خواهر تاونز ازدواج می‌کند. در آن زمان تاونز به استفاده از حالت برانگیخته‌ی مولکول‌ها برای تولید تابش میلی‌متری فکر می‌کرد. صبح روز یکی از کنفرانس‌ها در سال ۱۹۵۱ ایده‌ی میزر به ذهن تاونز می‌رسد و اوّلین میزر در سال ۱۹۵۴ توسط هربرت زایگر ، تاونز و دانشجویش جیمز گوردون ساخته می‌شود.



شکل ۱: چارلز تاونز(سمت چپ) و جیمز گوردون (سمت راست) در کنار دوّمین میزر ساخته شده

نکته‌ی جالبی که تاونز به آن اشاره می‌کند، مدت زمان زیادی است که بین درک مفهوم تابش القائی و ساخته شدن اوّلین میزر برپایه‌ی آن وجود دارد. برطبق اسناد تاریخی، فیزیک‌دانان در دهه ۲۰ میلادی به خوبی با این مفهوم آشنا بودند امّا اوّلین میزر سه دهه بعد ساخته می‌شود. تاونز در ادامه، به بررسی تحول الکترونیک کوانتومی از ۱۹۵۴ به بعد می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه پژوهش روی یک مفهوم بنیادی فیزیکی منجر به تحولی در صنعت و پزشکی شد. شاید یکی از پژوهش‌های مهم تاونز در این تحول

۱ First quantum revolution
۲ Charles Hard Townes
۳ Reinhard Genzel
۴ Isidor Isaac Rabi

را بتوان همکاری او با آرنو پنزیاس برای استفاده‌ی میزر در مطالعات اخترفیزیکی دانست. تلاش‌های تاونز برای ساختن تقویت‌کننده‌ای با طول‌موج عملیاتیِ کم‌تر هم‌چنان ادامه می‌یابد. همکاری او با شوالو رویَ این مسئله ادامه می‌یابد؛ تا این‌که در سال ۱۹۵۸ مقاله‌ای با عنوان «میزرهای اپتیکی» در مجله‌ی Physical Review به چاپ می‌رسانند و این مقاله را می‌توان سرآغاز ایده‌ی لیزر دانست. در سال ۱۹۶۰، تئودور میمن اولین لیزر یاقوت را می‌سازد و لیزرهایی برپایه مواد دیگر در سال‌های بعدی ساخته می‌شوند.

فصل ۷ کتاب به بررسی ثبت اختراع لیزر و میزر می‌پردازد. علی‌رغم دقّتی که تاونز در ثبت اختراع میزر به خرج داد و آن را به نام خود ثبت کرد، او و شوالو در ثبت اختراع لیزر کوتاهی می‌کنند. این کوتاهی باعث به وجود آمدن چالش‌هایی میان او و گوردون گولد ، دانشجوی دکتری سابق کلمبیا، می‌شود. هرچند در نهایت رای دادگاه به نفع تاونز است و او تا ۱۹۷۶ ثبت اختراع لیزر را از آنِ خود می‌کند. شاید ذکر این نکته جالب باشد که کلمه‌ی «لیزر» اوّلین بار در دفترچه‌ی یادداشت گولد ظاهر شد و تاونز این وسیله را «میزر اپتیکی» می‌نامید. در حین توضیح این چالش‌ها، تاونز به تبیین تفاوت کشف علمی و اختراع می‌پردازد و توضیح می‌دهد که چگونه درآمدهای حاصل از ثبت اختراع می‌تواند باعث پیشرفت‌های بعدی شود.

در سه فصل آخر کتاب، تاونز به تبیین رابطه‌ی بین دانشمندان و دولت‌ها می‌پردازد. پس از ثبت اختراع لیزر، تاونز پژوهش در این زمینه را ترک می‌کند. او در این زمان برنده جایزه نوبل شده و به فیزیک‌دان مشهوری تبدیل شده است. به‌علاوه اعتقاد او مبنی بر مشاوره به دولت در زمینه‌ی تصمیم‌گیری‌های همگانی در مورد دانش تخصّصی، باعث می‌شود تا کرسی‌های مشاوره‌ی مختلف مانند تیم مشاوره آپولو و ریاست انجمن فیزیک آمریکا را تجربه کند. در این حین تاونز به پژوهش در زمینه اخترفیزیک رادیویی می‌پردازد. او که از زمان حضور در آزمایشگاه بل به این زمینه علاقه‌مند بود، رصدخانه‌هایی می‌سازد تا چشمه‌های تابش میزر در فضای میان ستاره‌ای را بررسی کند. در فصل ۱۰ کتاب نیز او درباره‌ی مسائلی صحبت می‌کند که پیشِ روی جامعه علمی قرار دارد و از اینکه توانسته عمر خودَ را صرف کندوکاو در علم کند، اظهار رضایت می‌کند.

در انتها با هم قسمتی از متن ترجمه‌ی فصل ۱۰ کتاب را می‌خوانیم:

«گاهی از من سؤال می‌شود که آیا امکان دارد داستانی مثل داستان لیزر، امروزه نیز در علم اتفاق بیافتد؟ این سؤال را بخشی به این خاطر می‌پرسند که گمان می‌رود دست کم علوم فیزیکی به کمال رسیده‌اند، یعنی ((ما همه‌ی علم پایه را شناخته‌ایم)) و بخشی به این خاطر است که علم امروزی حاصل تلاش گروه‌های بزرگی از دانشمندان است که به ابزار پیچیده و گران‌قیمت مجهزند. آیا جایی برای کشف باارزش دیگری مانده‌است؟ پاسخ من این است که داستانِ هر کشف علمی با کشف علمی دیگر فرق دارد و اساساً قابل پیش‌گویی نیست امّا چه بسا کشف‌های زیادی در راه باشند. هنوز ناشناخته‌های زیادی هست که ما نمی‌دانیم و در بسیاری از موارد هم درک نمی‌کنیم که نمی‌دانیم. کشف‌های واقعاً حیرت‌آور تنها به خود فرد بستگی دارند نه به گروه‌ها و یا کمیته‌ها، هرچند ممکن است این فرد خود عضوی از گروه باشد. تحصیلات عالیه‌ام را که داشتم تمام می‌کردم تصوّر می‌رفت که رشته‌ی اپتیک کاملاً درک شده و به کمال رسیده است و در آن موردِ هیجان‌انگیزی برای دنبال کردن باقی نمانده است. اندکی بیش از ۲۰ سال که گذشت، لیزر با علم جدیدی چون اپتیک غیرخطی که پیدایش تکنولوژی جدید مهمی برای علم و صنعت بود، عمری دوباره یافت».

مروری بر تاریخ شکل‌گیری نظریه‌ی الکترومغناطیس

زهرا اکبری | ارمیا اعتمادی

زمانی که به انشتین گفته‌شد که موفّقیت‌هایش به خاطر این است که بر شانه‌های نیوتن ایستاده، پاسخ داد: «نه، من بر شانه‌های ماکسول ایستاده‌ام.»

مقاله‌ی پیش‌رو کوشش اندکی برای جمع‌آوری تلاش بزرگان علم در توسعه‌ی نظریه‌ی الکترومغناطیس، به خصوص کارهای متأخر ماکسول و هویساید است. محدودیت کلمه باعث شد جزئیات بسیاری از قلم بیفتد، امّا منابع و مقالات به دقّت آورده شده‌اند. مطالعه‌ی مقالات این محقّقان، مخصوصاً فارادی و ماکسول، برای دریافت عمیق‌تر نبوغ به کاررفته در این مسیر، خالی از لطف نیست.

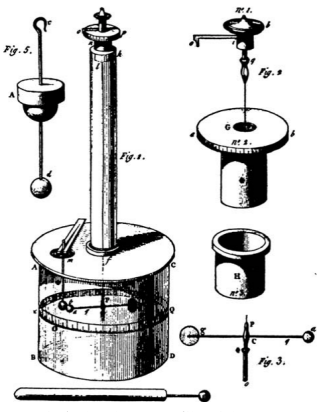
zahra.akbari80@gmail.com
epc1380@gmail.com

قرن ۱۸ میلادی و تلاش‌های اوّلیه

تـا قبـل از قـرن ۱۸ میـلادی، بـه جـز کارهـای ویلیـام گیلبـرت[۱]، قدم‌هـای جـدّی بـرای درک الکترومغناطیـس برداشته‌نشـده‌بود و تلاش‌هـای تأثیرگـذار عمدتـاً از زمـان بنجامیـن فرانکلیـن[۲] آغـاز می‌شـوند. فرانکلیـن بـا آزمایـش خطرنـاک پـرواز بادبـادک در هـوای طوفانـی نشـان‌داد الکتریسـیته‌ی مالشـی و صاعقـه عمـلاً یـک چیزنـد. فرانکلیـن نحـوه‌ی کار لایدن‌جـار (از اختراعـات قـرن ۱۸ بـرای جمع‌آوری بـار شـبیه بـه خـازن امـروزی) را توضیـح می‌دهـد و تئـوری فراگیـرش دربـاره‌ی الکترومغناطیـس را تألیـف می‌کنـد کـه از ایـن قـرار اسـت: «الکتریسـته مایعـی اسـت کـه در فضـا پخش‌شـده و هـر اختلالـی در مقـدار طبیعـی آن منجـر بـه رخ‌دادن پدیده‌هـای الکتریکـی می‌شـود. مقـدار کمتـر از حالـت طبیعـی الکتریسـیته منفـی و مقـدار بیشـتر از آن مثبـت نامیـده می‌شـود». بـا تأثیـر از آزمایش‌هـای آن زمـان کـه نشـان مـی‌داد اجسـام بـاردار می‌تواننـد بـدون تمـاس بـر اجسـام دورتـر از خـود تأثیـر بگذارنـد، فرانکلیـن ایـن عقیـده را در عصـر خـود ایجادکـرد کـه اتمسـفری الکتریکـی در اطـراف اجسـام بـاردار وجـود دارد.

قانون تجربی کولمب

در اواخـر قـرن ۱۸، فرانتـس آپینـوس[۳] دانشـمند آلمانـی و هنـری کاونديـش[۴]، محقـق انگلیسـی بـه کارگیـری ریاضیـات در توصیـف هـای پدیدارشـناختی از وقایـع الکتریکـی را آغـاز کردنـد. بـرای مثـال، کاونديـش رابطـه‌ی عکـس نیـروی الکتریکـی بیـن دو جسـم بـاردار و فاصلـه بـا توانـی کمتـر از ۳ را پیش‌بینـی کـرد، در حالـی کـه آپینـوس صرفـاً رابطـه‌ی عکـس را پیش‌بینـی کرده‌بـود. ایـن فرضیـات نهایتـاً در سـال ۱۷۸۴ بـا اختـراع الکترومتـر[۵] توسـط چارلـز کولمـب بـرای اندازه‌گیـری نیـروی جاذبـه و دافعـه‌ی الکترومغناطیسـی دقیـق می‌شـوند کـه منجـر بـه زاده‌شـدن رابطـه‌ی کولمـب شـد.



اولین الکترومتر، اختراع کولمب

آپینـوس، بـا گسـترش تئـوری فرانکلیـن بـرای الکتریسـیته، مشـابه آن را هـم بـرای مغناطیـس (فقـط بـرای آهـن) تعمیـم‌داد. کاونديـش ده سـال بعـد، مسـتقل از آپینـوس بـه تئـوری مشـابهی بـرای الکتریسـیته رسـید. اکثـر کارهـای کاونديـش تـا حـدود یـک قـرن بعـد، زمانـی کـه ماکسـول آن‌هـا را بـرای اولیـن بـار چـاپ کـرد[i]، بـه نـام دانشـمندان دیگـری پـس از او شـناخته می‌شـدند. او ظرفیـت القایـی چنـد مـاده را اندازه‌گیـری کـرد و موفق‌شـد بـا جرقـه‌ی الکتریکـی هیـدروژن و اکسـیژن، آب تولیـد کنـد.

الکتریسیته‌ی گالوانی

در حوالـی سـال ۱۷۸۶، بـا مشـاهده‌ی دسـتیارِ لوییـس گالوانـی[۶] مبتنـی بـر حرکـت پـای قورباغـه بـا اتصـال دو فلـز بـه آن، الکتریسـیته‌ی گالوانـی بـرای اوّلیـن بـار مـورد توجـه قرارگرفـت. گالوانـی بـا تکـرار و گسـترش آزمایشـش تصوّرکـرد کـه ایـن الکتریسـیته ناشـی از الکتریسـیته‌ی ذاتـی حیـوان، «الکتریسـته‌ی حیوانـی» اسـت.

بـر یکتایـی الکتریسـیته‌ی مالشـی و گالوانـی تـا مـدّت هـا شـک وجـود داشـت، تـا اینکـه فـارادی در سـال ۱۸۳۳ نوشـت کـه بـا آزمایش‌هـای اینگـن هاوس،کاونديـش، دیـوی[۷] و بـرادرش[۸] ، مشخّص‌شده‌اسـت کـه ایـن دو منشـأ یکسـانی دارنـد.

ارتباط الکتریسیته و مغناطیس

اوّلیـن آزمایـش جـدّی بـرای نمایـش ارتبـاط الکتریسـته و مغناطیـس پـس از اختـراع پیـل الکتریکـی و در دسـترس‌بودن جریـان الکتریکـی در مـدار ممکن‌شـد. کریسـتین اورسـتد[۹] اثـر جریـان الکتریکـی مـدار بسـته‌ای بـر روی سـوزنی مغناطیسـی را آزمایـش و مشـاهده‌کرد. او نتایـج و تأثیـرات جریـان بـر سـوزن مغناطیسـی را کـه شـامل تغییـر جهـت سـوزن در حـالات مختلـف نسـبت بـه سـیم جریـان بودنـد را در سـال ۱۸۲۰ چـاپ کـرد[ii].

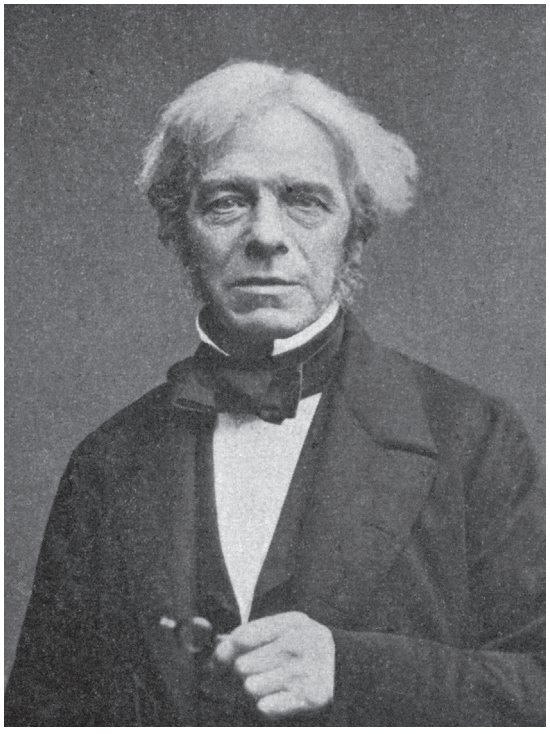
در همـان سـال، ژان بیـو[۱۰] و فلیکـس سـاوارت[۱۱] اثـرات مشـابهی در آزمایشـگاه مشـاهده‌کردند و قانـون حاکـم بـر نیـروی بیـن رسـانای حامـل جریـان و دوقطبـی مغناطیسـی، کـه آن را بـه نـام بیو-سـاوار می‌شناسـیم، کشـف شـد. در سـال ۱۸۲۷، جـورج اهـم رابطـه‌ی بیـن جریـان، مقاومـت الکتریکـی و نیـروی محرکـه‌ی الکتریکـی[۱۲] را تألیـف کـرد[iii] کـه امـروزه بـه شناخته‌شـده‌ترین قانـون الکترومغناطیـس تبدیل‌شده‌اسـت.

بـا انتشـار ایـن نتایـج، آنـدره آمپـر، تئـوری توصیـف کننده‌ای بـرای پیش‌بینـی جهـت چرخـش سـوزن مغناطیسـی ارائـه‌داد. آمپـر نسـخه‌ی متفاوتـی از ایـن آزمایش‌هـا را بـا

۱ William Gilbert
۲ Benjamin Franklin
۳ Franz Aepinus
۴ Henry Cavendish
۵ Torsion balance
۶ Luis Galvani
۷ Humphry Davy
۸ John Davy
۹ Hans Christian Oersted
۱۰ Jean-baptiste Biot
۱۱ Felix Savart
۱۲ Electromotive Force

ساختن مدارهای مستطیل شکل و قرار دادنشان در کنار هم یا در مجاورت یک جسم مغناطیسی (به طوری که بتوانند آزادانه بچرخند) طرّاحی کرد. او نهایتاً در سال ۱۸۲۷، مشاهداتش را به شکل سه اصل در کتابش[iv] به عنوان تئوری الکترودینامیک چاپ کرد. نتایج آمپر نشان می‌داد که آهن‌ربا، همانند یک مدار بسته‌ی جریان رفتار می‌کند. این موضوع منجر به اختراع سیم‌لوله شد.

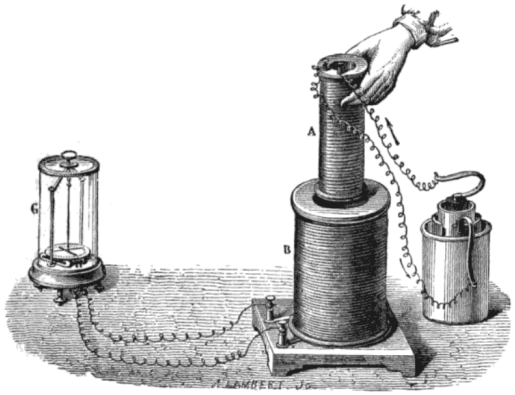
تا زمانی که مایکل فارادی شروع به به‌کارگیری مفاهیم جدیدی کرد، توصیفی از علّت این وقایع وجود نداشت. او از دستیاران علاقمند دیوی بود که در سال ۱۸۲۰، وظیفه‌ی نگارش تاریخچه‌ی آزمایش‌های الکتریکی به او محوّل‌شده‌بود؛ امّا به خاطر بی نظمی و نامشخص‌بودن آزمایشگرها تصمیم‌گرفت همه‌ی آزمایش هارا خودش تکرارکند. در مجموع در نوشته‌های فارادی ۱۶۰۰۰ مدخل که با نظم و دقت شماره گذاری شده‌اند، دیده‌می‌شود.



مایکل فارادی

فارادی در سال ۱۸۳۰ با الهام از خطوط ایجادشده توسّط براده‌های آهن که قبل از این هم بسیار مشاهده‌شده‌بودند، مفهوم خطوط نیرو را به کار برد. با تکرار این آزمایش برای چند آهن‌ربا و رسانا، او نهایتاً به این نتیجه رسید که خطوطی نامرئی اطراف آهن‌ربا وجود دارند که از قطب‌شمالی به قطب‌جنوبی آهن‌ربا کشیده‌می‌شوند. همچنین، تنشی در طول آن‌ها برقرار است و تراکم آن‌ها قدرت آهن‌ربا را مشخص می‌کند. علاوه بر این، او مشاهده‌کرد که شکل خطوط نیروی سیم‌لوله و آهن‌ربا مشابه است، که کشف آمپر را توصیف‌می‌کند.

فارادی بعد از تلاش‌های ۹ ساله‌اش برای رسیدن به هدف «تبدیل مغناطیس به الکتریسیته» که در سال ۱۸۲۲ در دفترچه‌اش ثبت‌کرده‌بود، آزمایش‌های چشمگیری انجام‌داد که در نهایت منجر به کشف قانون القای فارادی شد. او دو تکّه سیم را دور حلقه‌ای آهنی پیچید، به طوری که یکی به باتری متّصل بود و دیگری از بالای تیغه‌ای مغناطیسی عبور می‌کرد. مشاهدات او نشان می‌داد که در هنگام تغییر اندازه‌ی جریان در سیم اول، در سیم دوم جریانی القا می‌شود.



تصویر آزمایش دیگر فارادی که در آن حرکت آهنربا موجب ایجاد جریان الکتریکی میشود.

فارادی با طرّاحی آزمایش‌های مشابه در سال ۱۸۳۱ متوجه شد خطوط نیروی متحرّک شرط لازم برای القای جریان است. همزمان با این اتّفاقات، جوزف هنری[۱۳] به موفّقیت‌های مشابهی دست‌یافت، امّا چون نتایجش را منتشر نکرده‌بود، فقط از فارادی به عنوان کاشف این قانون یاد می‌شود.

تا قبل از ایجاد تغییرات جدّی توسط پیشگامان میانه‌ی قرن ۱۹ میلادی، پیشرفت‌های دیگری رخ‌داد. مثلا در سال ۱۸۳۴، هاینریش لنز[۱۴] و موریتز جاکوبی[۱۵] مستقل از هم کشف‌کردند که تعداد دورهای سیم‌پیچ با جریان القا شده در آن رابطه‌ی مستقیم دارد. لنز در همین سال قانون معروف خود، قانون لنز را تألیف‌کرد.گوستاو کیرشهف[۱۶] در حوالی ۱۸۴۵ به قوانینی درباره‌ی نحوه‌ی پخش جریان در مدار رسید و سرعت انتقال سیگنال الکتریکی در سیمی بدون مقاومت را برابر با سرعت نور اندازه گیری کرد.

۱۳ Joseph Henry
۱۴ Heinrich Friedrich Emil Lenz
۱۵ Moritz von Jacobi
۱۶ Gustav Robert Kirchhoff

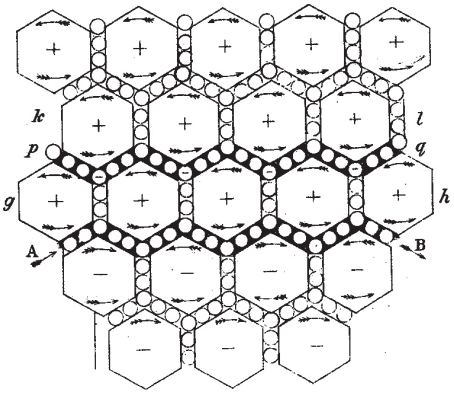
ماکسول و ماکسولی‌ها

جیمز کلارک ماکسول، در زمان دانشجویی به وسیله‌ی کارهای لرد کلوین[۱۷] با الکترومغناطیس آشنا شد. او پس از فارغ‌التحصیلی در سال ۱۸۵۴ تصمیم‌گرفت به مطالعه‌ی الکترومغناطیس ادامه‌دهد.

جوانی ماکسول

در آن زمان، علم الکترومغناطیس به دو نگاه تقسیم می‌شد. در یک نگاه، (نگاه قارّه‌ای) همه چیز بر مبنای برهم‌کنش از راه دور ذرّات بود و بر اساس قوانین نیوتن، قوانین الکترومغناطیس استخراج می‌شدند. ویلهلم وبر[۱۸]، مخترع گالوانومتر و از مخترعان تلگراف (به همراه کارل فردریش گاوس[۱۹])، از پیشتازان این نگاه بود. در نظریه‌ی او که امروزه با نام الکترومغناطیس وبر شناخته می‌شود، وبر با اصلاح کردن قانون کولن و اضافه‌کردن بخش وابسته به سرعت، به قاعده‌ی آمپر می‌رسد. از آن سو، نگاهی نیز توسط دانشمندانی مانند فارادی ارائه‌شده‌بود، (نگاه انگلیسی) که در آن مفهوم میدان و خطوط نیرو نقش اصلی را بازی می‌کردند و الکتریسیته و مغناطیس چیزی فراتر از برهم‌کنش ذرّات از راه دور بود. ماکسول در سال ۱۸۵۶ با مقاله‌ی «در باب خطوط نیروی فارادی[v]» ، کار روی نظریات فارادی را آغازکرد. اگرچه تا آن زمان نظریات بسیاری الکتریسیته و مغناطیس را توصیف می‌کردند، امّا ماکسول در ابتدای این مقاله وضعیت فعلی این علم را برای کندوکاو نامناسب می‌داند و دلیل این موضوع را این‌گونه عنوان می‌کند که بخش‌هایی از این علم کاملاً تجربی توصیف شده‌اند و بخش‌های دیگری توصیفات دقیق ریاضی دارند. او در این مقاله تنها آزمایشات فارادی را مبنای پیدا کردن اصول اوّلیه قرار می‌دهد و از کارهای کلوین و جرج استوکس[۲۰] در معادلات دیفرانسیل جزئی، و جرج گرین[۲۱] در نظریه‌ی پتانسیل (در ادامه‌ی کارهای سیمون پواسون[۲۲]) برای ریاضیات کار خود استفاده می‌کند. ماکسول در ادامه اشاره می‌کند که نظریات مختلفی را در فیزیک می‌توان با ریاضیات یکسان توصیف‌کرد. به عنوان مثال (که طبق نظر ماکسول اوّلین بار توسط کلوین ارائه‌شد)، در نظریه‌ی جذب گرانشی اجسام و مسئله‌ی انتشار گرما در حالت ایستا، با تبدیل کمیت های دما به پتانسیل، جریان گرما به نیرو و منبع گرما به چگالی جرم، توصیف ریاضی دو نظریه کاملاً یکسان است (هردو مسئله با یک معادله‌ی پواسون توصیف می‌شوند.) او با اشاره به این مثال نظریه‌ی معادل خود را برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ارائه می‌کند: شارّه‌ی تراکم ناپذیر مجازی که در لوله‌هایی به مرز خطوط میدان حرکت می‌کند. او با بررسی خواص این سیّال مانند فشار، کمیّت‌های معادل مانند شدّت میدان را به دست‌آورد. البته خود ماکسول هوشمندانه درتمام مقاله تأکید می‌کند که نظریات ارائه‌شده توسط او حتی سایه‌ای از یک نظریه‌ی فیزیکی را شامل نمی‌شوند و تنها تلاش‌هایی برای نزدیک شدن به نظریهٔ نهایی هستند. او حتّی به کارهای وبر اشاره می‌کند و آن را یک نظریه‌ی ظریف ریاضی و یک تئوری فیزیکی واقعی برمی‌شمارد. معادلات ماکسول در نهایت در مقاله‌ی بعدی او[vi]، در سال ۱۸۶۱، کامل می‌شوند. در آن زمان، کلوین نظریه ای برای توصیف مواد (بر اساس کارهای هرمان فون هلمهولتز[۲۳] در مکانیک سیّالات) ارائه داده بود که طبق آن کوچک ترین اعضای تشکیل دهنده‌ی مواد، گرداب‌هایی[۲۴] در اتر بودند. ماکسول از وجود این گرداب‌ها برای توصیف خواص مغناطیسی مواد و القا بهره می‌گیرد. به عنوان مثال، کمیّت میدان مغناطیسی، B، در این مدل معادل تکانه‌ی زاویه ای گرداب‌ها است. این گرداب‌ها در سلول‌هایی قرار گرفته‌اند که در میانشان، بارهای الکتریکی مانند توپ‌های کوچکی حرکت می‌کنند. دلیل وجود این مکانیزم این است که گرداب‌ها بتوانند بدون مشکل در جهت‌های یکسان بچرخند (مانند دو چرخ‌دنده). ماکسول به کمک این سیستم مجدّداً به قوانین فارادی و آمپر رسید. به عنوان مثال، اگر تلاشی برای کم کردن سرعت چرخش یکی از گرداب‌ها شود (کاهش میدان مغناطیسی)، لختی دورانی دیگر گرداب‌ها باعث به‌وجود آمدن جریانی نسبی می‌شود که همان قانون فارادی است.

۱۷ William Thomson
۱۸ Wilhelm Weber
۱۹ Carl Friedrich Gauss
۲۰ George Stokes
۲۱ George Green
۲۲ Siméon Denis Poisson
۲۳ Hermann von Helmholtz
۲۴ Vortex



سلول‌های گردابی ماکسول

ماکسول در ادامه عبارت نهایی نیروی الکترومتیو[۲۵] را به دست می‌آورد (همان نیروی لورنتز امروزی که در آن زمان نقش میدان الکتریکی را در نظریه ماکسول بازی می‌کرد).

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{P} &= \mu\gamma\frac{dy}{dt} - \mu\beta\frac{dz}{dt} + \frac{d\mathrm{F}}{dt} - \frac{d\Psi}{dx}, \\ \mathrm{Q} &= \mu\alpha\frac{dz}{dt} - \mu\gamma\frac{dx}{dt} + \frac{d\mathrm{G}}{dt} - \frac{d\Psi}{dy}, \\ \mathrm{R} &= \mu\beta\frac{dx}{dt} - \mu\alpha\frac{dy}{dt} + \frac{d\mathrm{H}}{dt} - \frac{d\Psi}{dz}. \end{aligned}\right\} \quad .$$

در معادلات بالا (P,Q,R) مؤلفه‌های نیروی الکتروموتیو (α,β,λ) مؤلفه‌های میدان مغناطیسی، (F,G,H) مؤلفه‌های پتانسیل مغناطیسی و Ψ پتانسیل الکتریکی است.

فارادی پیشتر استدلال کرده‌بود که میدان الکتریکی باعث قطبیدگی در دی‌الکتریک‌ها می‌شود. ماکسول این قطبیدگی را با فشردگی سلول‌ها توجیه کرد و به ساختار سلولی خاصیت کشسان داد. حال ماکسول قادر بود الکترواستاتیک را با همین نظریه فرمول بندی کند. امّا این جابه‌جایی در ساختار عواقبی در معادلات به همراه داشت، به طوری که تغییرات نیروی الکترومتیو با تغییرات مقدار جابجایی ارتباط داشت. پس ماکسول بیان کرد که جابه‌جایی در ساختار را می‌توان معادل یک جریان در نظر گرفت. با اضافه کردن جریان جابه‌جایی[۲۶]، ماکسول اصلاح مشهور خود بر قانون آمپر را اعمال کرد و معادلات ماکسول کامل شدند.

showing that when the electromotive force varies, the electric displacement also varies. But a variation of displacement is equivalent to a current, and this current must be taken into account in equations (9) and added to r. The three equations then become

$$\left.\begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi}\left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{\mathrm{E}^2}\frac{d\mathrm{P}}{dt}\right), \\ q &= \frac{1}{4\pi}\left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} - \frac{1}{\mathrm{E}^2}\frac{d\mathrm{Q}}{dt}\right), \\ r &= \frac{1}{4\pi}\left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} - \frac{1}{\mathrm{E}^2}\frac{d\mathrm{R}}{dt}\right), \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (112)$$

where p, q, r are the electric currents in the directions of x, y, and z; α, β, γ are the components of magnetic intensity; and P, Q, R are the electromotive forces. Now if e be the quantity

جریان جابه‌جایی، مقاله‌ی ماکسول

ماکسول در ادامه، سرعت حرکت امواجی عرضی در این محیط کشسان را بر مبنای آزمایشی از وبر و فریدریش کلراوش[۲۷] بررسی کرد و به عددی بسیار نزدیک به سرعت نور رسید. (ماکسول در اینجا تنها خاصیت محیط را بررسی می‌کرد و خبری از امواج الکترومغناطیس نبود.) از آنجا، ماکسول نتیجه گرفت که احتمالاً اتر نوری[۲۸] همان محیطی است که الکتریسیته و مغناطیس در آن شکل می‌گیرند. این نظریه با آزمایش فارادی در تأثیر میدان مغناطیسی در چرخش قطبش نور نیز همخوانی داشت. در واقع تئوری‌های موجی نور پیش از ماکسول نیز وجود داشتند، امّا توصیف نور به عنوان یک موج الکترومغناطیسی در مقاله‌ی «نظریه‌ی دینامیکی میدان الکترومغناطیس[vii]» ماکسول در سال ۱۸۶۵ ظهور پیدا کرد. در این مقاله، ماکسول از توصیف مکانیکی دست کشید و نظریه‌ی نهایی خود را بر مبنای میدان الکترومغناطیسی بنا کرد. دستگاه معادلات نهایی او شامل ۲۰ معادله و ۲۰ متغیر از مؤلفه‌های جریان‌ها، نیروها و پتانسیل‌ها بود. او همچنین وجود امواج الکترومغناطیسی را نشان داد و مجدّداً با کمک همان آزمایش نشان داد که سرعت این موج بسیار به سرعت نور نزدیک است. بنابراین ماکسول نظریه‌ی الکترومغناطیسی نور را پایه‌گذاری کرد. اگرچه ماکسول در این نقطه به یکی از انقلابی ترین کشفیات علم فیزیک رسید، امّا نظریه‌ی او به شهرت دست‌نیافت. فریمن دایسون[۲۹] در نوشته‌ای[viii] عنوان می‌کند که تا حدود ۲۰ سال، به نظریات ماکسول توجهی نمی‌شد. به گفته‌ی دایسون، ماکسول انسان بسیار متواضعی بود و در جهت معرفی نظریه‌اش تلاش چندانی نکرد. به عنوان مثال، او در سخنرانی‌ای که سال ۱۸۷۰ درباره‌ی مرزهای ریاضی و فیزیک انجام داد، بیشتر زمان سخنرانی را به معرّفی نظریه‌ی گردابی کلوین پرداخت. او تنها در انتهای سخنرانی، به صورت مختصر از نظریه‌اش با عنوان «نظریه‌ی دیگری از الکتریسته که من بیشتر می‌پسندم» یاد کرد (به گونه‌ای که حتّی مشخّص نبود این نظریه متعلّق به خود ماکسول است!). همچنین،

۲۵ Electromotive Force
۲۶ Displacement Current

۲۷ Friedrich Kohlrauch
۲۸ Luminiferous Aether
۲۹ Freeman J. Dyson

نوشته‌های ماکسول بسیار پیچیده بودند. مفاهیمی مانند میدان‌های گسترده در فضا، مفاهیم آشنایی برای فیزیکدان‌ها نبودند و ماکسول مجبور بود نظریاتش را در قالب سیستم‌های پیچیده و سیّالات مجازی توصیف کند. دایسون می‌نویسد:

«فیزیکدانان آن را سخت می‌یافتند زیرا معادلات آن پیچیده بودند. ریاضیدانان آن را سخت می‌یافتند زیرا ماکسول از زبانی فیزیکی برای توصیف آن استفاده کرده بود».

با این حال، کسانی مانند هاینریش هرتز، جرج فیتز جرالد[۳۰] و الیور هویساید[۳۱]، نظریه‌ی ماکسول را مطالعه‌کردند و آن را گسترش‌دادند. (آنها به همراه جوزف لامور[۳۲] و الیور لوج[۳۳] به عنوان «ماکسولی ها»[۳۴] شناخته‌می‌شوند). طی سال‌های ۱۸۸۴ و ۱۸۸۵، هویساید، که به همراه جوسایا گیبس[۳۵] از ابداع‌کنندگان حساب برداری است، معادلات ماکسول را بازنویسی‌کرد. در واقع، اگرچه در آن زمان بردارها مفاهیم شناخته‌شده‌ای بودند، امّا اکثر معادلات به صورت مؤلفه ای نوشته می‌شدند و در بعضی مواقع از نمایش کواترنیون‌ها[۳۶] استفاده می‌شد. هویساید معادلات ماکسول را به کمک حساب برداری و اپراتورهای دیفرانسیلی به شکل چهار معادله‌ای که امروز به عنوان معادلات ماکسول می‌شناسیم، نوشت. در معادلات او خبری از پتانسیل‌ها نبود و هویساید حذف کردن آن‌ها را الزامی می‌دانست. هرتز نیز مستقلاً این کار را انجام‌داد؛ امّا او هویساید را در این موضوع مقدم می‌دانست. همچنین، معادلات او همچنان به صورت مؤلفه‌ای بودند.

هویساید همچنین متوجه رابطه‌ی جریان انرژی و ضرب خارجی دو میدان E و H شد و از آن برای بررسی پیشروی موج در سیم‌ها و مسائلی مانند اثر پوستی[۳۷] استفاده‌کرد. او به مقالات علمی دسترسی زیادی نداشت و در اواخر سال ۱۸۸۵ متوجه شد که کمی پیش از او، جان پوینتینگ[۳۸] به بردار جریان انرژی رسیده‌بود. در سال ۱۸۸۷، هرتز در پی مجموعه‌ای از آزمایشات، امواج رادیویی را تولید و دریافت کرد و به کمک آن، نظریه‌ی الکترومغناطیس ماکسول تأیید تجربی شد. با تلاش ماکسولی‌ها، سرانجام نظریه‌ی ماکسول در جامعه‌ی علمی پذیرفته‌شد.

مراجع:

i Cavendish, H. 1921. The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish. Cambridge university press,

ii Orsted, J.1821. Experiments on the effect of the electric conflict on the magnetic needle. Copenhagen.

iii Ohm, G. S. 1827. Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet. Kessinger Publishing, LLC

iv Amper, A. M. 1825, Memoir on the Mathematical Theory of Electrodynamic Phenomena

v Maxwell J. C. 1856, On Faraday's Lines of Force. From the Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Vol. x. Part I.

vi Maxwell J. C. 1861, On Physical Lines of Force. Philosophical Magazine. 90: 11–23.

vii Maxwell J. C. 1865. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155(0), 459–512.

viii Dyson F. J. 2007. Why is Maxwell's Theory so hard to understand?. 2nd European Conference on Antennas and Propagation.

1.Bakewell, F. C. 1853, Electric science; its history. Phenomena. and applications. London: Ingram. Cooke.

2.David Ames Wells. 1859. The science of common things. Ivison. Phinney. Blakeman.

3.Durgin, W. A. 1912. Electricity. its history and development. Chicago: A.C. McClurg.

4.Faraday M. ,Experimental Researches in Electricity vol. 1. Richard and John Edward Taylor.

5.Hunt, B. J. , 2012, Oliver Heaviside: A first-rate oddity. Physics Today. 65(11), 48–54.

6.Maxwell. J C. 1873, A Treatise on Electricity and Magnetism Vol I & II

7.Segre E. 1984. From Falling Bodies to Radio Waves, Freeman, New York.

8.T. K. Sarkar, Robert Mailloux, Arthur A. Oliner, M. Salazar-Palma, Dipak L. Sengupta, 2006, History of Wireless. Wiley-IEEE Press .

9.Nathan Camillo Sidoli.2019. History of Modern Physical Sciences. Waseda University, SILS.

۳۰ George Francis Fitzgerald
۳۱ Oliver Heviside
۳۲ Joseph Larmor
۳۳ Oliver Lodge
۳۴ Maxwellians

۳۵ Josiah Willard Gibbs
۳۶ Quaternions
۳۷ Skin Effect
۳۸ John H. Poynting

نقد و بررسی ارزشیابی مجازی در دانشکده

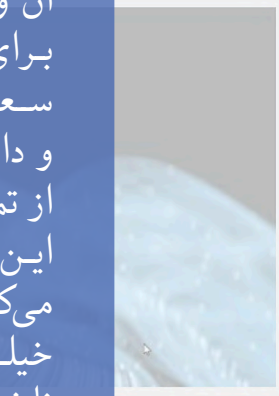
آموزش مجازی

64,896 | Department of Physics | 1,000,000+ users

صالح شاملو احمدی | عرفان رهبری

Overview Privacy practices Reviews Support Related

در این نوشته سعی کردیم تا از مشکلاتمان با ارزشیابی، نارسایی‌های آن و تغییراتی که تحت تاثیر کرونا برای آن رخ داده بگوییم. در نگارش آن سعی کردیم تا حد امکان از شرایط و داده‌های اطرافمان کمک بگیریم و از تمام دانشجویانی که در جمع‌آوری این داده ها به ما کمک کردند تشکر می‌کنیم. از طرفی در طی نوشتن خیلی نگران بودیم که جایی از نوشته ناخواسته به شخص یا گروهی توهین کرده باشیم، برای همین عذرخواهی می‌کنیم. از طرفی همراهان ما نگران این بودند که اساتید از این نوشته بر علیه دانشجویان استفاده کنند و خودمان، هم نگران این قضیه بودیم و هم عکس آن. با تمام این اوصاف نیاز بود که این حرف‌ها و تجربیات ثبت شوند که شاید به گوش مخاطب برسند. در آخر از دکتر سامان مقیمی، ارمیا اعتمادی‌بروجنی و آرتین خانعلی بابت کمک‌های فراوانشان تشکر ویژه می‌کنیم.



slhhero@gamil.com
rahbari.erfan@icloud.com

هدف از ارزشیابی چیست؟

برای پاسخ به این سؤال باید هدف آموزش را بررسی کنیم، چراکه ارزشیابی برای اطمینان از برآورده شدن اهداف آموزشی انجام می‌شود. هدف آموزش، انتقال آموخته‌ها و تجربیات شخص یا اشخاص گذشته به نسل جدید، برای فراموش نشدن، گسترش و همچنین بهره‌وری از آن‌هاست. همچنین به طور خاص، هدف آموزش دانشگاهی، پرورش افراد متخصص است، و یادگیری دروس مختلف وسیله رسیدن به این هدف است.

حال باید این سؤال را بپرسیم که آیا واقعاً هدف ارزشیابی و هدف آموزش همراستا هستند یا نه؟ جهان واقعی به ندرت مطابق ایده‌آل‌های انسانی است و اراده‌ی ما همیشه منطبق با ارزش‌های اعتقادی ما نیست.

هدف مطلوب .vs هدف واقعی

همه دوست داریم ارزشیابی یک درس، معیاری برای میزان یادگیری آن درس توسط دانشجو باشد. اما هدف واقعی آن، توسط ساختارهای جامعه، روی شاخص‌های دیگری تنظیم می‌شود؛ در جهان واقعی، ارزشیابی به ابزاری برای گزینش افراد تبدیل شده است؛ افرادی که حاضرند وقت و انرژی بیشتری برای درس خواندن (شغل) فدا کنند، بیشتر فرمان‌بردار استاد (کارفرما) باشند، کمتر ساختارشکنی کنند و بیشتر به دید دیگران اهمیت بدهند. این‌گونه بهتر می‌توانند برای جامعه (یا در واقع افراد قدرتمند جامعه!) سودمند باشند.

هدف «واقعی» ارزشیابی باعث می‌شود حتی در درس‌هایی که ساده‌تر هستند و بیشتر افراد تا حد قابل قبولی مطالب آن‌ها را یاد می‌گیرند، رقابت ایجاد شود. بله، در این سیستم، ارزشیابی یک رقابت است، رقابتی برای غربال دانشجویان. بیایید روراست باشیم، چه تعداد از دانشجویان درس‌های پایه را یاد نمی‌گیرند و در حد نیاز خود، مهارت استفاده از آن‌ها را کسب نمی‌کنند؟ آیا تعداد دانشجویانی که در این درس‌ها نمره قبولی نمی‌گیرند، یا نمره کمی می‌گیرند، برابر با تعداد افرادی است که به طور جدی در درک مفاهیم درس‌های پایه مشکل دارند؟

این یعنی حتی اگر تمام دانشجویان درسی، آن را به خوبی یاد گرفته باشند، انگیزه‌ای وجود دارد که تعدادی از آن‌ها نمره‌ی ناقص بگیرند و در حالت مطلوب (!) میانگین درس روی مقدار ثابتی بماند. بدین شکل می‌بینید که اهداف آموزشی برای ارزشیابی کاملاً کشته می‌شوند و ارزشیابی به روشی برای سطح بندی دانشجویان تبدیل می‌شود. در چنین سیستمی روش‌های ارزشیابی و نحوه اجرای آن‌ها (سطح سوالات و زمان امتحان، حجم تمرین‌ها و پروژه و...) در راستای جداسازی مؤثر دانشجویان عمل می‌کنند و ارزیابی میزان یادگیری، هدف ثانویه است.

همراستاسازی ارزشیابی و اهداف آموزشی

نمره‌ای که از ارزشیابی بدست می‌آید، نشان دهنده مهارت دانشجو در گرفتن نتیجه مطلوب از روش به کار گرفته شده برای ارزشیابی است. به عنوان مثال، نمره‌ی آزمون درس نشان دهنده توانایی دانشجو در پاسخ دادن به سؤالات آزمون است. بنابراین بسیار مهم است که برای ارزشیابی، روش‌های مناسبی به کار ببریم تا نتایج بدست آمده از آن، مؤید برآورده شدن اهداف آموزشی باشد.

در حال حاضر در اکثر درس‌ها، بیشترین وزن ارزشیابی مربوط به امتحان است و تمرین و پروژه بخش کمتری از نمره را تشکیل می‌دهند. اینکه امتحان چقدر می‌تواند ارزشیابی خوبی برای یادگیری دانشجو باشد، بحث‌برانگیز است. البته توقعی که از دانش‌آموخته یک رشته می‌رود هم متفاوت است. بنابراین تناسب یک شکل خاص امتحان با اهداف آموزشی، در هر رشته فرق می‌کند. ممکن است متخصصان یک رشته محدودیت‌های زمانی مهم داشته باشند (مثل پزشکان یا داروسازان)؛ پس آزمون با زمان محدودتر برای آن‌ها مناسب‌تر است. در شغل‌های مربوط به رشته فیزیک کمتر محدودیت زمانی داریم و دقت مهم‌تر است، پس محدود کردن زمان آزمون، سود کمتری دارد. با این حال شاهد پافشاری بعضی اساتید روی محدودیت زمانی هستیم. حتی گاهی آزمون‌های خانه‌بر به گونه‌ای هستند که اگر روز و شب خود را صرف آن‌ها نکنید با محدودیت شدید زمان روبه‌رو خواهید شد.

کار فیزیک‌دان‌ها در جهان واقعی پژوهش، تألیف مقاله، و گاهی مشاوره حرفه‌ای است (البته که قرار نیست هر کسی با مدرک فیزیک، تبدیل به متخصصی در یک زمینه مرتبط با فیزیک شود، فقط داریم هدف نهایی را برای تربیت افراد در رشته فیزیک بررسی می‌کنیم). پس در حالت ایده‌آل، اگر بخواهیم ارزشیابی در راستای تأیید فرد به عنوان یک متخصص باشد، ارزشیابی در رشته فیزیک باید بیانگر توانایی یک دانشجو در حل مسائل فیزیکی و ارائه نتایج خود به شکل مناسب باشد.

امتحان با زمان محدود می‌تواند تا حدی این توانایی‌ها را بسنجد، اما شیوه ایده‌آلی نیست. در بهترین حالت باید فاصله ارزشیابی و کاربرد درس در جهان واقعی

کمینه شود تا توانایی‌های مرتبط با تخصص سنجیده شود. امتحان خانه‌بر، به همراه پروژه و تمرین، با حذف محدودیت زمان و اطلاعات، به کار پژوهشی نزدیک‌تر است. همچنین عوامل «حفظ کردن» و «درس خواندن شب امتحانی» را حذف می‌کند. مشکل این نوع ارزشیابی این است که طراحی آن به نوعی که دانشجو را به چالش بکشد و مهارت‌های او را بسنجد سخت است، چراکه مسائل مناسب برای ارزشیابی هر درس کم است و نبود محدودیت زمانی و اطلاعاتی باعث می‌شود مسائل معروف کتاب‌های درسی و درسنامه‌ها غیر قابل استفاده باشند. همچنین در این نوع ارزشیابی فاصله بین نمرات دانشجویان کمتر است، چون بسیاری از عوامل کم شدن نمره دانشجویان از بین می‌رود (اشتباه محاسباتی، کمبود وقت، استرس و غیره)، بنابراین طبق توضیحات پیش‌تر، مطلوب نیست!

تقلّب

اینکه تقلب چیست و چرا تقلب خوب است یا بد، سوالات قدیمی و کلیشه‌ای هستند. چیزی که واضح است این است که تقلب فواید زیادی دارد ولی راه‌کار طبیعی و بدیهی‌ای نیست (در ادامه استدلال خواهیم کرد). از آنجا که فواید تقلب زیاد است، برای نتیجه بخشی ارزشیابی باید ضررهای آن نیز زیاد باشد. برقرای این تعادل در دوران قبل کرونا با وجود ناظران، مراقبان و مجازات ممکن و شدنی بود (اگرچه لازم به ذکر است که تقلب قبل از کرونا هم ممکن بوده و رخ می‌داده)؛ اما کرونا امکان نظارت بر آزمون‌ها را به شدت کاهش داد. به علاوه در امتحان حضوری تقریباً از عدم حضور منبع خارجی (اینترنت و...) مطمئن بودیم و تقلب مربوط به عوامل حاضر در جلسه بود اما منابع تقلب در دوران مجازی به هیچ چیز محدود نخواهند بود. در بخش های بعدی راهکارهایی که سیستم‌های آکادمیک مختلف از آن‌ها برای حل این مشکلات استفاده کرده‌اند، بررسی خواهیم کرد.

با تمام فوایدی که تقلب دارد انتظار می‌رود با شیوع کرونا همه به تقلب روی بیاورند ولی چنین نیست. همان‌گونه که گفتیم تقلب راه‌کار بدیهی‌ای نیست؛ چرا؟

۱) باید قبول کنیم که عده‌ی کثیری از یادگیری دروس لذت می‌برند: این گزاره به‌ویژه در مورد رشته‌ی فیزیک بیشتر صدق می‌کند؛ چرا که بیشتر دانشجویان از سر علاقه به فیزیک روی آورده‌اند نه پول و شغل و غیره.

۲) اینکه یک سوأل را با دانش خود پاسخ دهیم بسیار لذت‌بخش‌تر از کپی کردن آن سوأل خواهد بود

با این اوصاف پس چرا تقلب وجود دارد؟

ما نظرسنجی‌ای از دانشجویان کردیم و با این وجود که نمونه‌ی آماری ما محدود و از آدم‌های اطراف خودمان بود انتظارمان این بود که تقریبا همه به سوال تقلب کرده‌اید جواب مثبت بدهند ولی نتیجه معکوس بود (به علت درخواست شرکت کنندگان نظرسنجی آمار و ارقامی از این نظرات گفته نخواهد شد).سوألات این نظرسنجی به شرح زیر بود:

یک: آیا تقلب کرده‌اید؟

دو: با برنامه ریزی قبلی تقلب کرده‌اید یا در حین امتحان با توجه به شرایط به فکر تقلب افتادید؟

سه: چقدر تقلب شما نتیجه‌بخش بوده؟

در نظراتی که به سوال اول پاسخ مثبت دادند چند نکته قابل توجه بود:

“taghalob” is not business, it’s personal:

تقلب نکردن جدا از تمام مزایا و درستی‌اش، راهی برای احترام بین دانشجو و استاد است؛ به این معنا که وقتی استادی در طول ترم نامعقول تمرین داده و وقتی از او درخواست کردیم ضرب الاجل تمرین را عقب بیاندازد، توجهی نکرده یا جواب رد داده، چه دلیلی دارد ما به شیوه‌ی ارزشیابی او احترام بگذاریم و تقلب نکنیم؟ برعکس این قضیه نیز صادق است؛ من (عرفان) با سابقه در تقلب، با استاد x درس xx را داشتم: تعداد تمارین معقول بود. ضرب الاجل تمرین فاصله‌ی مناسبی از انتشار آن داشت و با این حال وقتی از ایشان درخواست تمدید کردیم رویمان را زمین نزدند و خب در حین امتحان من هم احساس وظیفه کردم که تقلب نکنم (نمره‌ی بالایی هم در این درس نگرفتم ولی ناراضی نیستم). به طور کلی رابطه‌ی بین استاد و دانشجو در این باره به شکل درک و احترام متقابل است. برای همین تقلب در دروس معارف به عنوان یک عمل شورشی علیه اجبار گذراندن این دروس است.

حجم درس:

به روزهای فرجه فکر کنید. یک فصل دوره شد. دو فصل دوره شد. سه فصل دوره شد. طبیعی‌ست که هرچه حجم درس بیشتر باشد برای دوره‌ی آن‌ها وقت کمتری خواهید داشت (به‌خصوص با توجه به فشردگی امتحانات) و به تبع آن بیشتر به فکر همکاری و شراکت بیفتید. این مشکل در جلسه‌ای با حضور اساتید قبل از شروع ترم ۱۳۹۹۱ بیان شد و پاسخ‌های متفاوتی داشت از جمله «وقت رفت و آمدی که قبلاً در راه

دانشگاه صرف می‌کردید صرف درس خواندن کنید». استدلال‌ها برای رد و نقض این پاسخ‌ها وجود دارند ولی در این نوشته امکان پرداختن به آن‌ها نیست.

ترس و طمع:

با وجود ترس افتادن و عدم قطعیت‌های موجود در امتحان (قطعی اینترنت، سوتی، سطح سوالات و...)، دانشجویان برای تضمین قبولی/کسب نمره‌ی دلخواه به فکر تقلب می‌افتند.وجود ترس تا حدودی ناشی از شرایط آموزشی است اما بیشتر نتیجه‌ی میزان تلاش دانشجو است. به هر حال نمی‌توان تمام ایرادات را از سیستم دانست و دانشجویان نیز با وجود تمام ایرادات سیستم می‌توانند نتیجه‌ی حداقلی‌ای از آن بدست بیاورند. درست نیست که به‌خاطر این قضیه از اساتید بخواهیم سطح سختی سوالات را کاهش دهند، اما درک دغدغه‌های دانشجویان می‌تواند به اساتید دید بهتری از وضعیت موجود بدهد.

غریزه:

دانشجویان را به طور کلی به سه بخش تقسیم می‌کنیم: دسته‌ی کوچکی که هرگز تقلب نمی‌کنند، عده‌ی کثیری که به طور عادی میلی به تقلب ندارند ولی در صورت نیاز شاید به تقلب روی بیاورند و دسته‌ی کوچکی که بیشتر اوقات مایل به تقلب‌اند. آن دسته همان کسانی هستند که قبل کرونا هم تقلب می‌کردند و حقیقت این است که زیاد بر آمار تاثیر گذار نیستند و عمدتاً تعدادشان در طول زمان ثابت است. این مورد از موارد کم تاثیر در میزان تقلب است.

از دانشگاه‌های دنیا چه خبر؟

همان‌طور که گفتیم عمده‌ی دانشجویان میل به تقلب ندارند برای همین قبل از دوران کرونا اگر سوألات معقول بود و از طرفی تمهیدات حداقلی برای تقلب نکردن در نظر گرفته می‌شد اطمینان داشتیم که عمده‌ی دانشجویان تقلب نکرده‌اند. روش چند دانشگاه[1] خارج از کشور نیز به همین‌گونه بوده: سخت نکردن سوالات و نظارت اندک برای دفع تقلب. اگر بخواهیم بهتر شرح دهیم: دانشجویان با ورود با سامانه امتحان به سوالات دسترسی خواهند داشت، برای نظارت به آن‌ها وبکم‌ها باز و یک افزونه برای نظارت بر صفحه‌ی دسکتاپ آن‌ها فعال خواهد بود. از مهم‌ترین دلایلی که این رویه در دانشگاه ما جواب‌گو نخواهد بود کیفیت نامناسب و عدم پوشش کامل و سراسری اینترنت است. به علاوه‌ی آن اینترنت پایداری لازم را ندارد؛ بارها شده که در حین امتحان عده‌ای با قطعی مواجه شده و حتی گاهی خود سرور دچار فروپاشی شده است.

روش‌های دیگری نیز برای امتحان و جلوگیری از تقلب یافتیم:

«دپارتمان شیمی دانشگاه Ohio State University اول با زمان زیاد و بدون سرپرستی اضافه امتحان گرفتن و تقلب شد. تقلبشون این مدلی بود که تو chegg و اینا کمک می‌گرفتن. سؤالات جدید بودن و یه مدلی بودن که با سرچ در نمیومد، ولی خب این مدل وبسایتا بودن. برای جلوگیری از تقلب بانک سؤال درست کردن با ۵ برابر سؤال (یعنی یک پنجم سؤالا برای هر کسی تو امتحان میومد) و گفتن ما می‌فهمیم تو این وبسایتا می‌ذارین و اگه مچتون رو بگیریم پدرتون رو در میاریم و اینا.... یه watermark که روش تاریخ امتحان بود هم اضافه کردن که تو این وبسایتا معلما بفهمن امتحانه و جواب ندن. تقلب تقریباً از بین رفت و فقط یک نفر سؤالا رو ت اون وبسایتا گذاشت (و عجیبه معلمه با اینکه تاریخ امتحان رو دیده باز جواب داده)»

«دانشکده علوم پزشکی دانشگاه Curtin University تو استرالیا هیچ روش بازدارنده‌ای تو خود امتحان به‌کار نبردن ولی بعد از امتحان از روی برگه‌ها تقلب رو چک کردن و قبل امتحان به دانشجوها گفتن این کار رو می‌کنیم. نتیجه این شد که با کمال تعجب تقریباً هیچ کس تقلب نکرد (حتی زمان امتحان هم برای مشکلات فنی زیاد کردن). یه نکته دیگه‌ای که داشت این بود که اول دانشگاه چند جلسه براشون از معایب تقلب گفتن. اینکه در هر شرایطی غیر اخلاقیه، کسی که بهت می‌رسونه (تو اون سایتا یا خود دانشگاه) می‌تونه بعداً blackmailت کنه، اگه مچتون رو بگیرن اخراجین و دیگه نمی‌تونید برید سمت کارای آکادمیک و...»

در دانشکده فیزیک شریف چه می‌گذرد؟

با پرسش‌هایی که انجام دادیم توانستیم شیوه‌های ارزشیابی را سه قسمت کنیم:

- امتحان سنتی: چهار تا شش نمره تمرین + امتحان میان‌ترم + امتحان پایان‌ترم
- امتحان خانه‌بر: امتحان با سوألات وقت‌گیر تر اما با وقت بیشتر
- امتحان نگرفتن: وزن عمده‌ی نمره به روی تمارین و پروژه

نمونه‌ی موفق و شکست‌خورده برای هرکدام از روش‌های بالا موجود است. پاسخ‌دهی این روش‌ها وابسته به

۱ این‌گونه آزمون‌ها با عنوان online proctored exames یاد می‌شوند و به عنوان مثال می‌توان از دانشگاه‌های آکسفورد و لینه برای استفاد از این روش‌ها یاد کرد.

استاد و خود درس است. عوامل موثری نیز برای آن‌ها وجود دارند:

تخمین زمانی درست:

زیادی تمارین، کمبود زمان امتحان و دیگر مشکلات از این قبیل ناشی از تخمین زمانی اساتید است؛ «یه استاد تو ماه رمضون شش ساعت میان‌ترم با هشت سوال پر و پیمون گرفت بعدشم گفت امتحان تیک هوم بوده دیگه و ما کل شش ساعت داشتیم امتحان می‌دادیم». «یکی دیگه از اساتید هشت سری تمرین، هر سری تمرین ده پونزده تا سوال می‌داد و یک سری وقتش یک هفته بیشتر نبود». «یکی دیگر بیست و چهار ساعت تیک هوم گرفت و ما بیست و چهار ساعت بیدار موندیم» از این مثال‌ها بسیار است و فقط هم مربوط به قشر خاصی از دانشجویان نیست. به همین ترتیب از نیازهای من نوعی به عنوان دانشجو این است که استاد درک مناسبی از وقتی که دانشجو صرف می‌کند داشته باشد. به علاوه محدودیت زمانی در ارزشیابی‌های رشته‌ی فیزیک صرفا حکم پیشگیری از تقلب دارد و نه غیر. اما همانگونه که گفته شد برای جلوگیری از تقلب عمده‌ی دانشجویان سختگیری آنچنانی‌ای لازم نیست، با این حال شاهد عدم تعادل سوال و زمان هستیم و این قضیه باعث استرس و استرس نیز منجر به تقلب خواهد شد.

عقلانی بودن حجم درس:

پیش‌تر توضیح دادیم که زیاد بودن حجم درس، تقلب را تشدید می‌کند؛ به‌خصوص در آزمون‌های زمان محدود. با توجه به این قضیه اگر حجم امتحان زیاد باشد، نه تنها مبین میزان یادگیری نخواهد بود بلکه از صحت نتایج نیز می‌کاهد. برای هر امتحان نهایتاً سه سرفصل برای پوشش و مرور مناسب است. البته که حجم درس در یک امتحان، تنها ملاک نیست بلکه حجم کل درس نیز روی یادگیری آن تاثیرگذار خواهد بود. پیشنهاد ما برای این قضیه ساده است و شاید «از روی تنبلی» به نظر بیاید؛ با کمتر کردن حجم درس می‌توان فهم متوسط دانشجویان را از درس بالا برد. خوبی این کار این است که اعتماد به نفس دانشجو در درس مربوطه افزایش می‌یابد و اگر روزی لازم شود ادامه‌ی مباحث را یاد بگیرد، بتواند به صورت خودآموز این کار را انجام دهد. شاید توانایی خودآموزی در یک درس ایده‌آل به نظر بیاید، اما واقعیت غیر قابل انکار این است که خودآموزی از مهارت‌های لازم برای آینده است و اگر مباحث کمتر باشند فرصت دست و پنجه نرم کردن با آن‌ها و همچنین فراتر رفتن از مباحث کلاس (به سمت مباحث دلخواه دانشجو) ممکن‌تر خواهد بود. مثال آن می‌تواند تفاوت دو درس الکترومغناطیس یک و دو باشد. در درس الکترومغناطیس یک با توجه به سبک‌تر بودن تمرین‌ها «مطالعه جانبی» و «حل مسائل از کتاب‌های دیگر» خیلی ممکن‌تر از درس الکترومغناطیس دو بود. این قضیه نیز مستقیماً در یادگیری موثر خواهد بود زیرا بخشی از یادگیری شامل تجربه‌ی شخصی یادگیرنده از موضوع است؛ مثلاً برای من این سوال پیش آمده بود که اگر دو بار نقطه‌ای یکسان، از یک فاصله‌ی معین از یکدیگر رها شوند، حرکت آن‌ها چگونه خواهد بود؟ یا یکی از دوستان که می‌خواست توزیع بار الکتریکی روی یک سوزن را بیابد. گشتن به دنبال پاسخ این سوالات و کلنجار رفتن با آن‌ها کمک بزرگی به تثبیت یادگیری و فهم عمیق‌تر می‌کند. برای همین عقلانی است که از ایجاد چنین فرصت‌هایی حمایت بشود.

نمرات:

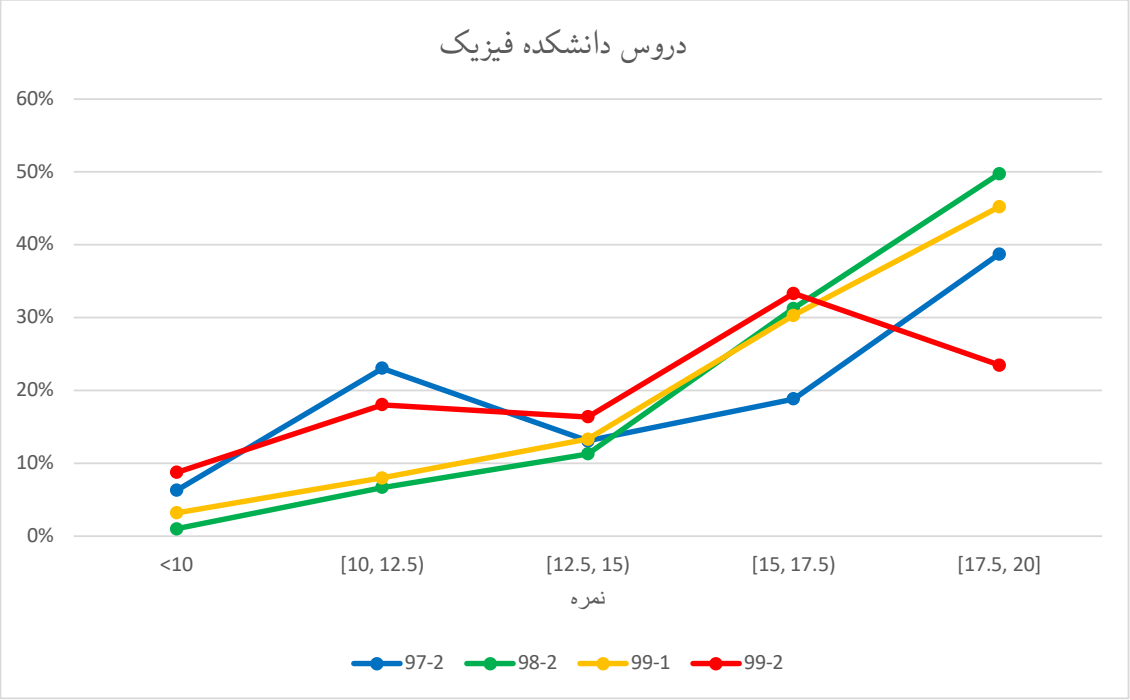
با مقایسه‌ی نمرات در ترم‌های حضوری و مجازی (درس و استاد یکسان)، افزایش نمره‌ی چشمگیری در ارزشیابی مجازی مشاهده می‌کنیم. البته میزان افزایش نیز در هر درس متفاوت است.

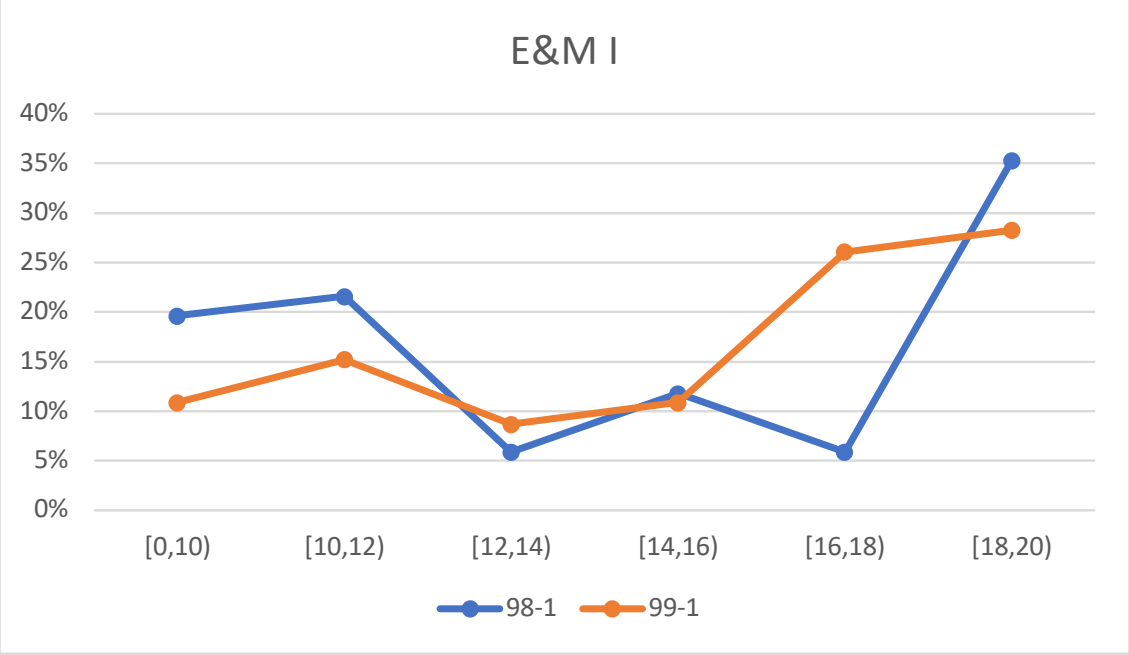
زود قضاوت نکنید! تمام این افزایش نمره به دلیل تقلب نیست. همان‌طور که پیش‌تر اشاره کردیم، بعضی عوامل افت نمره در امتحان حضوری، با حذف محدودیت زمان، مکان و اطلاعات از بین رفت. محل امتحان راحت‌تر و آشناتر شد. لباس‌تان راحت‌تر بود و به همین دلایل استرس امتحان نسبت به حالت عادی تا حدودی کاسته شد. از طرفی دیگر نیاز به رفت و آمد نبود؛ خستگی راه تقریباً از بین رفت و برای همین یادگیری تا حدودی تسهیل شد. اما در باب تقلب؛ الان با یک جست‌وجوی ساده در اینترنت، راه‌حل تعداد زیادی از مسئله‌های امتحانی (یا مشابه آن) پیدا می‌شود. با این وجود نمی‌توانیم منکر این باشیم که حداقل یکی از عوامل رشد نمره، تقلب تعاملی بوده است.

بنابراین بخشی از این تحلیل‌ها نشان‌گر تقلب خواهند بود، اما تغییر نمرات در همین چند ترم مجازی نیز

ترم	تعداد درس و نمره	میانگین	انحراف معیار	نمره کامل	افتاده
۱۳۹۷-۲	۴ درس، ۱۹۱ نمره	۱۵/۲۹	۳/۸۵	۱۶/۷۵٪	۶/۲۸٪
۱۳۹۸-۲	۵ درس، ۱۹۵ نمره	۱۶/۸۴	۲/۶۳	۹/۷۴٪	۱/۰۳٪
۱۳۹۹-۱	۵ درس، ۱۸۸ نمره	۱۶/۲۸	۳/۰۷	۶/۹۱٪	۳/۱۹٪
۱۳۹۹-۲	۴ درس، ۲۱۰ نمره	۱۴/۶۸	۳/۹۳	۴/۳۷٪	۸/۷۴٪

جدول اطلاعات دروس در چهار ترم

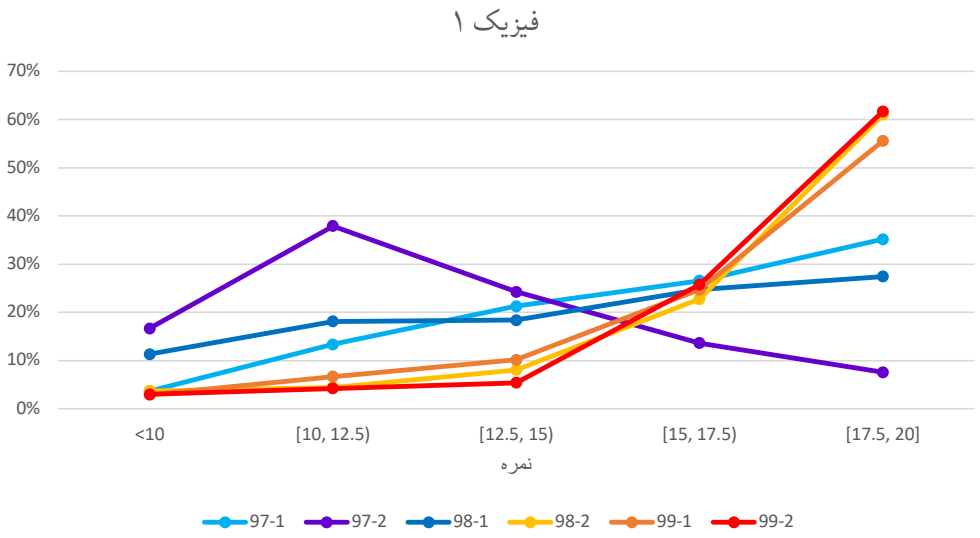


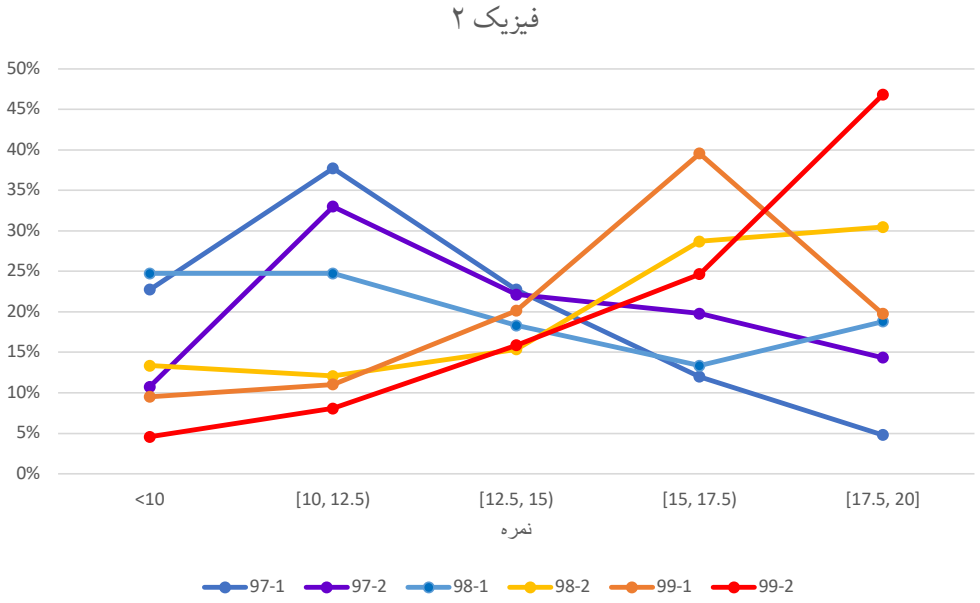


۹۸-۱ میانگین: ۱۴٫۱۶ و انحراف معیار: ۴٫۳۶
۹۹-۱ میانگین: ۱۵٫۳۱ و انحراف معیار: ۳٫۷۲

قابل توجه است. در ترم ۲-۱۳۹۸ که اولین ترم مجازی بود افزایش شدید نمرات مشهود است اما در برخی نمرات افزایش انحراف معیار نیز دیده می‌شود. تعبیر آن می‌تواند به این صورت باشد که اساتید در امتحان و تدریس مجازی بی‌تجربه بودند، عده‌ای از دانشجویان نخواندند، عده‌ای تقلب کردند و عده‌ای فقط درس خواندند. در ترم ۱-۱۳۹۹ میانگین نمرات تثبیت شد و انحراف معیار کاهش یافت. این اتفاق به دلیل آشنایی بیشتر همه با رویه‌ی «دانشگاه مجازی» و درس خواندن نسبی اکثر دانشجویان بود. برای ترم ۲-۱۳۹۹ کاهش زیادی در نمرات مشهود است. در این ترم سختگیری‌ها و حجم دروس، به خصوص تمرین‌ها و پروژه‌ها، افزایش چشمگیری داشته است. همچنین با طولانی شدن دوران قرنطینه و کوتاه شدن استراحت بین دو ترم، فشار روی دانشجویان زیاد شد. این قضیه در ما و اطرافیانمان مشهود بود.

تحلیل ما از تمام نمرات دانشکده نیست، اما نمونه‌ی انتخابی ما، از گروه خاصی از دروس نبوده و نماینده‌ی عمده‌ی دروس ارائه شده است.





دروس فیزیک پایه‌ی ۱ و ۲ افزایش نمره‌ی شدیدتری داشتند. عوامل افزایش نمره‌ی ارزشیابی مجازی، که پیش‌تر به آن‌ها اشاره کردیم، در این دروس پررنگ‌تر هستند. البته که با توجه به نمودار نمرات، واضح است تقلب گسترده در این دروس شایع است.

با وجود اینکه نمرات دروس اختصاصی دانشکده‌ی فیزیک در ترم ۲-۹۹ افت کرده، چنین تفاوتی را برای دروس فیزیک پایه‌ی ۱ و ۲ مشاهده نمی‌کنیم. می‌توان برداشت‌های مختلفی از این موضوع داشت: تقلب در بین دانشجویان دانشکده‌ی فیزیک کمتر است؛ تقلب در دروس اختصاصی کمتر است؛ عامل اصلی بالا رفتن نمره‌ی دروس اختصاصی دانشکده‌ی فیزیک در ترم‌های ۲-۹۸ و ۱-۹۹ تقلب نبوده (عوامل دیگری که نام بردیم، تأثیر بیشتری داشتند) یا اساتید موفق شده‌اند روش‌های ارزشیابی متناسب با پایین‌تر بردن نمره به کار ببرند. شاید تمام یا بخشی از این عوامل یا عواملی دیگر باعث این موضوع شده است. اما به هر حال با اطمینان می‌توانیم بگوییم در ترم ۲-۹۹ در دروس اختصاصی دانشکده‌ی فیزیک، تقلب گسترده صورت نگرفته است! گرچه امیدواریم این ترم، آخرین ترم مجازی باشد اما شاید تحلیل شرایط موجود کمکی به آینده‌ی آموزش بکند.

مراجع:

۱) Mass school closures in the wake of the coronavirus are driving a new wave of student surveillance

۲) Testing in the Time of COVID-19: A Sudden Transition toUnproctored Online Exams

۳) Evaluation of academic integrity of online open book assessments implemented in an undergraduate medical radiation science course during COVID-19 pandemic

مصاحبه:

دکتر نعیمه ناصری

پیرامون فیزیک تجربی

مهیار عباسی | حانیه ملکی

شهریور ۱۴۰۰

دکتر نعیمه ناصری دوره‌ی کارشناسی خود را در رشته‌ی فیزیک دانشگاه صنعتی شریف آغاز و در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب دکتری خود از این دانشگاه شد. وی محقق پسادکتری در IPM و از سال ۱۳۹۲ نیز به‌عنوان عضو هیئت علمی دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه صنعتی شریف مشغول به فعالیت است.

دکتر ناصری در حال حاضر دانشیار دانشکده‌ی فیزیک و مدیر آزمایشگاه‌های تحقیقاتی؛ سلامت و انرژی، انرژی‌های پاک و مدیر مرکز خدمات آزمایشگاهی دانشگاه است. ایشان پیش از این موفق به کسب عنوان پژوهشگر برتر دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه صنعتی شریف شده‌اند.

چه زمانی به‌عنوان یک دانشجو علاقه‌ی خودتان را به فیزیک تجربی کشف کردید؟ انگیزه‌تان از ورود به این حوزه چه بود؟

بسم الله الرحمن الرحیم. من در سال ۷۹ وارد دانشگاه شدم. جنس کنجکاوی در خصوص دنیای اطرافم خصوصاً علاقه‌ای که به طبیعت و سردرآوردن از کار طبیعت داشتم باعث شد که به‌سمت علوم پایه کشیده‌شوم و بنابراین با وجود اینکه در کنکور سراسری می‌توانستم رشته‌های خیلی متنوعی، تقریباً تمام مهندسی‌ها را، انتخاب کنم، ولی به‌دلیل اینکه فکر می‌کردم با مطالعه در این حوزه می‌توانم پاسخ درخوری برای این کنجکاوی‌ها پیدا کنم، وارد رشته‌ی فیزیک شدم. تقریباً از سال سوم کارشناسی بود که متوجه شدم علاقه‌مندم در حوزه‌های ملموس‌تر و کاربردی‌تر فعالیت کنم. من الان از کلماتی مثل ملموس‌تر یا کاربردی‌تر استفاده می‌کنم؛ در آن زمان این کلمات در ذهنم نبود. تصورم این بود که فیزیک تجربی یا فیزیک کاربردی، تنها حوزه‌ای است که می‌تواند این کار را انجام دهد ولی وقتی که جلوتر رفتم و معلوماتم، خصوصاً در فضای بین رشته‌ای بیشتر شد، متوجه شدم که در حوزه‌ی فیزیک نظری هم کارهایی درحال انجام است که زیربنایی است و حتماً دستاوردهای آن هم متوجه زندگی روزمره‌ی ما یا صنایع پیشرفته خواهد بود. به هر حال شخصاً در آن زمان تصمیم گرفتم در فضایی فعالیت کنم که به صنایع و کاربردهای نهایی علم فیزیک نزدیک‌تر باشد. پس درس‌های اختصاصی متناسب با آن را گذراندم و در مقطع ارشد و دکتری در حوزه‌ی فیزیک تجربی مشغول شدم. زمانی که حس کردم تمایلم این است که در حوزه‌ای کار کنم که دستاورد ملموس‌تری داشته باشد، مطالعاتم از زمینه‌ی فیزیک نظری بیشتر به‌سمت فیزیک تجربی کشیده شد. البته هرکس باید مؤلفه‌های شخصیتی خودش را نگاه کند. فرض کنید فردی که خیلی برون‌گراست ممکن است دوست داشته‌باشد مسیری را دنبال کند که در انتها در فضای کاری خود محیط‌های متنوعی را تجربه کند؛ بتواند گاهی برای انجام بخشی از تحقیقاتش وارد یک فضای فنی و یا یک کارخانه شود و یا شرکتی را شکل دهد. زمانی که فرد به این مؤلفه‌ها توجه کند متوجه می‌شود باید وارد چه حوزه‌هایی شود که انتهای مسیرش منتج به چنین تصویری شود. از آنجا تصمیم گرفتم که باید به کدام اساتید بیشتر مراجعه کنم، موضوع پایان‌نامه‌ی ارشدم را در چه حوزه‌ای انتخاب کنم و دکتری را در چه مسیری ادامه دهم و الی اخر.

امکانش هست نام استادی را که در دوره‌ی تحصیلات تکمیلی با او کار کردید، ذکر کنید؟

همان حین که این فضای فکری در من ایجاد شد، مقارن بود با کارگاه بین‌المللی لایه‌های نازک که آقای دکتر مشفق در دانشکده‌ی فیزیک برگزار کردند. به دلیل علاقه‌ای که به این حوزه داشتم و چون با ایشان درس‌هایی را گذرانده‌بودم، برای اینکه در این فضا و اجتماع قرار بگیرم، در برگزاری این رویداد داوطلبانه با ایشان همکاری کردم. بعد از این رویداد به حوزه‌ی تحقیقاتی ایشان علاقه‌مند شدم و پایان‌نامه‌ی ارشدم را با ایشان برداشتم. طبعاً در سمینارهای آقای دکتر تقوی نیا و خانم دکتر ایرجی‌زاد هم شرکت می‌کردم و با اینکه آقای دکتر مشفق استاد راهنمای من در مقاطع ارشد و دکتری بودند، از محضر بقیه‌ی اساتید تجربی‌کار هم استفاده کردم و همه‌ی آن‌ها در این قضیه نقش داشتند.

چه شد که به حوزه‌ی تحقیقاتی خاصی که اکنون به آن مشغول هستید، روی‌آوردید؟

وقتی ما می‌خواهیم حوزه‌ی تحقیقاتی انتخاب کنیم چند فاکتور مؤثر هستند. یکی مهارت‌ها و دانشی که از قبل داریم؛ یکی ارتباطات و شبکه‌ای که برای توسعه‌ی این دانش می‌توانیم داشته‌باشیم؛ دیگری ابزار موردنیازش و بیش از همه اهمیت یک موضوع از نگاه ما. مجموعه‌ی این‌ها باعث می‌شود بتوانیم زمینه‌ی تحقیقاتی خود را انتخاب کنیم و این زمینه تحقیقاتی تا حدی پیشه‌ی ما می‌شود. یعنی وقتی فردی یک گروه تحقیقاتی با یک موضوع تحقیق مشخص تشکیل می‌دهد، پیشه‌ی خود را تشکیل داده‌است و این پیشه اثرانگشت او در مثلاً فیزیک تجربی خواهد بود. من یک پیش‌زمینه و دانشی داشتم و تا حدی مهارت و علاقه هم وجود داشت. همچنین امکاناتی در طول سال‌ها فراهم شده‌بود که به آن‌ها دسترسی داشتم و ارتباطاتی با طیفی از همکارانم که در این حوزه کار می‌کردند برقرار بود.

معنای عنوان سلامت و انرژی در کار شما چیست؟ هدف کلی تحقیقاتی گروه شما در دانشکده چیست؟

دو موضوع هست که در زندگی امروز بشر اولویت همیشگی دارند؛ حوزه‌ی سلامت و انرژی. اگر مشاهده کنید در تمام نقشه‌های راه تحقیقاتی این دو موضوع، موضوعات انرژی تجدیدپذیر و موضوعات مرتبط با محیط زیست و سلامت در اولویت هستند. بنابراین فعالیت در این حوزه‌ی خاص باعث می‌شود شما یک زمین بازی داشته باشید که همواره بتوانید در آن نقش‌آفرینی علمی کنید. توسعه‌ی مواد جدید، عموماً نانومواد، و روش‌های نوین برای ساخت ادوات مورد نیاز در حوزه‌ی سلامت و انرژی‌های تجدیدپذیر زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ما می‌باشند.

کدام یک از آزمایشگاه‌های دانشکده مربوط به حوزه‌ی کار شماست؟ درون آزمایشگاه تخصصی شما چه نوع فعالیت‌هایی، به اختصار، انجام می‌گیرد؟

در دو سال اولی که به عنوان عضو هیئت علمی فعالیت می‌کردم، آزمایشگاه تحقیقاتی انرژی‌های پاک را، با مساعدت همکاران دانشکده و آقای دکتر مهدوی که در آن زمان رییس دانشکده بودند، و همچنین حمایت‌های دانشگاه تأسیس و تجهیز کردم. طبیعتاً وقتی گروه توسعه پیدا کند کارهای تحقیقاتی متنوع‌تری شکل می‌گیرد و بعداً ما نیاز به توسعه‌ی فضای فیزیکی هم داشتیم. این توسعه در سال ۹۵ با مساعدت آقای دکتر راهوار که رئیس وقت دانشکده بودند، اتفاق افتاد و ایشان فضای جدیدی را در اختیار ما قرار دادند که آزمایشگاه سلامت و انرژی را در آن تأسیس کردیم. در حال حاضر ما عمدتاً سنتز و توسعه‌ی نانومواد را در آزمایشگاه «انرژی‌های پاک» انجام می‌دهیم و کاربردهای مرتبط با حوزه‌ی انرژی، حوزه‌ی بیوفیزیک تجربی و حوزه‌ی سلامت را در آزمایشگاه «انرژی و سلامت» دنبال می‌کنیم.

از آزمایشگاه دیگر اساتید هم استفاده می‌کنید؟

معمولاً کارها در یک شبکه[1] انجام می‌شود. در کار تجربی، شبکه یعنی اینکه ما حتماً نیازمندیم که آزمایش‌هایی و یا مراحلی از کار را با همکاری بقیه‌ی افراد انجام دهیم؛ طبعاً به دیگر آزمایشگاه‌ها مراجعه می‌کنیم و این همکاری برقرار می‌شود. هرکس در آزمایشگاه خودش همه‌ی تجهیزات موردنیاز را که ندارد.

تا حالا پیش آمده که به آزمایشگاه‌های فیزیک پایه برای انجام کار مهمی مراجعه کنید؟

آزمایشگاه پایه نه ولی خاطرم هست یک بار به یک فتوسل نیاز داشتیم که به «آز عالی» مراجعه کردیم، ولی عمده‌ی کارهایی که در آزمایشگاه انجام می‌شوند خیلی تخصصی‌تر هستند.

مدیریت و سامان‌دهی گروه شما که شامل محققان زیادی از مقاطع مختلف است، به‌طور کلی چگونه صورت می‌گیرد؟ وظایف به چه نحو تخصیص یافته‌اند؟

زمانی که همه‌ی کارها در یک گروه پژوهشی انجام می‌شود، با توجه به نوآوری، پیچیدگی و وسعت کار، گاهی تمام پروژه در یک گروه تحقیقاتی و گاهی در فصل مشترک گروه‌های تحقیقاتی متنوع انجام می‌شود. هنگامی که کارها تنها در یک گروه تحقیقاتی انجام می‌شود، معمولاً در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی یک سلسله‌مراتب داریم، به این معنی که مسئول آزمایشگاه عضو هیئت علمی است، بعد همکاران و محققین پسادکتری هستند که تجربه‌ی بیشتری دارند، دانشجویان دکتری و ارشد و نهایتاً محققین و دانشجویان کارشناسی که داوطلب و علاقه‌مند هستند. معمولاً وظایف متناسب با جایگاه افراد در این سلسله‌مراتب به آن‌ها داده می‌شود. حالا نوع این وظایف چیست؟ مثلاً ایده‌پردازی؛ برای انجام هر پروژه‌ی تحقیقاتی یک یا چند نفر ایده‌ی موردنظر را مطرح و آن تحقیق را مجسم می‌کنند. مسئله‌ی دیگر فراهم کردن منابع[2] لازم است، مسئله‌ی جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌ها، مسئله‌ی تحلیل و اعتبارسنجی نتایج و در انتها مسئله‌ی جمع‌بندی، نوشتن و انتشار کار است. همه‌ی این موارد دارای سطوح متفاوت هستند، به‌طور مثال ایده‌پردازی در طبقات بالاتر هرم معنی پیدا می‌کند، اگرچه همه‌ی گروه در این فرایند ایده‌پردازی مشارکت می‌کنند. اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها معمولاً توسط دانشجویان به‌عنوان پایان‌نامه انجام می‌شود. فراهم‌کردن منابع، توسعه‌ی تجهیزات و ایجاد دسترسی برای دانشجو بخشی از وظایف استاد است. در عین حال همه در برقراری نظم و انضباط در آزمایشگاه مسئول هستند. بنابراین با توجّه به توانایی افراد این وظایف به آن‌ها داده می‌شود.

قبل از اینکه وارد آزمایشگاه شوید و پروژه را شروع کنید کارها حتماً از قبل مشخص شده‌اند؟

ببینید ماهیت فیزیک تجربی این است که اگر از قبل همه‌چیز معلوم باشد تحقیق معنا پیدا نمی‌کند. ما ایده‌ای را که در ذهن داریم چکش می‌زنیم، یک تحقیق فیزیکی (نظری) روی آن انجام می‌دهیم؛ آن را امکان‌سنجی می‌کنیم که آیا می‌توانیم به این ایده دست ببریم و آن را عملیاتی کنیم یا خیر. احتمال‌سنجی می‌کنیم که چقدر شانس موفقیت برای پاسخ به سوالی که در ذهنمان طرح شده‌است داریم. با این پیش‌زمینه‌ها وارد آزمایشگاه می‌شویم، ولی قطعاً برای انجام یک تحقیق خوب توسط فردی با ذهن آماده و کنجکاو، هیچ پیش‌داوری‌ای نباید صورت گیرد. ما باید ببینیم که اندازه‌گیری‌ها به چه نتیجه‌ای ختم می‌شوند و با ذهن باز و بدون هیچ سوگیری‌ای نتایج را بررسی کنیم، حتی اگر خلاف برنامه‌ریزی قبلی ما باشد. قدم‌به‌قدم باید تصمیم بگیریم که در چه مسیری و به چه شکلی پیش برویم، ولی به هر حال وارد فضای مه‌آلودی می‌شویم.

۱ Network
۲ Resource

یک فیزیک‌دان تجربی ماهر، به‌طور منفرد، قبل از شروع و انجام آزمایش آیا لازم دارد که محاسبه‌ای انجام دهد یا همواره آزمون و خطا کفایت می‌کند؟ البته که در سؤال قبل تا حدی به این جواب دادید.

طبیعتاً ما الان در سال ۲۰۲۱ با توجه به انباشت دانشی که در حوزه‌های مختلف صورت گرفته، مثل سابق بی‌گدار به آب نمی‌زنیم و اساساً هم قرار نیست آزمایش فقط آزمون و خطا باشد. امروز خوشبختانه گروه‌های نظری کمک می کنند، نتایج کارهایشان را برای ما و دیگران منتشر می‌کنند و بن‌بست‌ها و مسیرهای هموارتر را در کار فیزیک تجربی به نحوی نشان می‌دهند. از طرفی انباشت دانشی که قبلاً در حوزه‌ی فیزیک تجربی رخ داده‌است، خیلی کمک‌کننده است. در حال حاضر ما تقریباً می‌دانیم برای رسیدن به هدفی که به‌دنبالش هستیم باید چه گام‌هایی را طی کنیم، اما گاهی این گام‌ها کاملاً مشخص نیستند. باید انعطاف‌پذیری داشته‌باشیم. می‌خواهم یک مثال بزنم، یکی از موضوعاتی که ما در موردش تحقیق می‌کنیم طراحی یک نانوماده مناسب برای حوزه‌ی انرژی هیدروژن خورشیدی است. قبلاً دانشی در حوزه‌ی فیزیک نیمه‌هادی‌ها و شیمی وجود داشت که به ما رهنمود می‌داد باید این ماده را با چه معیاری انتخاب کنیم. ما براساس این معیارها جلو می‌رفتیم و تلاش می‌کردیم آن را بهینه کنیم. ولی الان دانشمندان نظریه‌پرداز با استفاده از ابررایانه‌ها[۳] کاملاً ماده را طراحی می‌کنند و ما تقریباً می‌دانیم باید چه ماده‌ای را در آزمایشگاه سنتز کنیم. ممکن است کمی دست‌به‌گریبان تحقق شرایطی باشیم که ابررایانه پیشنهاد داده‌است ولی به هر حال مسیر از سابق روشن‌تر است.

تاکنون پیش آمده‌است که فقدان یک دستگاه خاص که در دانشکده فراهم نبوده پروژه‌ی آزمایشگاهی شما را مختل کند؟

بله این موضوع پیش می‌آید. یعنی عملاً در طرح موضوع و سؤال یکی از مؤلفه‌هایی که تعیین می‌کند ما چه‌کاری را باید انجام دهیم امکانات است. اما ما در طول زمان یاد گرفته‌ایم اجازه ندهیم این بن‌بست‌ها، بن‌بست‌هایی دائمی شوند. ممکن است در یک مقطع کوتاه زمانی، کار را به تأخیر اندازیم و یا مسیر کار را عوض کنیم؛ اما الان به مدد برقراری شبکه و ارتباطات بین‌المللی‌ای که وجود دارد و یا حتی با همکاری با دیگر گروه‌های تحقیقاتی درون کشور، معمولاً سعی می‌کنیم از این بن‌بست‌ها عبور کنیم.

یعنی روش عبور شما این است که گروهی دیگر، آزمایش را با تجهیزاتی که دارند انجام دهند و شما از گزارش فرایند و نتایج آن‌ها استفاده کنید؟

بله، یا به این صورت و یا سعی می‌کنیم طرز فکر خود را تغییر دهیم. فرض کنید شما برای یک آزمایش به دستگاه A نیازمندید و این دستگاه موجود نیست. سعی می‌کنید آزمایشی طراحی کنید که در آن از دستگاه B که به آن دسترسی دارید کمک بگیرید و به‌طور غیرمستقیم به همان سؤال پاسخ دهید.

عده‌ای شاید بگویند که ما تجهیزات آزمایشگاهی چندان پیشرفته‌ای نداریم و کلاً کارکردن در حوزه‌ی فیزیک تجربی در ایران کارآمد نیست. آیا اصلاً با این نظر موافقید؟ جوابتان به این ادعا چیست؟

این موضوع که ما نسبت به کشورهایی که در مرز دانش کار می‌کنند و دستاوردهای علمی و فناوری قوی‌ای دارند، محدودیت‌های بیشتری داریم و در برخی حوزه‌ها عقب‌تر هستیم یک واقعیت انکارناپذیر است. حتماً شرایط ما متفاوت از کشورهای پیشرفته‌ای است که به‌لحاظ اقتصادی غنی‌ترند و یا دسترسی‌های بیشتری به تجهیزات پیشرفته دارند. اما به‌هیچ‌وجه این نتیجه قابل استخراج نیست که ما نباید وارد این حوزه شویم. امروز مشاهده می‌کنید که در همین چارچوب، با استفاده از روش‌های مختلفی که در سؤال قبل صحبتش را کردیم، ما دستاوردهای خیلی خوبی داشته‌ایم. خیلی از فارغ‌التحصیلان توانسته‌اند در شرکت‌های دانش‌بنیان تجهیزاتی را بسازند که جایگزین دستگاه‌های خارجی شده که دسترسی به آن‌ها برای ما سخت است. این دستاوردها نتیجه‌ی تلاش بلند مدت محققان و افراد پیشینی بوده که در حوزه‌ی تجربی فیزیک ایران فعال بوده‌اند. بنابراین حتی با وجود این محدودیت‌ها می‌توان کار کرد، باید کار کرد و حتماً می‌شود به نتایج خوبی رسید.

فارغ از نتایجی که شما درمجلات بین‌المللی منتشر می‌کنید، دانش تجربی‌ای که هم‌اکنون ما داریم با دانش کشورهایی که در مرز علم کار می‌کنند قابل مقایسه است؟

بله حتماً، دانش چیزی است که امروز در اختیار همه است. وقتی شما کاری انجام می‌دهید و نتیجه‌ی آن را منتشر می‌کنید، در واقع دارید نتیجه‌ی کار خود را با همه‌ی مردم دنیا به اشتراک می‌گذارید؛ بنابراین ما از نتیجه‌ی کار همه‌ی کشورها بهره‌مند می‌شویم. همچنین ما متخصصان خوبی هم داریم که معمولاً خود را به‌روز نگه می‌دارند، با گروه‌های تحقیقاتی درجه‌یک دنیا در ارتباطاند و در نتیجه تغذیه می‌شوند. ما صرفاً

۳ Supercomputer

محدودیت امکانات داریم که نباید اجازه دهیم این محدودیت برای ما بن‌بست به وجود آورد.

از نظر شما چگونه یک دانشجوی کارشناسی می‌تواند علاقه داشتن یا نداشتنش نسبت به فیزیک تجربی را شناسایی کند؟ برداشتن دروس تجربی کافیست؟ حضور در آزمایشگاه‌های پایه و غیره چقدر حائز اهمیت است؟

من فکر می‌کنم برداشتن این دروس خیلی خوب است، خصوصاً دروسی که در آن‌ها دانشجو کمی قدرت مانور دارد، مثلاً در آن پروژه یا سمیناری تعریف می‌شود. این دروس روزنه‌ای هستند برای اینکه فرد مواجهه‌ی بیشتری با مطالب روزآمد مرتبط با آن رشته داشته‌باشد. اما اکیداً به دانشجویان توصیه می‌کنم پا را فراتر از دفتر و کتاب بگذارند و در نهایت به آزمایشگاه بیایند. ما همیشه در آزمایشگاه از دانشجویان سال سوم یا چهارم مقطع کارشناسی که دروس ابتدایی و اصلی را گذرانده‌اند و علاقه‌مند هستند کار آزمایشگاهی را تجربه کنند استقبال می‌کنیم. آمدن به آزمایشگاه خیلی مؤثر است برای اینکه متوجه شوند آیا به آزمایشگاه و یادگیری مهارت‌های اوّلیه آزمایشگاه علاقه‌مند هستند یا خیر. من فکر می‌کنم این مورد خیلی می‌تواند تأثیرگذار و مکمل دروس مربوطه باشد.

برای یک دانشجوی کارشناسی علاقه‌مند به فیزیک تجربی اصولاً حضور در آزمایشگاه و کارآموزی درکنار اساتید یا گروهشان شدنی‌ست؟ منابعی موجود است که بتواند مطالعه کند و بیشتر فیزیک تجربی را یاد بگیرد؟ کار از راه دور در ایام شیوع کرونا چگونه است؟

هم شدنی است و هم من اکیداً آن را توصیه می‌کنم. همانطور که گفتم دانشجو با توجّه به حوزه‌ی تجربی‌ای که به آن علاقه‌مند است، می‌تواند به اساتید مراجعه کند. من همیشه در آزمایشگاه تحقیقاتی خودم در آن هرمی که تصور کردم، کارهایی دارم که یک دانشجوی کارشناسی سال آخر از پسش بربیاید؛ به‌شرطی که بتواند خودش را با نظم و قواعد کار در آزمایشگاه تطبیق دهد. اگر بخواهد وارد شود کافی است با مطالعه‌ی چند مقاله‌ی مقدماتی و مروری، با واژگان و اصول اولیه‌ی این حوزه آشنا شود. همیشه پروژه‌هایی وجود دارد که فرض کنید در آن‌ها مسئول پروژه یک محقق پسادکتری است، در رده‌ی میانی یک دانشجوی تحصیلات تکمیلی فعالیت می‌کند و کارهایی مثل تحلیل داده یا انجام برخی آزمایش‌ها وجود دارد که در حد دانش یک دانشجوی کارشناسی علاقه‌مند است. ما تجربه‌ی چنین اتفاقی داشتیم، اتفاقاً از آن نتایج خوبی گرفتیم و مقالاتی را با مشارکت این دانشجوها در ژورنال‌های خوبی چاپ کردیم.

در شرایط کرونا و کار از راه دور، در کار تجربی نمی‌توانم فعالیتی به‌جز مطالعه و بازبینی نتایج برای دورکاری متصور شوم. مثل اینکه نتایجی استخراج شده‌باشد و بخواهیم روی آن‌ها پردازش آماری یا تحلیلی انجام دهیم که این کار با نرم‌افزارهای خاصی قابل‌انجام است. یعنی در واقع فقط کارهای تحلیل نتایج در خانه امکان‌پذیر است. همچنین می‌شود مقاله خواند؛ مثلاً ما یک کاری برای دانشجوی کارشناسی در نظر می‌گیریم مثل تحلیل آماری نتایجی که در آزمایشگاه به‌دست آورده‌ایم، یا استخراج یک سری داده از تصاویر میکروسکوپی. دانشجو مقالات مرتبط را می‌خواند و بعد ما داده‌ها را در اختیارش قرار می‌دهیم تا کار موردنظر را انجام دهد.

تاکنون نرم‌افزارهای شبیه‌سازی زیادی هم برای شاخه‌های تجربی طراحی شده‌اند، درست است؟

بله، به طور مثال نرم افزار COMSOL خیلی در کار ما کاربرد دارد. این بستگی به مهارت و تسلّط دانشجو دارد که چقدر می تواند در میان قابلیت‌ها و برنامه‌هایی که دارد، به یک سؤال در حوزه‌ی کار آزمایشگاهی جواب دهد.

در سطح تحصیلات تکمیلی روند رشد و ارتقای دانشجو در یک گرایش تجربی فیزیک به‌طور کلی چگونه است؟

مثلاً وقتی یک دانشجوی کارشناسی ارشد وارد گروه ما می‌شود، باید به ساخت نانومواد، مشخصه‌یابی آن‌ها و تمرکز روی کاربرد به‌خصوص آن مشغول شود. پس باید با حوزه‌ی سنتز آشنایی کلی داشته‌باشد. درس‌هایی که قبلاً گذرانده قطعاً برایش مهم خواهند بود، درس‌هایی مثل نانوفیزیک، لایه‌های نازک، فیزیک سطح و فیزیک حالت جامد در گروه ما خیلی مورد توّجه واقع می‌شوند. قطعاً گذراندن این درس‌ها به او کمک خواهد کرد ولی اگر به هر دلیلی در مقطع کارشناسی این درس‌ها را نگذرانده و بنا به حالت مرسوم در سال اول ارشد پس از انتخاب گرایش این نقص‌ها را جبران نکرده‌باشد، می‌تواند خودش مثلاً در درس مطالعه‌ی انفرادی این نقصان را جبران کند. این درس‌ها صرف‌نظر از محتوایی که درون خود دارند، به ما یک بینش و نگاه مناسب برای زمانی که می‌خواهیم با یک مقاله روبه‌رو شویم می‌دهند. بنابراین من توصیه می‌کنم دانشجویان از این درس‌ها تصویری از فضای کاری گرفته‌باشند و بعد وارد مقالات شوند؛ چون مقالات معمولاً مستقیم به اصل

موضوع می‌پردازند و ممکن است بینش عمیقی ایجاد نکنند.

یک نکته‌ی خیلی مهم این است که دانشجویان تحصیلات تکمیلی، صرف‌نظر از حوزه‌ای که در آن فعالیت دارند، باید توانایی جست‌وجو را در خود توسعه دهند. عمدتاً دانشجویانی که وارد آزمایشگاه می‌شوند به جست‌وجو در پایگاه‌های داده‌های علمی نظیر Scopus یا Web of Science آشنایی ندارند و ما ابتدای کار باید به دانشجویان این موارد را آموزش دهیم. دانشجو باید بتواند بعد از جست‌وجو وقتی چندین مقاله را در برابر خود می‌بیند، آن‌ها را فیلتر کند. بعد از پیداکردن مقاله‌ی مناسب باید بداند چطور مقاله را بخواند و جواب سؤال را از آن استخراج کند.

Scopus چیست؟

Scopus یک پایگاه داده‌ای است که مستندات علمی، غالباً مقالات، را نمایه می‌کند و امکان جست‌وجوی دقیق و بهتر برای مقالات و ژورنال‌های علمی را فراهم می‌آورد. فرض کنید به ما به‌عنوان یک دانشجو این مسئولیت داده شده‌است که تحقیق کنیم آیا اکسید تیتانیوم کاربرد الکتروکرومیک دارد یا خیر؟ و یا بهترین بازده الکتروکرومیک اکسید تنگستن چقدر است؟ قطعاً جواب این سؤالات در گوگل یافت نمی‌شوند. دانشجو باید بداند با چه کلمات کلیدی‌ای در این پایگاه‌های علمی جست‌وجو کند و مقالات را با چه معیارهایی طبقه‌بندی کند. مثلاً اگر سؤال در مورد بیشترین بازده‌ای باشد، باید به‌سراغ مقاله‌ای برود که جدیدترین دستاوردها را لیست کرده‌است. بعد از یافتن مقاله مشاهده می‌کند که مثلاً یک مقاله‌ی چند ده صفحه‌ای پیدا شده‌است، اگر قرار باشد همه چیز را از اول تا آخر بخواند وقت زیادی از او می‌گیرد، باید بتواند مقاله را به طور مناسبی فیلتر کند. این توانایی‌ای است که هر محقق، چه نظری و چه تجربی، باید آن را در خود توسعه دهد.

در فیزیک تجربی، مثلاً فیزیک حالت جامد، وقتی دانشجوی تازه‌کار وارد آزمایشگاه می‌شود اول با کلیات قضیه آشنا می‌شود و بعد جزئیات؟ مثلاً با همه‌ی دستگاه‌های مرتبط با حوزه‌ی حالت جامد تجربی آشنا می‌شود سپس مهارت اختصاصی خودش را که منتهی به گروهی خاص می‌شود، دنبال می‌کند؟ به‌عبارت دیگر در فیزیک تجربی آشنایی با کار و تجهیزات مربوطه از کل به جزء است یا از جزء به کل؟!

از کل به جزء ولی این کل، چیزی جز درس‌ها و آزمایشگاه‌های تخصّصی‌ای که گذرانده نیست. بعد خودش می‌تواند جزءبه‌جزء وارد شود و با آزمایشگاه‌های تحقیقاتی متنوع و فضای کار آن‌ها آشنا شود. مثلاً کسی که به آزمایشگاه ما مراجعه می‌کند با مسائل مربوط به نانومواد و انرژی و سلامت آشنا می‌شود. طبیعتاً در آزمایشگاه ما نمی‌تواند با انبرک نوری آشنایی پیدا کند. وقتی که دانشجو وارد آزمایشگاه می‌شود نیاز به یک دانش اولیه‌ی کلی دارد پس باید از کل به جزء باشد.

آیا لازم است گاهی در تحلیل یا انجام آزمایش با فیزیک‌دان‌های نظری نیز مشورت کنید؟

بله حتماً پیش می‌آید. اصولاً ما علاقه‌مندیم هنگام تحلیل نتایج تجربی‌ای که به‌دست آورده‌ایم، تا جایی که امکان دارد در دانش قضیه عمیق شویم. وقتی شما پدیده‌ای را مشاهده می‌کنید از خود می‌پرسید دلیل این اتفاق چه بود. پاسخ به این سؤال در سطوح مختلف امکان‌پذیر است. یک سطح، مرتبط است با مشاهدات تجربی دیگری که قبلاً صورت گرفته‌است. سطح دیگر که می‌تواند عمیق‌تر باشد مرتبط است با اصول فیزیکی پشت این قضیه و یا پیش‌بینی‌هایی که نظریه‌پردازان انجام می‌دهند. بگذارید یک مثال بزنم؛ ما در حال بررسی برهم‌کنش باکتری به‌خصوصی با گرافن اکساید بودیم که مشاهده کردیم این ماده با برخی باکتری‌ها برهم‌کنش می‌داد و با برخی خیر. یافتن دلیل این تفاوت دیگر از چهارچوب کار آزمایشگاهی خارج بود. ما از دوستان نظری‌کار درخواست همکاری کردیم و این همکاری با گروه آقای دکتر اجتهادی صورت گرفت. محاسبات به این سؤال جواب داد که این اتفاق مربوط به تفاوتی در غشای این باکتری‌ها است. نکته‌ای که وجود دارد این است که گاهی این سؤالات آن‌قدر پیچیدگی دارند که امکان طرح سؤالی که بر روی میز یک نظری‌کار قرار دهیم، به‌راحتی وجود ندارد.

پس فیزیک تجربی‌ای که شما کار می‌کنید فقط برای طراحی دستگاهی خاص و کاربردی نیست، گاهی برای خود فیزیک هم آزمایش انجام می‌دهید و مثلاً یک مدل نظری را تست می‌کنید؟

بله قطعاً این کار هم انجام می‌شود، ولی برای طراحی همان دستگاه و ادوات هم شما هرچقدر دانش پشتش را بهتر درک کنید بهتر می‌توانید آن را بهینه‌سازی کنید. مثلاً وقتی من جواب سوال برهم‌کنش باکتری را گرفتم، می‌توانم برای باکتری‌ای که برهم‌کنش انجام نمی‌دهد گروه عاملی‌ای به‌کار ببرم که این برهم‌کنش رخ دهد، چون دقیقاً می‌دانم عدم برهم‌کنش از کجا می‌آید. هرچقدر عمیق‌تر بدانیم، هم از دانش لذت می‌بریم و

هم در طراحی موفق‌تر خواهیم بود.

از نظر شما یک طرح درس ایده‌آل برای آموزش یک درس نوعی تجربی که در مقطع کارشناسی (یا مقطع مشترک) ارائه می‌شود، چیست؟

من نمی‌توانم خیلی وارد جزئیات این سؤال شوم چون مورد با مورد فرق می‌کند. گاهی طرح درس کاملاً تابع این است که چه ترکیبی از چه دانشجوهایی با چه پیش‌زمینه‌ای در کلاس ببینیم. بنابراین عوامل تعیین‌کننده وجود دارد ولی درکل اصل بر این است که درس حتماً باید از پایه شروع شود؛ مباحث نظری خیلی خوب توضیح داده‌شوند ولی در انتها حتماً به مباحث کاربردی اشاره شود و بیان شود این مباحث نظری که تدریس شده، ضرب و تقسیمی که انجام شده، چطور به نیاز نهایی ما در فنّاوری گره می‌خورد. حتماً باید به این مسئله توجه شود و شخصاً این کار را انجام می‌دهم. مثلاً در درس نیمه‌هادی‌ها همواره یک‌سوم آخر زمان را به این می‌پردازم که آنچه ما تدریس کردیم چطور در حوزه‌های مطرح علم و فناوری استفاده می‌شود.

نتایج تولیدی فیزیک کاربردی، نهایتاً چگونه به بازار و اقتصاد مرتبط با آن گره می‌خورد؟

برای چنین فعالیت‌هایی باید تیم مناسبی تشکیل داد، یعنی اگر ما به مرحله‌ی تولید رسیدیم باید به خاطر داشته‌باشیم که ما بخش علمی پروژه هستیم، قرار است به توسعه‌ی آن محصول و دانش پشت آن و فیزیک قضیه مشغول باشیم. اگر شرکتی بخواهد حول‌وحوش محصولاتی که از دانشکده‌ی فیزیک خارج می‌شوند شکل بگیرد، قطعاً درون شرکت افرادی هستند که در گروه کار تجاری‌سازی و اقتصادی می‌کنند. چون مدیریت این موارد خودش یک دانشی است که کاملاً توسعه یافته‌است و برای آن آموزش‌های لازم وجود دارد. دلیل ندارد یک فیزیک‌دان از آن هم سر دربیاورد و اگر قرار باشد خودش این کار را انجام دهد، ممکن است بهترین نتیجه‌ی ممکن رخ ندهد. بنابراین این مسائل حتماً باید در تیم باشند.

به‌طور مثال فرض کنید یک فوتوکاتالیست در ابعاد یک سانتی‌متر مربع ساخته‌اید، این یک نمونه‌ی اولیه است و می‌دانید اگر این فوتوکاتالیست را به این شکل طراحی کنید، به صورت بهینه فلان ماده‌ی آلاینده را تجزیه خواهد کرد. ولی این وقتی در صنعت استفاده شود، مثلاً در کارخانه‌ای پوششی برای تمام لوله‌های فاضلاب شود، دیگر در این ابعاد تولید نخواهد شد. قرار است در ابعاد خیلی بزرگتری تولید شود. از گذار نمونه‌ی آزمایشگاهی به نمونه‌ی تجاری و فرآیند تولید انبوه و بالابردن اندازه‌ی قطعه، معمولاً اتفاقات پیش‌بینی نشده‌ای رخ می‌دهد، این پیچیدگی‌ها، پیچیدگی‌های مربوط به Scale up کردن است که گاهی چند مهندس و آدم فنی فقط برای رفع مشکلات مربوط به آن در تیم تلاش می‌کنند.

و آن مدیران اقتصادی فیزیک نمی‌دانند دیگر؟

لزومی ندارد. وقتی شرکتی محصولی را از آزمایشگاه تجربی خارج کرده و وارد خط تولید می‌کند، حتماً کسی در آن شرکت حضور دارد که در آزمایشگاه روی بهترین نمونه‌ی اولیه کار می‌کند؛ کسی هست که در خط تولید، در بردن محصول به مقیاس تجاری و تولید انبوه تسلط دارد. حتماً کسی هست که در بازار چانه می‌زند برای اینکه محصول فروش برود و مدل اقتصادی را توسعه می‌دهد. قرار نیست هیچ‌کدام از این افراد نقش دیگری را بازی کند.

یک مثال از دستگاهی که به مرحله‌ی تولید نمونه‌ی اولیه در گروه شما رسید، همراه با کاربردش، ممکن است ذکر کنید؟

یک الکترود بود برای تجزیه‌ی آب که به سفارش وزارت صنعت ساختیم. کاربرد آن تجزیه‌ی الکتروکاتالیستی آب برای تولید هیدروژن است.

(با لبخند)کمی از حسّتان برایمان بگویید، بعد از اینکه آزمایش‌ها موفقیت‌آمیز تمام می‌شوند یا داده‌های ارزشمند استخراج می‌شوند؟ این‌گونه است که پس از اتمام کار مثلاً نفس راحتی می‌کشید و می‌گویید «این تمام شد فعلاً، تا بعدی»؟

چه حسی باید داشته باشم؟ (با خنده) خستگیم در می‌رود. ما یک مثل در آزمایشگاه داریم که می‌گوید اگر آزمایشی دفعه‌ی اول جواب داد باید به نتیجه‌ی آن شک کرد. ما یاد گرفته‌ایم در ابتدای کار با بسیاری چالش و بن‌بست مواجه شویم و بعد به نتیجه‌ی دلخواه برسیم. طبیعتاً در این مسیر حرف‌هایی زده می‌شود، تلاش‌هایی می‌شود، آزمون و خطاهایی صورت می‌گیرد، البته مبتنی بر دانشی که سعی می‌کنیم جمع‌آوری کنیم. وقتی به نتیجه می‌رسد هم طبیعتاً خوشحال می‌شویم و هم صحه‌گذاری می‌شود بر مسیری که رفته‌ایم تا به اینجا رسیدیم. می‌خواهم به این نکته اشاره کنم که هر موفقیتی در واقع این صحه‌گذاری است. صحه‌گذاری بر اینکه درست حدس زدی، درست جست و جو کردی و درست در منابع گشتی، درست مقالات را به هم ارتباط

دادی که به این نتیجه رسیده‌ای. بنابراین می‌توانی از این رویکرد در چالش‌های بعدی استفاده کنی. و بله، تقریباً هر پروژه‌ای که به سرانجام می‌رسد یکی از همین «فعلاً تمام شده‌ها» است (با خنده).

در خانه هم دور از آزمایشگاه و دانشگاه کاری مرتبط با فیزیک تجربی انجام می‌دهید؟

ذهن ما مهم است، سقف بالای سرمان مهم نیست. چه بسیار روزهایی که قبل از اینکه دست به کار دیگری بزنیم به مطالعه‌کردن، به جست‌وجوکردن، به تحلیل نتایجمان احتیاج داریم. و یا کاری تمام شده و باید چاپش کنیم. این کارها نیازی به دانشگاه ندارند.

یعنی جدا از مطالعه‌ی نظری، در خانه هماهنگی‌هایی و یا فکرهایی برای آزمایش انجام می شود ؟

حتماً. فرض کنید ما می‌بینیم یکی از آزمایش‌ها به بن‌بست خورده، باید جزئیات را مورد بازبینی قرار دهیم و آزمایش جدیدی طراحی کنیم. لازم نیست این کار در دانشگاه انجام شود.

فکر می‌کنید به‌طور میانگین طی مثلاً ۱۰ سال گذشته تاکنون که مشغول به فعالیت علمی، در کلیت آن، بوده‌اید، چند درصد از زندگیتان وقف فیزیک، دانشگاه، کار و علم شده است؟ و به تبع آن چند درصد زندگیتان غیرعلمی است؟

به‌عنوان یک دانشگاهی کار ما همیشه در اولویت است. مشاوره با دانشجو برای انتخاب واحد، تدریس، تحقیقی که انجام می‌دهیم و یا مسئولیت‌های اجرایی‌ای که در دانشگاه داریم، همه‌ی این ابعاد وجود دارند. من اگر بخواهم زندگی شخصی و زندگی دانشگاهی را تفکیک کنم باید اینطور بگویم؛ زندگی دانشگاهی یعنی همه‌ی مسئولیت‌ها نسبت به دانشجو، جلسه با کانون فیزیک و غیره. همه‌ی این‌ها وارد سبد دانشگاه می‌شوند. در این چند سال که من به‌عنوان عضو هیئت علمی فعالیت کرده‌ام، طبیعتاً مسئولیتم خیلی بیشتر از دوران دانشجویی بوده‌است. می‌توانم بگویم در هفته یک روز را به زندگی غیردانشگاهی اختصاص می‌دهم. البته که این یک روز جمع قسمت‌های پراکنده‌ی در طول هفته است. یک تا یک و نیم روز زندگی شخصی در هفته را می‌توانیم تبدیل به درصد کنیم. ولی هیچ مرزی وجود ندارد. ممکن است نیمه‌شب، روز تعطیل یا صبح زود کار کنیم؛ خصوصاً اگر کار بین‌المللی داشته‌باشیم. پیش آمده که من نصف شب هم جلسه داشته‌باشم. در مورد تقسیم‌بندی زندگی دانشگاهی نمی‌توان دقیق گفت و بالا و پایین دارد. مثلاً وقتی شما مسئولیت اجرایی ندارید زمان بیشتری برای کار بر روی تحقیق خود دارید. می‌توانم بگویم تقریباً ۳۰٪ به کار اجرایی، ۳۰٪ به آموزش، ۳۰٪ به پژوهش و ۱۰٪ به فعالیت‌هایی مثل این جلسه‌ی مصاحبه اختصاص دارد.

استاد فیزیک بودن درکل، کار وقت‌گیریست؟

بله، استاد فیزیک و درکل استاد دانشگاه بودن یک کار ۲۴ ساعته است.

سوال آخر: توصیه‌ای برای دانشجویان جوان کشورمان، به‌خصوص برای دخترخانم‌ها، دارید؟

فکر می‌کنم با توجه به تجربه‌ای که دارم، اینکه هم کار کرده‌ام و هم در مقاطع مختلف تحصیل کرده‌ام، می‌توانم بگویم سخت‌کوشی و پشتکار خیلی مهم است. در جلساتی که با دانشجویان صحبت می‌کنیم همیشه می‌گویم که هیچ چیز را نباید به بخت و اقبال و شانس و چیزهای خارج از چهارچوب دسترسمان گره بزنیم. شاید در کوتاه مدت فرافکنی‌ها آدم را تسلی دهند ولی هرکس در سنین بالاتر از زندگی خود، متوجه می‌شود که این رویکرد، رویکرد صحیحی نیست. بنابراین می‌توانم بگویم صرف‌نظر از تمام شرایط و رنگارنگی‌های اوضاع، سخت‌کوشی و پشتکار بسیار مهم است. تسلیم نشدن تا رسیدن به هدف چه برای آقایان چه برای خانم‌ها بسیار مهم است. ولی در عین حال به حفظ تعادل تشویق می‌کنم. ما باید شادی و نشاط داشته‌باشیم و احساس رضایتمندی کنیم؛ چه وقتی که به معدل این ترم یا ترم بعد در قامت یک دانشجوی تازه وارد کارشناسی فکر می‌کنیم، چه وقتی که به نتیجه‌ی تحقیقمان در مقاطع تحصیلی بالاتر. این رضایتمندی و شادمانی خیلی مهم است و حفظ آن در سنین بالاتر مثل پنجاه یا شصت سالگی، از مسیر حفظ تعادل در زندگی می‌گذرد. باید نگاه کنیم که یک تعادلی بین کارمان، تعمق در عوالم درونمان، روابط اجتماعی‌ای که داریم، سرمایه‌های اجتماعیمان، تبدیل‌شدن به الگو و الگوسازی برای نسل‌های بعد وجود داشته‌باشد. باید تمام این موارد را مدنظر داشته‌باشیم و سعی کنیم یک رضایتمندی کلی‌تر و فراتر از موفقیت‌های مقطعی، برای سنین بالاتر رقم بزنیم. این اتفاق نیاز به کمی تدبیر، آینده‌اندیشی و بلندکردن سر از موقعیت فعلی دارد.

برای دخترخانم‌ها توصیه‌ی ویژه‌ای ندارم؛ فقط اگر به هردلیلی در کشور یا در شرایط دیگر، حس کردند که شاید برای رسیدن به موقعیت مشابه باید بیشتر از آقایان تلاش کنند، ناامید نشوند. قطعا می‌توانند الگوسازی کنند و خیلی موفق شوند.

“Facts are of not much use, considered as facts. They bewilder by their number and their apparent incoherency. Let them be digested into theory, however, and brought into mutual harmony, and it is another matter.”

— Oliver Heaviside