دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی برق

درس اصول مهندسی برق و آزمایشگاه (۲۵۷۱۱)

آشنایی با مهندسی برق و مفاهیم پایه آن

ویرایش شهریور ماه ۱۳۹۴

۱-تاریخچه مهندسی برق

به عنوان یک مهندس برق بد نیست که بدانیم یک مهندس کیست؟ یک مهندس خوب کدامست؟ مهندسی برق یعنی چه؟ چه کسانی در پیشرفت این شاخه از توانایی های بشر نقش داشته و سیر تکاملی آن چگونه بوده است؟

دانایی ها و توانایی های بشری را می توان به سه گروه تقسیم کرد: علوم، فنون و هنر. علوم نیز یا نظری هستند، مانند: ریاضی، فلسفه، منطق، اخلاق، ... یا تجربی هستند، مانند: فیزیک، شیمی، زیست شناسی، ... علوم بیشتر با تفکر و تعقل سر و کار دارند. فنون بیشتر جنبه یدی و ممارست دارند مانند: کوزه گری، خیاطی، شنا، ... و بالاخره هنر بیشتر با احساس و خلاقیت سر و کار دارد، مانند، تیاتر، نقاشی، مجسمه سازی، .... البته یک خط مشخص بین این سه گروه نمی توان کشید و یک تقسیم بندی ساده مانند فوق در خیلی از موارد امکان پذیر نیست. برای مثال ریاضی ممکنست محض و انتزاعی باشد، و ممکنست کاربردی و تجربی باشد؛ ولی در هر صورت علم است. همچنین فیزیک در قدیم بیشتر تجربی بوده است و فیزیک مدرن بیشتر نظری است. پزشکی عمومی به مقدار کمی علم نظری، مقدار زیاد به علم تجربی و مقداری کمتر به فن و بالاخره قدری هنر نیاز دارد در صورتی که جراحی مولفه های فن و هنرش بیشتر است. معماری بیشتر فن و هنر و کمتر علم است. و بالاخره مهندسی ملقمه ای از علم، فن و هنر است.

مهندسی[۱] عبارت است از: استفاده از اصول علمی و ریاضی در به نتیجه رسانیدن طراحی، ساخت و کار برد موثر و اقتصادی سازه ها، ماشین آلات، فرایندها و سیستمها **[2]**.

مهندس[۲] کسی است که شغلش مهندسی باشد. بنابراین یک مهندس فردی است که با استفاده از علوم تجربی (عمدتاً فیزیک) و دانش ریاضی دستگاه هایی را طرح می کند و می سازد.

مهندسی برق[۳] آن شاخه از مهندسی است که بیشتر بر روی آن قسمت از فیزیک تکیه می کند که به الکتریسیته و مغناطیس مربوط می شود.

مهندس خوب کیست؟ اگر بخواهیم بکمک تعاریف فوق یک مهندس خوب را توصیف کنیم می تواند تعاریف گوناگونی حاصل شود: یک مهندس خوب یعنی یک ریاضی دان خوب و یک تکنسین خوب. این تعریف منسوب به دانشمند شهیر مخابرات، شانن[۴] است. اگر تعریف فوق را بخواهیم برای بیش از یک مهندس مخابرات سیستم تعمیم دهیم، به این تعریف می رسیم: یک مهندس خوب باید یک فیزیک دان، یک ریاضی دان و یک تکنسین خوب باشد. فیزیکدانان افرادی هستند که با مطالعه پدیده های طبیعی، اصول حاکم بر آنها را کشف کرده توسط روابط ریاضی توصیف می کنند؛ اینان کار خود را در همین حد متوقف می سازند. تکنسین ها افرادی هستند که با دستگاه ها و وسایل به خوبی کار می کنند، یا بعضاً آنها را می سازند؛ در صورتی که از اصول و نحوه کار کرد آنها اطلاع کافی ندارند. یک مهندس کسی است که کار فیزیک دان را - از جایی که رها شده است، جهت پیاده سازی یک وسیله - در دست می گیرد، و به کمک تکنسین به اتمام می رساند.

یک مهندس خوب کسی است که با احاطه به علم، فن و هنر؛ وسایلی را میسازد که باعث آسایش و ارتقای مادی و معنوی انسانها شود. یک مهندس خوب کسی است که بداند مطلب مورد نیاز برای ساخت وسیله مطلوبش در کدام کتاب درج شده است (آدم چرخ را دوباره اختراع نمی کند!). یک مهندس خوب کسی است که با الگو برداری و کپی آگاهانه از وسایل موجود به ساخت وسایل مشابه یا پیشرفته تر نایل شود (مهندسی معکوس[۵]).

---

۱ Engineering
۲ Engineer
۳ EE: Electrical Engineering
۴ Claude Elwood Shannon
۵ Reverse Engineering

حال که با مفاهیم مهندسی، مهندسی برق و مهندس آشنا شدیم به مروری اجمالی در باره روند تکاملی مهندسی برق می پردازیم.
مهندسی برق، در مقایسه با سایر علوم و فنون بسیار جوان است. ادبیات، فلسفه، هنر، تاریخ، ریاضیات، پزشکی، عمران، مکانیک، ... سابقه چند هزار ساله دارند. گویند سینوهه، پزشک فرعون مصر در چهار هزار سال قبل، جراحی مغز فرعون را با موفقیت انجام داده و غده ای را از مغز او خارج کرده است. کشتی سازی فینقی ها، ساخت اهرام مصر، تخت جمشید، سازه های یونان، روم و قوم مایا، داستان های هومر، تاریخ هرودت، فلاسفه و ریاضی دانانی چون ارسطو، افلاطون، ارشمیدس، بطلمیوس،... همگی به زمان قبل از میلاد مسیح تعلق دارند. در صورتی که تنها موردی که به مهندسی برق مربوط می شود و در این دوره اتفاق افتاده است، کشف خاصیت کهربایی عنبر توسط تالس[۱]، فیلسوف و ریاضی دان یونانی در حدود ۶۰۰ سال قبل از میلاد مسیح است **[3]**. همچنین از زمانهای قدیم خاصیت آهنربایی سنگ معدن مگنزیا[۲] واقع در ناحیه تسالی[۳] در یونان شناخته شده بود. در سال ۱۹۳۸ در عراق شیئی کشف شد که قدمت آن به ۲۵۰ سال قبل از میلاد بر می گردد. این شیء که باطری بغداد[۴] نامیده می شود، ظاهراً جهت آب فلز کاری مورد استفاده قرار می گرفته است، که البته صحت این مطلب هنوز تایید نشده است **[4]**.
از این موارد که بگذریم تا سال ۱۶۰۱ مطالب و مستنداتی در مورد برق گزارش نشده است. در این سال یک پزشک انگلیسی به نام ویلیام گیلبرت[۵]، با مطالعاتی که در مورد خاصیت کهربایی عنبر میکرد، این خاصیت را در بعضی اجسام دیگر (نظیر شیشه، گوگرد، ...) کشف کرد. او این مواد را الکتریکا[۶] و این پدیده را الکتریسیته[۷] نامید. بنابراین می توان با این دید، آغاز قرن هفدهم هفدهم میلادی را مقارن با پیدایش مهندسی برق دانست؛ هر چند که مطابق تعریف فوق هنوز به "*مهندسی*" نرسیده ایم!
در سال ۱۶۶۳ شهردار ماگدبورگ به نام گوریکه[۸] به کمک کره های دوار گوگردی یک ماشین تولید الکتریسیته ساکن درست کرد. مدتی بعد اسحاق نیوتن پیشنهاد کرد که کره های گوگردی با کره های شیشه ای جانشین شوند. در سال ۱۷۲۹ طبیعی دان انگلیسی، گری[۹]، خاصیت هدایت الکتریکی فلزات را کشف کرد. وی همچنین بعنوان کاشف اثر میدان الکتریکی شناخته می شود. فرانکلین[۱۰]، سیاستمدار، نویسنده و طبیعی دان آمریکایی، در سال ۱۷۵۲ خاصیت الکتریکی رعد و برق را ثابت می کند. در سال ۱۷۸۰ پزشک و طبیعی دان ایتالیایی به نام گالوانی[۱۱]، هنگامی که مشغول تشریح یک قورباغه بود، به طور اتفاقی متوجه شد که بر اثر تماس دو فلز متفاوت (چاقو و چنگک جراحی) با ران قورباغه، ران منقبض می شود. به این ترتیب ایجاد جریان الکتریکی توسط مواد شیمیایی، به عبارت دیگر تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی کشف شد. حدود بیست سال بعد یعنی در سال ۱۸۰۱، ولتا[۱۲]، فیزیکدان ایتالیایی، اولین باتری را که "*المان گالوانی*" نامیده بود در حضور ناپلئون به نمایش گذاشت. این زمان را می توان سر آغاز الکتریسیته جاری دانست. دیوی[۱۳]، شیمیدان انگلیسی، در سال ۱۸۰۲ با گذرانیدن جریان الکتریکی از یک رشته سیم باعث گداخته شدن آن و ایجاد نور شد. همچنین با عبور جریان الکتریکی از دو میله زغالی جرقه ایجاد کرد (تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی نورانی). وی در سال ۱۸۱۳ موفق شد توسط یک باتری عظیم که از ۱۰۰۰ عنصر تشکیل شده بود، یک قوس الکتریکی پیوسته ایجاد نماید.

---

۱ Thales of Miletus
۲ Magnesia
۳ Tsaly
۴ Baghdad Battery
۵ William Gilbert
۶ Electrica
۷ Elektricity
۸ Otto von Guericke
۹ Stephen Gray
۱۰ Benjamin Franklin
۱۱ Luigi Galvani
۱۲ Alessandro Volta
۱۳ Humphrey Davy

در سال ۱۸۱۱ پواسون[۱]، ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی، نظریه "*پتانسل الکتریکی*" را بیان داشت. در سال ۱۸۲۰ نیز وقایع مهمی در زمینه برق اتفاق می افتد. ارستد[۲]، دانشمند دانمارکی، ایجاد میدان مغناطیسی را در اطراف یک سیم حامل جریان الکتریکی کشف می کند. این خاصیت توسط آمپر[۳]، بیو[۴] و ساوار[۵]، دانشمندان فرانسوی، در همان سال توصیف می شود. شوایگر[۶]، استاد دانشگاه در آلمان، گالوانو متر را اختراع می کند. لذا از این زمان جریان الکتریکی قابل اندازه گیری می شود.در سال ۱۸۲۱ فاراده[۷] فیزیک دان انگلیسی پیشنهاد اولین مدل یک موتور ساده الکتریکی را ارایه می دهد.در سال ۱۸۲۲ آمپر رابطه بین نیروی وارده به دو سیم حامل جریان را بدست می آورد (قانون آمپر). در سال ۱۸۲۶ اهم[۸] فیزیک دان آلمانی رابطه بین ولتاژ، جریان و مقاومت را کشف می کند (قانون اهم). در سال ۱۸۳۱ فاراده قانون اندوکسیون را توصیف کرده بدین وسیله پایه های نظری ساخت ترانسفورماتور را بنا می نهد. ریچی[۹] در سال ۱۸۳۳ طرح اولین مولد الکتریکی را به کمک یک سیم پیچ دوار و یک آهنربای ثابت ارایه میدهد. یاکوبی[۱۰]، مهندس آلمانی، در سال ۱۸۳۸ قایقی را به نمایش می گذارد که با موتور الکتریکی حرکت می کند. در اول ماه می ۱۸۴۹ مورس[۱۱] دستگاه تلگراف را در دفتر ثبت اختراعات آمریکا به نام خود به ثبت رسانید **[5]**. شاید بتوان گفت – طبق تعریفی که قبلاً برای مهندسی شده بود – که مهندسی برق در این روز متولد شده است، زیرا کارهایی که تا کنون در زمینه برق انجام شده بود عملاً مربوط به فیزیک می شدند. با این دید می توان گفت که فقط حدود ۱۶۰ سال از عمر مهندسی برق می گذرد. مورس استاد نقاشی و مجسمه سازی دانشگاه نیویورک بود، که به طور اتفاقی در یک سفر در سال ۱۸۳۲ در مورد الکترومغناطیس شنید و از آن زمان به فکر ساختن دستگاهی برای انتقال اطلاعات از راه دور افتاد. مورس اولین دستگاه خود را در سال ۱۸۴۴ ساخت. البته در سال ۱۸۳۷ کوک[۱۲] و وتستون[۱۳] نیز یک نوع تلگراف اختراع کرده و به ثبت رسانیده بودند؛ مورس نیز با گیل[۱۴] و ویل[۱۵] شریک بود، ولی در نهایت تلگراف به نام مورس شناخته شد. ساخت تلگراف و حروف (کد) مورس زمینه ساز مخابره از راه دور (مخابرات) شد. البته از بیش از ۲۰۰۰ سال قبل از آن از مخابرات نوری استفاده می شد[۱۶]. در سال ۱۸۵۸ اولین کابل کشی زیر دریایی توسط شرکت مورس جهت ارتباط تلگرافی بین آمریکا و اروپا آغاز و در سال ۱۸۶۶ از آن بهره برداری شد.

در سال ۱۸۵۵ ماکسول[۱۷]، استاد فیزیک در اسکاتلند، الکترودینامیک مدرن را پایه گذاری می کند. وی در سال ۱۸۶۴ نظریه الکترومغناطیسی نور را ارایه می دهد. او در سال ۱۸۷۳ با انتشار مقاله ای در باره الکترومغناطیس، معادلات مشهور خود را (معادلات ماکسول) بیان می دارد و به این نتیجه می رسد که می توان انرژی را بکمک امواج الکترومغناطیسی منتقل نمود. در سال

---

[۱] Siméon Daniel Poisson
[۲] Hans Christian Oersted
[۳] André Marie Ampère
[۴] Jean Baptiste Biot
[۵] Felix Sovart
[۶] Johann Salomon Christoph Schweigger
[۷] Michael Faraday
[۸] Georg Simon Ohm
[۹] William Ritchie
[۱۰] Moritz Hermann Jacobi
[۱۱] Samuel Finley Breese Morse
[۱۲] William Cooke
[۱۳] Charles Wheatstone
[۱۴] Leonard Gale
[۱۵] Alfred Vail
[۱۶] مخابره اطلاعات مربوط به میدان جنگ بین ایران و روم با آتشهای رنگی یا تبادل اطلاعات بین قبایل سرخپوست بکمک دود؛ همچنین ارسال خبر در بین قبایل در جنگل های آفریقا توسط طبل بزرگ و کوچک (مخابرات صوتی). احتمالاً ویل با الهام از طبل بزرگ (خط)، و طبل کوچک (نقطه)، ایجاد کد را به مورس پیشنهاد داده است.
[۱۷] James Clerk Maxwell

۱۸۶۶ زیمنس[۱] آلمانی و وتستون[۲] انگلیسی، اصل "*دینامو-الکتریک*" را کشف کرده، نحوه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را آشکار می سازند (دینام). گراهام بل[۳] آمریکایی اولین تلفن قابل استفاده را در سال ۱۸۷۶ به ثبت می رساند. ادیسون[۴]، ادیسون[۴]، مخترع آمریکایی، در سال ۱۸۷۸ شرکت خود را تاسیس می نماید. یک سال بعد لامپ رشته ای خود را با طول عمر ۴۵ ۴۵ ساعت، به جهان عرضه می کند. وی در سال ۱۸۸۲ اولین شبکه برق رسانی جهان را، با ۵۹ مشترک، با جریان مستقیم و ولتاژ ۱۱۰ ولت دایر می کند. در سال ۱۸۸۷ تسلا[۵] چند اختراع در مورد جریان متناوب به ثبت می رساند. در سال های بعد منازعات سختی بین ادیسون و تسلا بر سر مناسبتر بودن جریان مستقیم یا متناوب جهت انتقال، توزیع و استفاده از برق در میگیرد که به "جنگ جریانها[۶]" مشهور می شود. سر انجام- با اثبات برتری جریان متناوب - تسلا فاتح این نبرد معرفی می شود. در نتیجه جریان متناوب به عنوان استاندارد، جهت تبدیل و انتقال انرژی الکتریکی انتخاب می شود.

در سال ۱۸۸۸ هرتز[۷]، فیزیک دان آلمانی، وجود امواج الکترومغناطیس را، که قبلاً توسط ماکسول پیش بینی شده بود، در آزمایشگاه به اثبات رسانید. از این تاریخ، عصر "مخابرات بی سیم" آغاز می شود. هرتز یک فرستنده و گیرنده رادیویی (بیسیم) درست کرد و توانست در آزمایشگاه خود امواج را تولید و در فاصله چندین دسی متری آنها را تشخیص دهد. در سال ۱۸۹۶ پوپف[۸] روس یک تلگراف بیسیم ساخت و توانست اطلاعات را بدون سیم به فاصله ۶۰ متر منتقل نماید. در همان سال مارکونی[۹] ایتالیایی توانست به فاصله ۲۴۰۰ متری دست یابد.

در سال ۱۸۹۰ اولین قطار برقی زیر زمینی (مترو) در لندن مورد بهره برداری قرار می گیرد. در سال ۱۸۹۹ اولین قطار برقی بین شهری در برلین راه اندازی می شود ($40km, 750V, 40Hz$). در سال ۱۹۰۱ براون[۱۰] آلمانی یکسو ساز نیمه هادی (دیود مس- اکسید مس) و در سال ۱۹۰۴ فلمینگ[۱۱] انگلیسی اولین لامپ رادیو (دیود خلاء) را ابداع می کند. در سال ۱۹۰۶ فون لیبن[۱۲] اتریشی و دو فارست[۱۳] آمریکایی مستقل از یک دیگر، لامپ تقویت کننده (تریود[۱۴]) را اختراع کردند. در سال ۱۹۰۶ اولین جاروی برقی، در سال ۱۹۱۰ اولین یخچال برقی و در سال ۱۹۲۰ اولین ماشین لباس شویی وارد بازار شدند. اونس[۱۵] فیزیک دان هلندی و برنده جایزه نوبل، در سال ۱۹۱۱ ابر رسانایی[۱۶] را کشف می کند. در سال ۱۹۲۳ اولین خط انتقال ولتاژ بالا با ولتاژ ۲۲۰ کیلو ولت وارد شبکه برق رسانی آمریکا می شود. در همین سال تلویزیون الکترو مکانیکی توسط بیارد[۱۷] انگلیسی اختراع می شود. ولی ساخت اولین دستگاه تمام الکترونیکی قابل استفاده توسط فارنزورت[۱۸] در آمریکا در سال ۱۹۲۸ انجام می پذیرد. در نمایشگاه بین المللی سال ۱۹۳۶ در پاریس، شرکت اسرام[۱۹] اولین لامپ های مهتابی را عرضه می نماید. در سال ۱۹۴۰ رادار[۱] در آزمایشگاه های وزارت دفاع انگلستان اختراع می شود.

---

۱ Werner Siemens
۲ Charles Wheatstone
۳ Alexander Graham Bell
۴ Thomas Alva Edison
۵ Nikola Tesla
۶ War of Currents
۷ Heinrich Hertz
۸ Alexander Popov
۹ Guglielmo Marconi
۱۰ Helmut Braun
۱۱ John Ambrose Fleming
۱۲ Robert von Lieben
۱۳ Lee De Forest
۱۴ Triode
۱۵ Heike Kamerlingh Onnes
۱۶ Super Conductivity
۱۷ John Logie Biard
۱۸ Philo Taylor Farnsworth
۱۹ Osram

در سال ۱۹۴۱ اولین کامپیوتر قابل استفاده جهان بنام **Z3** توسط تسوزه[۲] آلمانی ساخته شد. این کامپیوتر الکترو مکانیکی بوده، به کمک تعداد زیادی رله کار می کرد. نامبرده دو سال قبل **Z1** و **Z2** را بدون حصول موفقیت ساخته بود. **Z22** در موزه برلین موجود و هنوز قابل بهره برداری است. با ساخت اولین کامپیوتر الکترونیکی بنام **ENIAC**[۳] توسط اکرت[۴] و موچلی[۵] در سال ۱۹۴۶ در آمریکا، عصر کامپیوتر آغاز شد. در ساخت این رایانه ۱۴,۴۶۸ لامپ الکترونی به کار رفته بود. توانی که این سیستم مصرف می کرد بالغ بر ۵۰۰ کیلو وات بود! ساخت ترانزیستور در ۲۳ دسامبر ۱۹۴۷ در آزمایشگاه بل[۶] در آمریکا توسط سه محقق: شاکلی[۷]، باردین[۸] و براتن[۹] پنجره جدیدی را برای کوچکتر کردن مدارها و سیستم های الکترونیکی گشود. تکنولوژی ترانزیستور جاده صاف کن مدارهای مجتمع[۱۰] – که در سال ۱۹۵۸ توسط کیلبی[۱۱] و مستقل از او در سال ۱۹۵۹ توسط نویس[۱۲] ابداع شده بود – گشت. در سال ۱۹۵۵ اولین نیروگاه هسته ای با نیروی ۹ مگا وات، در انگلستان مورد بهره برداری قرار گرفت. در سال ۱۹۶۰ اولین دستگاه لیزر درست شد. در سال ۱۹۷۱ اولین میکرو پروسسور[۱۳] با نام ۴۰۰۴ توسط هف[۱۴] در شرکت اینتل[۱۵] ساخته شد. این پروسسور چهار بیتی بود. اولین پروسسور ۸ بیتی تولید همین شرکت تحت نام ۸۰۰۸ بود. پروسسوری که با آن اولین کامپیوتر شخصی[۱۶] ساخته شد، ۸۰۸۰ نام داشت که متعلق به شرکت اینتل بود و در سال ۱۹۷۳ وارد بازار شد.

پس از این تاریخ عملاً پدیده جدیدی در برق بوجود نیامده است. و پیشرفت های شگرفی که در ۳۵ سال گذشته عاید بشر شده است، در تکامل اختراعات قبلی می باشد. برای مثال لامپ رشته ای که امروزه هنوز در منازل بیشترین مورد استفاده را دارد، یا لامپ های اکثر قریب به اتفاق اتومبیل ها یا چراغ قوه ها یا ... ، همان لامپ ادیسون است که حدود ۱۳۰ سال قبل وارد بازار شده است! فقط دارای راندمان و طول عمر بیشتری است (مثلاً طول عمر متوسط ۱۰۰۰ ساعت در مقایسه با ۴۵ ساعت). یا اساس لامپ های کم مصرف که امروزه متداول شده است، همان لامپ مهتابی است که اسرام در ۷۰ سال قبل عرضه کرده بود و ... ، همچنین تفاوت رادیوهای امروزی با رادیوی مارکونی در کیفیت صدا و جثه دستگاه است. تفاوت نیروگاه های امروزی با نیروگاه های ۱۱۰ سال قبل در بازده و توان آنها (گیگا وات در مقابل کیلو وات) است. همچنین تفاوت متروها و قطارهای برقی کنونی با آن زمان در سرعت، راحتی و ایمنی آنها است. و بالاخره تفاوت بین پنتیم[۱۷] و ۴۰۰۴ در حجم و سرعت (چند میلیون ترانزیستور در مقابل چند هزار ترانزیستور، چند گیگا هرتز بجای چند مگا هرتز) آنها است.

و اما نگاهی به آینده: طبیعتاً پیشرفت های علمی و فنی بشر به انتها نرسیده است. از مهمترین مسایلی که در حال حاضر مهندسین را به چالش می کشند، بحث های مربوط به انرژی، محیط زیست و فناوری اطلاعات است. بستر (فیزیکی) انرژی های نو، از قبیل استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی، از حرارت داخلی زمین، جوش[۱۸] هسته (بجای شکافت هسته)، ... آماده، ولی هنوز مسایل

---

۱ **Radar: Ra**dio **D**etection **a**nd **R**anging
۲ Konrad Zuse
۳: Electronic Numerical Integrator and ComputerENIAC
۴ John Presper Eckert
۵ John Mauchly
۶ Bell Laboratories
۷ William B. Shockley
۸ John Bardeen
۹ Walter Brattain
۱۰ ntegrated CircuitIC: I
۱۱ Jack Kilby
۱۲ Robert Noyce
۱۳ icroprocessorμP: M
۱۴ Marcian Hoff
۱۵ Intel
۱۶ Personal ComputerPC:
۱۷ Pentium
۱۸ Fusion

فنی آن حل نشده است. در حال حاضر به نظر می رسد که نهایتاً تامین انرژی در آینده، فقط به کمک جوش هسته امکان پذیر باشد. ولی با وجود این که بیش از ۵۰ سال است که در این زمینه تحقیق میشود و در آزمایشگاه نتایج اولیه ای هم بدست آمده است، ولی تخمین زده می شود که برای حصول نتیجه نهایی به بیش از ۵۰ سال دیگر کار مداوم نیاز باشد. بحث نانو تکنولوژی[۱]، یعنی ساخت و استفاده از وسایلی که ابعادی در حد نانو متر دارند، نیز بحث روز است و امید میرود با استفاده از این فن آوری، تحول قابل ملاحظه ای در زندگی بشر رخ دهد. ساخت ترانزیستورهایی که فقط از یک اتم[۲] و یا یک الکترون[۳] تشکیل شده اند، اند، باعث خواهد شد که پروسسورهایی به مراتب قدرتمندتر و کوچکتر قابل ساخت باشند و ....

مراجع

[1] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/3/32/Mars-exploration.jpg
[2] The American Heritage® Dictionary of the English Language, Fourth Edition copyright ©2000 by Houghton Mifflin Company. Updated in 2003. Published by Houghton Mifflin Company
[3] http://library.thinkquest.org/27826/htmldocs/deutsch/intro.htm
[4] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_electrical_engineering
[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_F._B._Morse

۲- آشنایی با گرایش قدرت

موضع این گرایش تولید انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به سایر انرژیها و بالعکس می باشد.

۲-۱ انتقال و توزیع

تولید انرژی الکتریکی در نیروگاههای برق انجام می شود. نیروگاههای برق به دلایل مختلف ممکن است از مراکز مصرف فاصله داشته باشند. این دلایل شامل موارد زیر است.

- جلوگیری از آلودگی محیط زیست
- افزایش بازده نیروگاهها
- استفاده از انرژیهای نو (مانند باد که قابلیت انتقال ندارند)

انرژی الکتریکی بوسیله خطوط انتقال از نیروگاهها به مراکز مصرف منتقل می‌شوند. خطوط انتقال علاوه بر انتقال انرژی الکتریکی ایجاد شبکه به هم پیوسته نیروگاههای مختلف و مراکز مصرف مختلف را نیز بعهده دارد. ولتاژ ژنراتورها بین ۱۰ تا ۳۰ کیلو ولت می‌باشد. با فن‌آوریهای امروزی دسترسی به ولتاژهای بیشتر بوسیله ژنراتور بسیار گران تمام می‌شود.

هر چقدر بتوان ولتاژ کاری سیستم انتقال برق را بالا برد جریان آن کم می شود (توجه کنید که توان بار برابر $P=VI$ می باشد. بنابراین با توان ثابت در صورت بالا بردن ولتاژ جریان کم می شود) و در نتیجه تلفات انتقال کاهش می یابد. در واقع افزایش ولتاژ انتقال باعث کاهش جریان خطوط و در نتیجه کاهش جریان هادیها و بنابراین کاهش تلفات اهمی که بصورت I^2R متناسب با مربع جریان می باشد، می‌شود. حداکثر، ولتاژ انتقال در ایران ۴۰۰ کیلو ولت می‌باشد در حالیکه خطوط ۲۳۰ و ۱۳۲ کیلو ولت نیز وجود دارند. وسیله ای که برای اینکار وجود دارد بنام ترانسفورمر شناخته می شود. اصول کارکرد این وسیله در بخش بعدی این فصل آورده شده است. از آنجا که ترانسفورمر با برق AC کار می کند بنابراین شبکه های برق عمدتا AC می باشند.

---

[۱] Nano Technology
[۲] Single Atom Transistor
[۳] Single Electron Transistor

در ایران بسیاری از صنایع بزرگ برق را در سطح ۱۳۲ کیلو ولت و حتی ۲۳۰ کیلو ولت دریافت می‌کنند در حالیکه صنایع کوچکتر برق ۶۳ کیلو ولت و ۲۰ کیلو ولت و در نهایت ۳۸۰ ولت مصرف می‌کنند. این صنایع سپس برق دریافتی را به سطوح ولتاژ مورد نیاز خود در پستهای اختصاصی تبدیل می‌کنند. مصرف‌کننده‌های خانگی و بسیاری از مصرف کننده‌های تجاری برق تکفاز ۲۲۰ ولت استفاده می‌کنند که در شکل نشان داده نشده است. برای کاهش سطح ولتاژ به سطح مورد نیاز مصرف‌کننده نیز از ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

اگر چه بخش انتقال و توزیع در نگاه اولیه بخشی از شبکه برق‌رسانی می‌باشند، ولی جدا سازی شبکه انتقال از شبکه توزیع بسیار متداول می‌باشد شبکه توزیع نیز معمولاً به دو بخش فشار قوی (در ایران ۲۰ کیلو ولت) و فشار ضعیف (در ایران ۳۸۰/۲۲۰ ولت) تقسیم می‌شود. شبکه انتقال با توجه به سطوح بالای ولتاژ و توانهای زیاد انتقالی از خطوط بخش مهمی از شبکه برق‌رسانی می‌باشد و بحث مدلسازی و حفاظت آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

امروزه با گسترش مصرف برق و به پایان رسیدن سوختهای فسیلی و مشکلات پیش روی نیروگاههای اتمی، توجه زیادی به انرژیهای تجدید پذیر و نو شده است که از جمله آنها می توان به باد و خورشید اشاره کرد. از آنجا که این انرژیها می تواند در دسترس همه باشد شبکه های برق در حال تجدید ساختار مهمی از حالت سنتی با نیروگاههای بزرک به حالت جدید با تولیدات پراکنده می باشند.

۲-۲ تبدیل انرژی الکترومکانیکی

یک ماشین الکتریکی وسیله ای است که فرایند تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس را انجام می دهد. اگر تبدیل انرژی از الکتریکی به مکانیکی انجام شود به ماشین الکتریکی موتور و اگر از مکانیکی به الکتریکی انجام شود به آن ژنراتور می گویند. در این تعریف یک استثنا وجود دارد و آن ترانسفورماتور می باشد. ترانسفورماتور یک ماشین الکتریکی است که در آن تبدیل انرژی انجام نمی شود و تنها سطح ولتاژ و جریان الکتریکی را تغییر می دهد. در این بخش به شرح مدل مداری انواع متداول ماشینهای الکتریکی پرداخته می شود و اصول عملکرد آنها شرح داده می شود. اما قبل از آن در مورد ساختار کلی آنها توضیحاتی داده می شود.

- ترانسفورماتورها

در این وسیله یک سیم پیچ تولید میدان مغناطیسی کرده و شار آن از سیم پیچ دیگر عبور داده می شود و در آن ولتاژ القایی تولید می گردد. دو سیم پیچ به دلایل ذکر شده در فوق بر روی یک هسته از جنس آهن و آلیاژهای آن پیچیده می شوند.

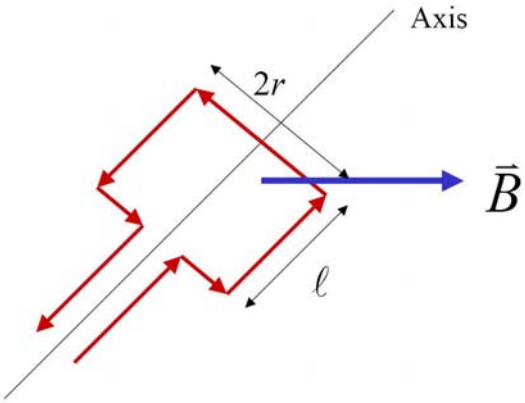
چون در هردو آنها قانون فاراده صادق می باشد نسبت ولتاژ در دو سیم پیچ به نسبت تعداد دورها می باشد. و نسبت جریان به نسبت عکس آن خواهد بود.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

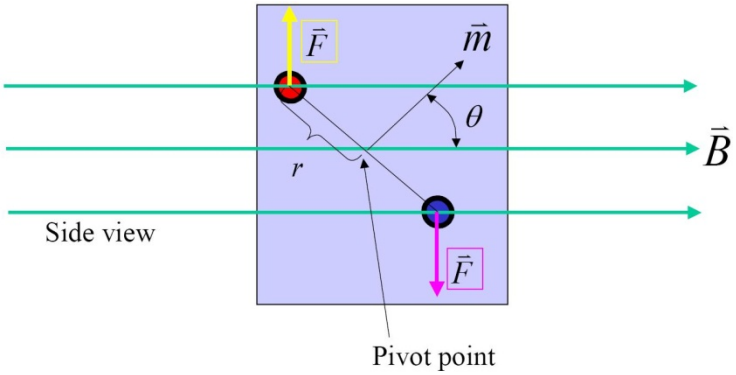
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

- ماشین DC دوار

یک حلقه سیم مستطیل شکل که می‌تواند در یک میدان مغناطیسی یکنواخت حول محور طولی خود بچرخد را در نظر بگیرید.



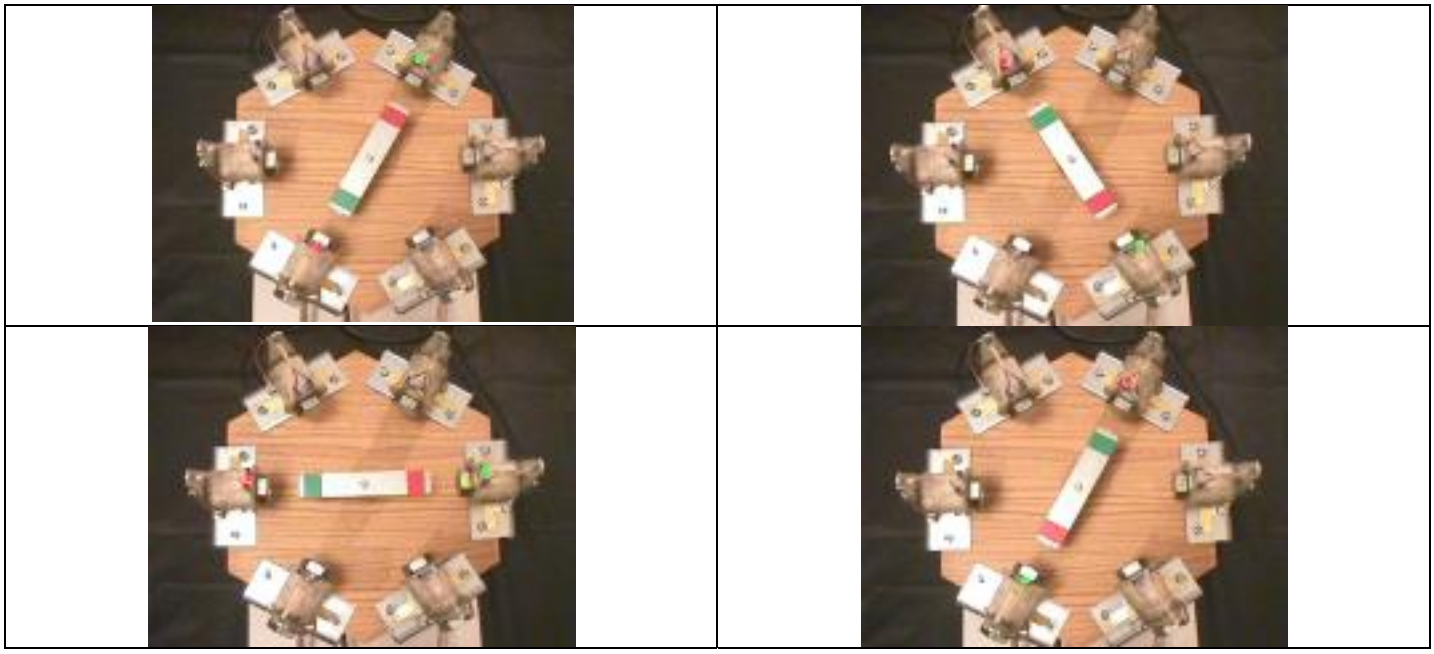
عبور جریان از سیم تحت تأثیر میدان مغناطیسی می‌تواند باعث ایجاد نیرو در هر یک از هادیهای چهار ضلع مستطیل شود. نیروی وارد بر دو ضلع ابتدا و انتهائی در خلاف جهت یکدیگر است و در صورتی که فاصله خالی بین دو تکه هادی ضلع جلوئی ناچیز باشد یکدیگر را خنثی می‌کنند. بعلاوه جهت این دو نیرو به صورتی نیست که گشتاوری حول محور گردش ایجاد کند. اما چنانچه در شکل زیر دیده می‌شود، عبور جریان از هادیهای جانبی نیروهائی به سمت بالا و پائین ایجاد می‌کند.



اگر جریان همواره در یک جهت باشد پس از آنکه دوقطبی مغناطیسی از امتداد میدان عبور کند گشتاور ایجاد شده منفی خواهد شد و بردار صفحه قاب هادی را به امتداد میدان $\theta = 0$ بر می‌گرداند. بنابراین چنین موتوری پس از چند نوسان در این محل متوقف می‌شود. برای ادامه حرکت حلقه پس از عبور از امتداد میدان لازم است جهت جریان در هر نیم دور عوض شود. در این صورت گشتاور همواره در یک جهت اعمال می‌شود و حلقه می‌تواند به حرکت خود ادامه دهد.

- ماشینهای الکتریکی AC

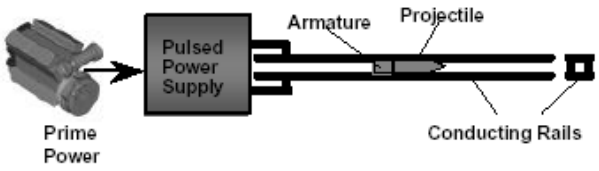
موتور ساده‌ای که در قسمت قبل بررسی شد از یک منبع تغذیه DC استفاده می‌کند. تقریباً تمام انرژی برق تولید شده در دنیا به صورت متناوب است. برای استفاده از موتورهای DC باید برق متناوب را به مستقیم تبدیل نمود. این مسأله باعث افزایش هزینه و تلفات و کاهش قابلیت اطمینان می‌شود. بنابراین اگر بتوان از موتورهائی استفاده نمود که بتوانند مستقیماً از برق متناوب استفاده بسیار مطلوب خواهد بود. به همین دلیل بیشتر ماشینهای الکتریکی مورد استفاده در صنعت از نوع AC هستند. شکل زیر نمونه ساده شده ای از یک ماشین AC را نشان می دهد.



- ماشینهای خطی

اگرچه کاربردهای زیادی وجود دارند که نیاز به حرکت خطی دارند، اما اغلب به صورت سنتی از موتورهائی با حرکت دوار استفاده می‌شود و هر جا حرکت خطی مورد نیاز باشد با استفاده از وسایل مکانیکی حرکت دورانی را به حرکت خطی تبدیل می‌کنند. علت این امر مسائلی نظیر هزینه تولید زیاد به دلیل مشکلات ساخت مکانیکی، نیاز به استفاده از جعبه دنده (که برای حرکت دوار مناسب‌ترند) کاهنده سرعت در بسیاری از کاربردها، و همینطور ساختار نامتقارن مغناطیسی در موتورهای با ابعاد محدود، که از بازده و کارائی آنها می‌کاهد، است. با وجود این در سالهای اخیر با توجه به پیشرفتهای بدست آمده در ساخت ماشینهای دارای آهنربای دائم و ابررساناهای دمای زیاد، استفاده از ماشینهای الکتریکی خطی در کاربردهائی نظیر اتوماسیون و حمل و نقل رو به افزایش است، اما بیشترین کاربردهای ماشینهای الکتریکی همچون تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها، دمنده‌ها، پمپها، همچنان نیاز به حرکت دورانی دارند.

قطار Transrapid با سرعت بیش از ۵۰۰ کیلومتر در ساعت در واقع یک ماشین خطی بزرگ است که بخشی از آن روی ریل و بخش دیگر آن در زیر قطار تعبیه شده است. این وسیله نقلیه ریلی به وسیله نیروی الکترمغناطیسی در هوا معلق نگه داشته شده و در حین حرکت تماسی با ریل ندارد.



در این اسلحه مدرن برای رساندن سرعت گلوله به ۶۰۰۰ متر بر ثانیه از اصول ماشینهای خطی استفاده می‌شود. با چنین تفنگی یک تک‌تیرانداز می‌تواند هدفی را در فاصله یک مایلی مورد اصابت قرار دهد که سه تا چهار برابر بیشتر از یک تفنگ سنتی است.

مراجع

۳- *آشنایی با کنترل*

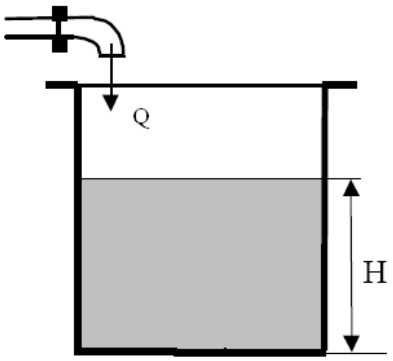
یک سیستم کنترلی[۱] مجموعه‌ای از اجزاء مرتبط به هم است که در قالب یک سیستم واحد برای رسیدن به پاسخ سیستمیِ مطلوبی[۲] تلاش می‌کنند (با مفهوم پاسخ مطلوب سیستم در درس‌های کنترلی بیشتر آشنا خواهید شد. دست‌یابی به پاسخ مطلوب می‌تواند تعابیر کیفی یا کمی مختلفی داشته باشد). یکی از اجزاء یک سیستم کنترلی جزء یا پروسه‌ای[۳] است که بایستی کنترل شود تا پاسخ آن به پاسخ مطلوب مورد نظر تا حد امکان نزدیک باشد. اجازه دهید این جزء را با بلوکی به صورت نشان داده شده در شکل ۳-۱ نمایش دهیم.

شکل ۳-۱: پروسه‌ای که قرار است کنترل شود.

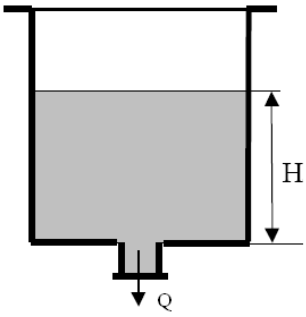
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای پروسه نشان داده شده در شکل ۳-۱ یک ورودی[۴] و یک خروجی[۵] در نظر گرفته شده است. از نقطه نظر مهندسی کنترل ورودی در یک پروسه به سیگنالی گفته می‌شود که تاثیر می‌گذارد و خروجی سیگنالی است که از آن تاثیر می‌پذیرد. برای اینکه با مفهوم ورودی و خروجی در یک پروسه بیشتر آشنا شوید، بگذارید مثالی را مطرح کنیم. به عنوان مثال پروسه نشان داده در شکل ۲ را در نظر بگیرید. این شکل مخزنی را نشان می‌دهد که مایعی به آن وارد می‌شود. در این پروسه جریان مایع ورودی (Q) نقش ورودی را خواهد داشت و ارتفاع مایع درون این مخزن (H) که اندازه آن وابسته به جریان مایع ورودی است، می‌تواند نقش خروجی پروسه را داشته باشد. حال پروسه مشابهی که در شکل ۳ نشان داده شده است را ملاحظه کنید. این پروسه در واقع مخزنی است که مایعی از آن خارج می‌شود. برای این پروسه نیز ارتفاع مایع (H) نقش خروجی را داشته و جریان مایع خروجی از مخزن (Q) نقش ورودی را خواهد داشت.

---

[۱] Control system
[۲] Desired system response
[۳] Process
[۴] Input
[۵] Output



شکل ۲: پروسه پر شدن یک مخزن مایعات.



شکل ۳: پروسه خالی شدن یک مخزن مایعات.

مدل[۱] یک پروسه بیان کننده ارتباط بین ورودی و خروجی آن پروسه می‌باشد. به عنوان مثال، با فرض استوانه‌ای بودن مخزن موجود در پروسه نشان داده شده در شکل ۲ مدل این پروسه چنین بدست می‌آید:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q}{A} \qquad (۱)$$

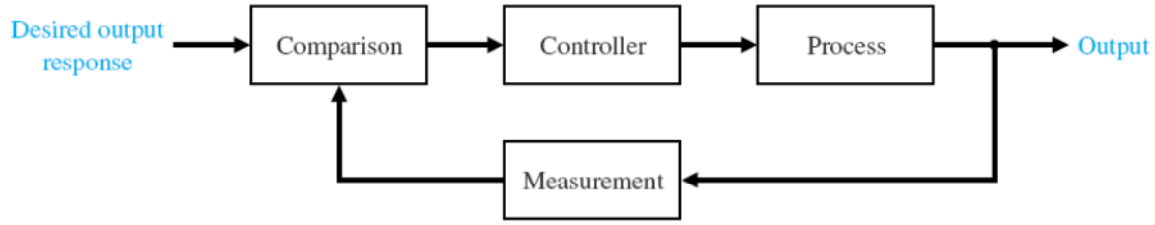
که در آن A نشان‌دهنده سطح مقطع مخزن می‌باشد. مدل (۱) بر اساس این واقعیت فیزیکی بدست آمد که نرخ تغییرات حجم مایع درون مخزن برابر جریان مایع ووردی به آن است. استفاده از قوانین فیزیکی برای بدست آوردن مدل یک پروسه را مدلسازی[۲] آن پروسه می‌گویند.

برای کنترل یک پروسه دو دیدگاه می‌تواند مطرح شود: کنترل حلقه باز[۳] و کنترل حلقه بسته[۴]. در یک سیستم کنترلی حلقه باز جهت کنترل پروسه از یک دستگاه محرک[۵] به فرم نشان داده شده در شکل ۴ استفاده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود خروجی این محرک ورودی پروسه خواهد بود. با توجه به مقدار مطلوبی که برای خروجی پروسه مد نظر است، محرک ورودی پروسه را باید به گونه‌ای تنظیم کند که خروجی سیستم به مقدار مطلوب مورد نظر برسد.

شکل ۴: یک سیستم کنترلی حلقه باز.

---

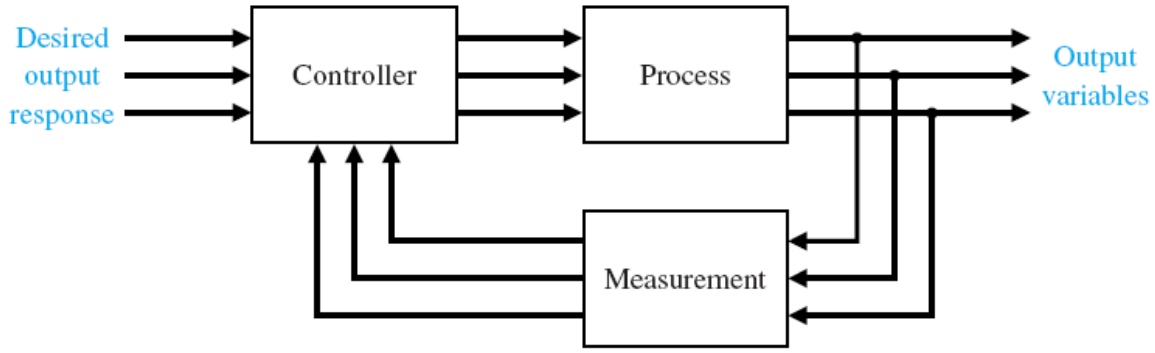
[۱] Model
[۲] Modeling
[۳] Open-loop control
[۴] Closed-loop control
[۵] Actuating device



شکل ۵: یک سیستم کنترلی حلقه بسته.

بر خلاف سیستم کنترلی حلقه باز، در یک سیستم کنترلی حلقه بسته خروجی واقعی پروسه اندازه‌گیری شده و با مقدار مطلوب مورد نظر مقایسه می‌شود. اختلاف بین خروجی واقعی پروسه و مقدار مطلوب مورد نظر را سیگنال خطا[۱] می‌نامیم. همچنین در این حالت به خروجی اندازه‌گیری شده پروسه سیگنال فیدبک[۲] گفته می‌شود. در واقع تفاوت بنیادی یک سیستم کنترلی حلقه بسته با یک سیستم کنترلی حلقه باز در استفاده از همین سیگنال فیدبک است. ساختار یک سیستم کنترلی حلقه بسته در شکل ۵ نمایش داده شده است. در یک سیستم کنترلی حلقه بسته جزئی به نام کنترل کننده[۳] بر مبنای سیگنال خطا ورودی پروسه را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که سیگنال خطا کاهش یابد (یا ترجیحاً به صفر میل کند).

در مسائل عملی گاه نیاز به کنترل پروسه‌هایی داریم که دارای چندین ورودی و چندین خروجی هستند. مثلاً ممکن است بخواهیم به طور همزمان دما و فشار یک مخزن را طوری کنترل کنیم که مقادیر مطلوبی باقی بماند. در مسائلی این چنینی با سیستم‌های کنترلی چند متغیره[۴] سر و کار خواهیم داشت. ساختار ساده چنین سیستمی در شکل ۷ آورده شده است.

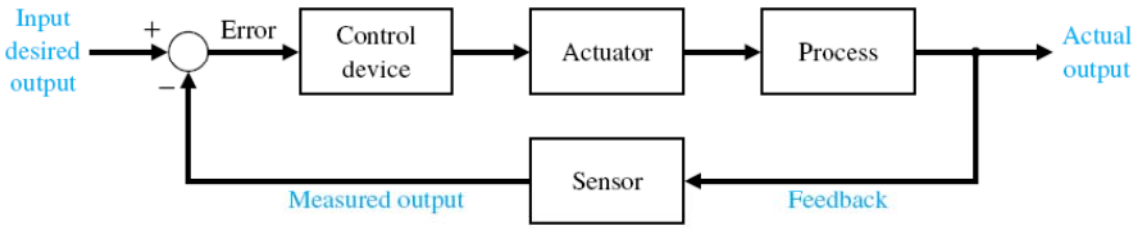


شکل ۷: ساختار ساده یک سیستم کنترلی چند متغیره.

جزء دیگری که معمولاً در یک سیستم کنترلی حلقه بسته وجود دارد سنسور[۵] می‌باشد. از سنسورها برای اندازه‌گیری خروجی پروسه به منظور بکارگیری آن به عنوان سیگنال فیدبک استفاده می‌شود. همچنین از دیگر اجزاء یک سیستم کنترلی حلقه بسته می‌توان به محرک‌ها[۶] اشاره نمود. در واقع وظیفه یک محرک اعمال سیگنال کنترلی به پروسه می‌باشد. شکل ۸ ساختار یک سیستم کنترلی حلقه بسته را به همراه سنسور و محرک مورد نیاز نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ورودی یک محرک سیگنال خروجی کنترل‌کننده و خروجی آن سیگنال ورودی به پروسه می‌باشد.

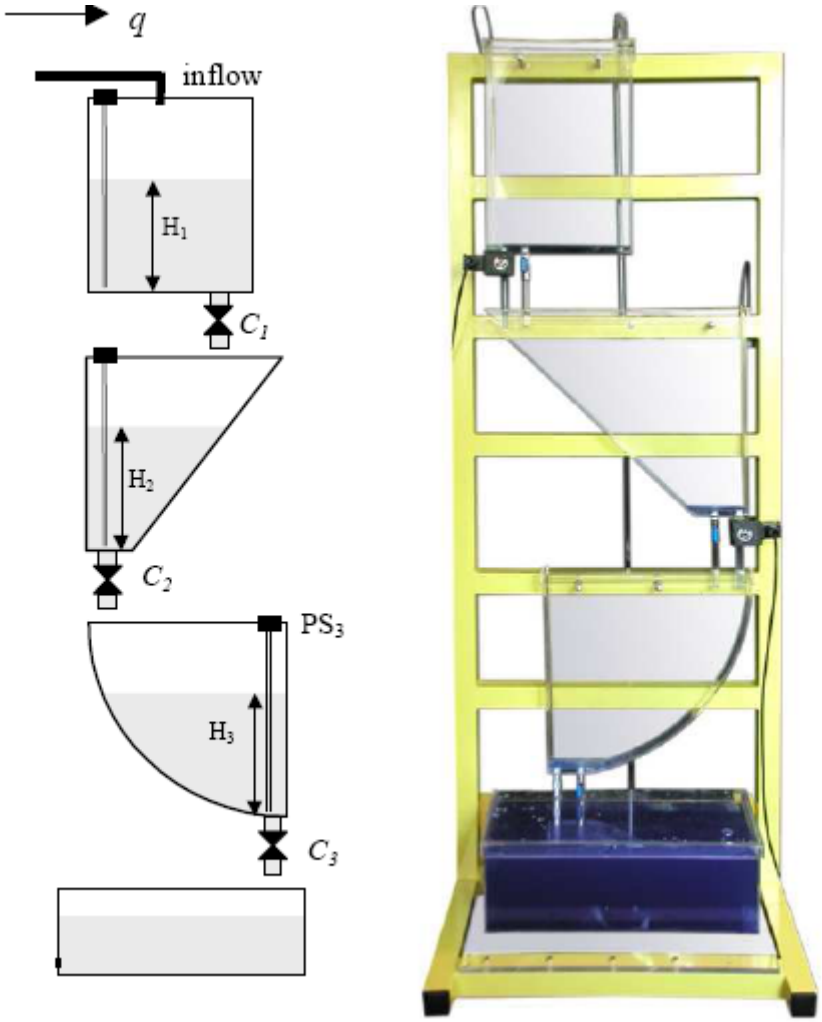
---

[۱] Error signal
[۲] Feedback signal
[۳] Controller
[۴] Multivariable control system
[۵] Sensor
[۶] Actuators

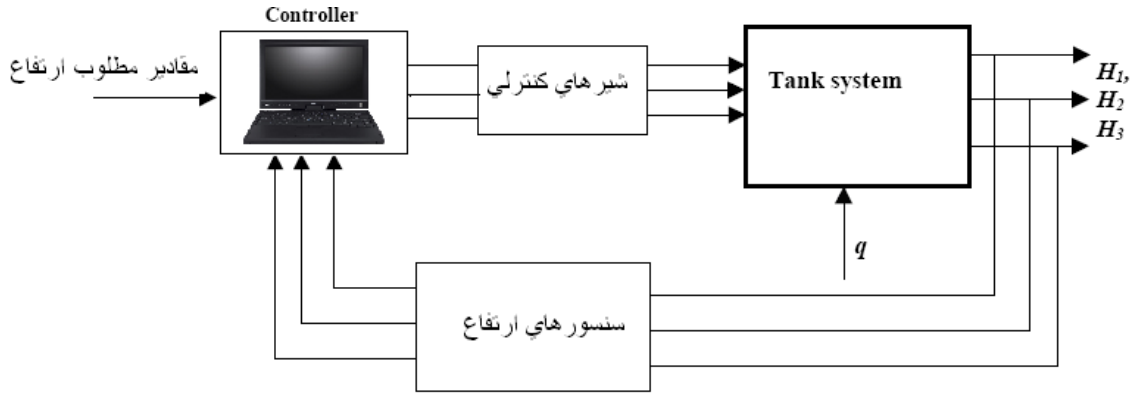


شکل ۸: یک سیستم کنترلی حلقه بسته به همراه محرک و سنسور.

برای اینکه با مفاهیم سنسور و محرک بیشتر آشنا شویم، پروسه نشان داده شده در شکل ۹ را در نظر بگیرید. این پروسه از سه مخزن متوالی تشکیل شده است که آب به اولین مخزن وارد می‌شود. فرض کنید هدف کنترل ارتفاع آب در این مخازن باشد، در حالی که روی میزان آب ورودی به مخزن اول هیچ کنترلی نداریم. برای رسیدن به این هدف در انتهای هر مخزن شیرهای الکتریکی‌ای تعبیه شده‌اند که متناسب با میزان ولتاژی که به آنها اعمال می‌شود باز خواهند شد. در واقع این شیرها نقش محرک را به عهده خواهند داشت که سیگنال کنترلی را از یک کامپیوتر که نقش کنترل‌کننده را دارد دریافت کرده و به پروسه اعمال می‌کنند. همچنین نیاز به سنسورهایی داریم که ارتفاع آب را اندازه گرفته به نحوی سیگنال فیدبک را تولید نمایند. در کامپیوتر مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر مطلوب مقایسه شده و بر اساس میزان سیگنال خطا سیگنال‌های ولتاژی توسط کامپیوتر تولید می‌شود. این سیگنال‌ها به شیرهای کنترلی اعمال می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در این حالت کامپیوتر همزمان نقش مقایسه کننده و کنترل‌کننده را بر عهده دارد.

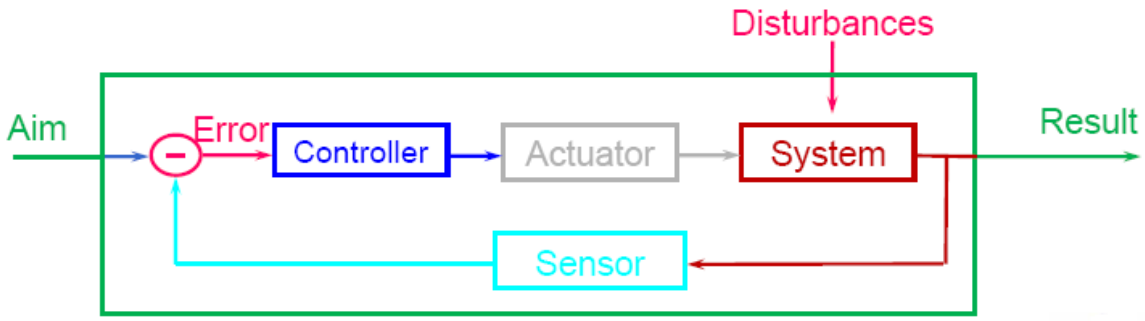


شکل ۹: پروسه تشکیل شده از سه مخزن متوالی.



شکل ۱۰: سیستم کنترلی حلقه بسته برای کنترل ارتفاع آب در مخازن متوالی پروسه شکل ۹.

در مثال مطرح شده، میزان آب ورودی به مخزن اول نقش سیگنال ورودی‌ای را دارد که بر خروجی سیستم یعنی ارتفاع آب در مخازن مختلف تاثیر می‌گذارد اما در واقع چون تنظیم مقدار آن از اختیار ما خارج است، این ورودی در واقع یک ورودی ناخواسته است. به چنین ورودی‌های ناخواسته‌ای که بر خروجی پروسه تاثیر می‌گذارند، سیگنال‌های اغتشاش[۱] گفته می‌شود. یکی از اهداف کنترلی می‌تواند این باشد که اثر سیگنال‌های اغتشاش بر روی خروجی پروسه تا حد ممکن کاهش یابد. ساختار کلی یک سیستم کنترلی حلقه بسته در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

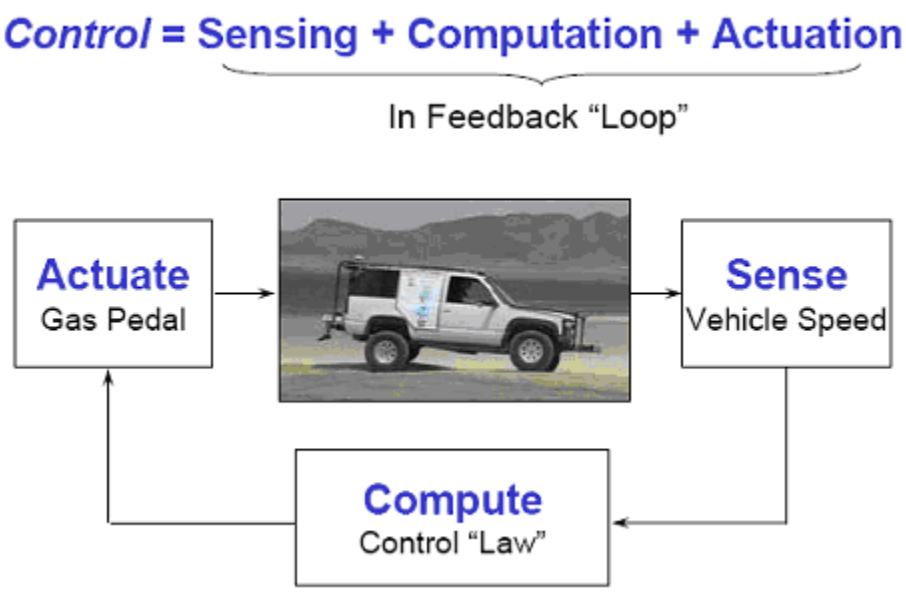


شکل ۱۱: ساختار یک سیستم کنترلی حلقه بسته.

تمرین: اصطلاحاً گفته می‌شود که در یک سیستم کنترلی حلقه بسته سه عمل حس کردن[۲]، محاسبه کردن[۳] و تحریک کردن[۴] انجام می‌شود، که این سه وظیفه به ترتیب بر عهده سنسورها، کنترل‌کننده و محرک می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲ رانندگی کردن را به عنوان یک سیستم کنترلی حلقه بسته تعبیر کنید که در آن سه عمل بیان شده صورت می‌پذیرد. در این سیستم کنترلی چه اجزایی نقش سنسورها، کنترل‌کننده و محرک را بازی می‌کنند؟ چه عواملی می‌توانند نقش‌های سیگنال‌های اغتشاشی را داشته باشند؟

---

[۱] Disturbance signals
[۲] Sensing
[۳] Computing
[۴] Actuating



شکل ۱۲: عمل رانندگی به عنوان یک سیستم کنترلی حلقه بسته

مراجع:

R.C. Dorf and R.H Bishop, *Modern Control Systems*, Eleventh Ed., Prentice Hall, 2008. [1]

K.J. Astrom and R.M. Murarry, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2008. [2]

R.M. Murarry, *Lectures of Analysis and Design of Feedback Systems Course*, Control and Dynamical Systems, California Institute of Technology, Available online: http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa04/lectures.html [3]

http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller [4]

INTECO Ltd., *Multitank System - User's Manual*, 2009. [5]

۴- آشنایی با گرایش الکترونیک

الکترونیک شاخه‌ای از علم، مهندسی و تکنولوژی است که مدارات الکتریکی دارای ادوات فعال الکتریکی مانند لامپ خلاء، ترانزیستور، دیود و مدارات مجتمع را شامل می‌شود. خواص غیرخطی این عناصر و قابلیت کنترل جریان الکترون‌ها در این ادوات امکان تقویت و یا تغییر در سیگنال الکتریکی را فراهم می‌آورد که از این خواص در انتقال اطلاعات یا پردازش سیگنال‌ها استفاده می‌گردد. مشابهاً توانایی ادوات الکترونیکی در قطع و وصل کردن جریان الکترون‌ها در مدارات دیجیتال مورد استفاده قرار گرفته که امکان پردازش اطلاعات را مقدور می‌سازد.

الکترونیک جدا از مهندسی برق قدرت و یا الکترومکانیک می‌باشد که عمدتاً با مسائلی چون تولید، انتقال، توزیع، ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی الکتریکی به انواع انرژی‌های دیگر یا بالعکس می‌باشد که با استفاده از سیستم، موتور، ژنراتور، باتری، سوئیچ، رله، ترانس، مقاومت و انواع ادوات غیرفعال دیگر صورت می‌گیرد. این تفکیک از سال ۱۹۰۶ که «تریود» توسط Lee De Forest اختراع گردید مشخص‌تر شده است. با استفاده از تریود سیگنال‌های ضعیف صدا و رادیو را می‌توانست بدون استفاده از یک ادوات مکانیکی تقویت کرد. تا سال ۱۹۰۵ این گرایش تکنولوژی رادیو نامیده می‌شد چرا که استفاده اصلی این گرایش در فرستنده و گیرنده‌های رادیویی بود. امروزه بیشتر ادوات الکترونیکی ادوات نیمه‌هادی هستند که جریان الکترون‌ها را کنترل می‌کنند. بررسی ادوات نیمه‌هادی و تکنولوژی مربوط به آن شاخه‌ای از فیزیک حالت جامد می‌باشد که طراحی و ساخت ادوات الکترونیکی برای حل مسائل عملی را شامل می‌شود.

۴-۱- ادوات و قطعات الکترونیکی

یک قطعه الکترونیکی یک موجودیت فیزیکی در یک سیستم الکترونیکی است که بر الکترون‌ها و میدان‌های آنها آنچنان که کاربرد سیستم الکترونیکی ایجاب می‌کند تأثیر می‌گذارد. این قطعات معمولاً به همدیگر متصل گردیده تا یک سیستم الکترونیکی با کاربری خاص مانند تقویت‌کننده، رادیو و تلویزیون را تشکیل دهند. این اتصال در بیشتر موارد توسط لحیم‌کاری و بروی یک برد مدار چاپی صورت می‌گیرد تا قطعات فوق به یکدیگر وصل گردند. این قطعات ممکن است مانند مقاومت، خازن، دیود و ترانزیستور به طور جداگانه بسته‌بندی شده باشند یا مانند مدارات مجتمع یک بسته شامل تعداد زیادی از این عناصر الکترونیکی باشند. عناصر الکترونیکی معمولاً به دو دسته پسیو (مانند مقاومت خازن سلف) و اکتیو (مانند ترانزیستور، تریستور و تریود) دسته‌بندی می‌گردند.

۴-۲- مدارات الکترونیکی

مدارات الکترونیکی بنا بر نحوه کارکرد آنها نیکی ممکن است مرکب از ترکیبی از این دو قسم باشند و امروزه مرز بین این دو د

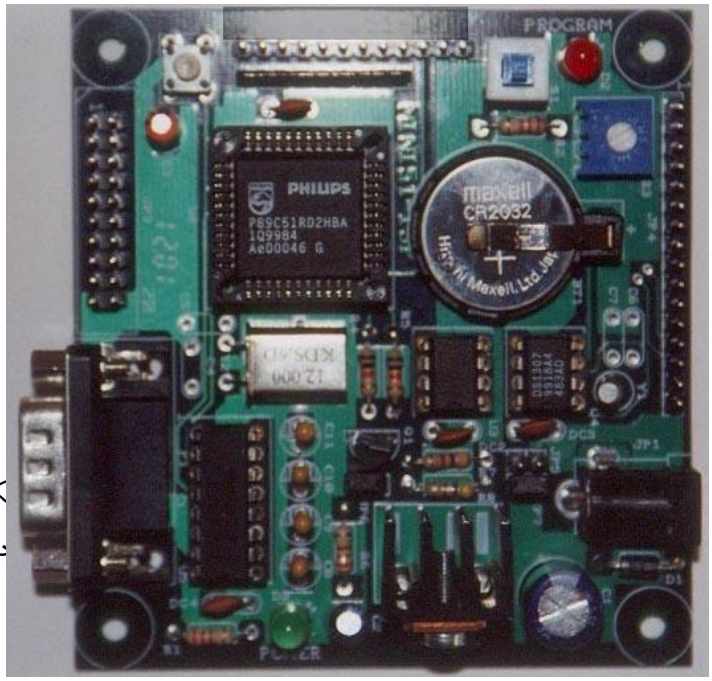
۴-۲-۱ مدارات آنالوگ

بیشتر مدارات آنالوگ الکترونیکی (مانند رادیو) از تعداد محدودی قطعات پایه‌ای مداری تشکیل شده‌اند. مدارات آنالوگ با ولتاژ و جریان‌هایی با مقادیر پیوسته سرو کار دارند. بر خلاف مدارات دیجیتال که با دو سطح صفر و یک کار می‌کنند. انواع مدارهای آنالوگ بی‌شمار است از آنجا که یک مدار آنالوگ می‌تواند از یک ادوات الکترونیکی شروع شده و به سیستم‌هایی با هزاران قطعه الکترونیکی ختم گردد. مدارات آنالوگ بعضاً مدارهای خطی نیز نامیده می‌شوند هر چند که به ز رفتار غیرخطی ادوات بهره می‌جویند. مدارات لامپ خلاء، ترانزیستوری، آپ امپ و نوسان‌ساز .رت می‌توان مدارات الکترونیکی صرفاً آنالوگ را پیدا کرد و امروزه بیشتر سیستم‌های الکترونیکِ ش قابلیت‌های سیستم یا کاهش توان مصرفی آن در مقایسه با مدارات صرفاً آنالوگ گردد.

بعضاً تفکیک میان مدارات آنالوگ و دیجیتال مشکل می‌باشد از آنجا که هر دوی آنها از عناصر خطی و غیرخطی مشابه بهره جسته‌اند. یک مثال مقایسه‌گر است که سطوح پیوسته دو ولتاژ را مقایسه می‌کند اما در خروجی صرفاً دو سطح غیرپیوسته (بزرگتر یا کوچکتر) دارد. مشابهاً یک تقویت‌کننده که ورودی بزرگی به آن اعمال شده باشد می‌تواند به عنوان یک سوئیچ عمل کند و خروجی آن فقط دو مقدار ناپیوسته داشته باشد.

۴-۲-۲ مدارات دیجیتال

مدارات دیجیتال مدارات الکترونیکی هستند که بر مبنای سطوح محدود ولتاژ کار می‌کنند. مدارات دیجیتال رایج‌ترین روش برای پیاده‌سازی جبر بول می‌باشند و پایه و اساس همه کامپیوترهای دیجیتال امروزی می‌باشند. برای بیشتر مهندسین مدارات دیجیتال سیستم‌های دیجیتال و مدارهای منطقی واژه‌هایی مترادف هستند هر چند که به طور تخصصی تفاوت‌هایی بین آنها موجود است. بیشتر مدارات دیجیتال بر اساس دو سطح صفر و یک کار می‌کنند منطق صفر را معمولاً ولتاژ پایین‌تر نشان می‌دهد لذا به آن low نیز می‌گویند و منطق یک با ولتاژ بالاتر نشان داده شد و به همین ترتیب hi نامیده می‌شود. روش‌هایی با تعداد سطوح منطقی بیشتر نیز بررسی شده و مورد استفده قرار گرفته‌اند، اما امروزه آن چنان متداول نمی‌باشند. کامپیوترها، ساعت‌ها، کنترل‌کننده‌های قابل برنامه‌ریزی (در کنترل صنعتی مورداستفاده‌اند) متشکل از مدارات دیجیتال می‌باشند. پردازش سیگنال‌های دیجیتال (DSP) نیز مثال دیگری از کاربردهای این سیستم‌ها می‌باشد.



عناصر تشکیل‌دهنده مدارات دیجیتال کسر و اشمیت تریگر می‌باشد. عناصر مجتمع مورداستفاده میکروپروسسور، دیجیتال و آرایه‌های مدار منطقی قابل برنامه‌ریزی (FPGA) می‌باشند.

۴-۳-تئوری الکترونیک

روش‌های ریاضی در مطالعه الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبحر در الکترونیک نیاز به پیشینه قوی در تئوری مدارهای الکتریکی و ریاضیات مرتبط با آن دارد. آنالیز مداری تحلیل یک شبکه مداری با استفاده از روش‌های معمولاً خطی برای بدست آوردن ولتاژ و جریان‌های نودها و شاخه‌های مختلف یک شبکه الکتریکی می‌باشد. از نرم‌افزار Spice برای حل تحلیلی این مسائل استفاده می‌گردد. همچنین فهم بهتر الکترونیک با تسلط بر مفاهیم پایه‌ای الکترومغناطیس میسر می‌گردد.

از مسائل دیگر مورد بحث در الکترونیک می‌توان از بحث تولید گرما و کنترل دما و نویز نیز نام برد. گرمای تولید شده ناشی از اتلاف انرژی الکتریکی در قطعات الکترونیکی می‌بایست از درون قطعه خارج گردد تا باعث خرابی یا کاهش عمر سیستم نگردد. روش‌های متداولی جهت طراحی رادیاتور حرارتی و فن جهت خنک کردن سیستم‌های الکترونیکی موجود می‌باشد، هر چند که در کامپیوترهای نوین امروزی بعضاً از آب یا سیالات دیگر جهت این امر استفاده می‌گردد. این روش‌ها از قوانین انتقال حرارت فیزیکی پیروی می‌کنند. اما نویز بخش لاینفک مدارات الکترونیکی می‌باشد که به

دلیل پیچیدگی در تعلیمات پایه‌ای از آن صرف‌نظر می‌گردد. نویز یک پدیده ناخواسته است که از حرکت الکترون‌ها ایجاد شده و باعث افت کیفیت سیگنال الکتریکی می‌گردد. این افت کیفیت در حالت حدی می‌تواند باعث از دست دادن اطلاعات گردد. نویز پدیده‌ای جدا از اعوجاج بوده و توسط محیط اطراف یا مدارات الکترونیکی به سیگنال اضافه می‌گردد. نویز می‌تواند منشأ الکترومغناطیسی یا گرمایی داشته باشد. معمولاً کاهش دمای مدار باعث کاهش نویز تولیدی در آن می‌گردد و این دلیل دیگری برای کنترل دمای مدارات الکترونیکی می‌باشد.

۴-۴- آزمایشگاه الکترونیک

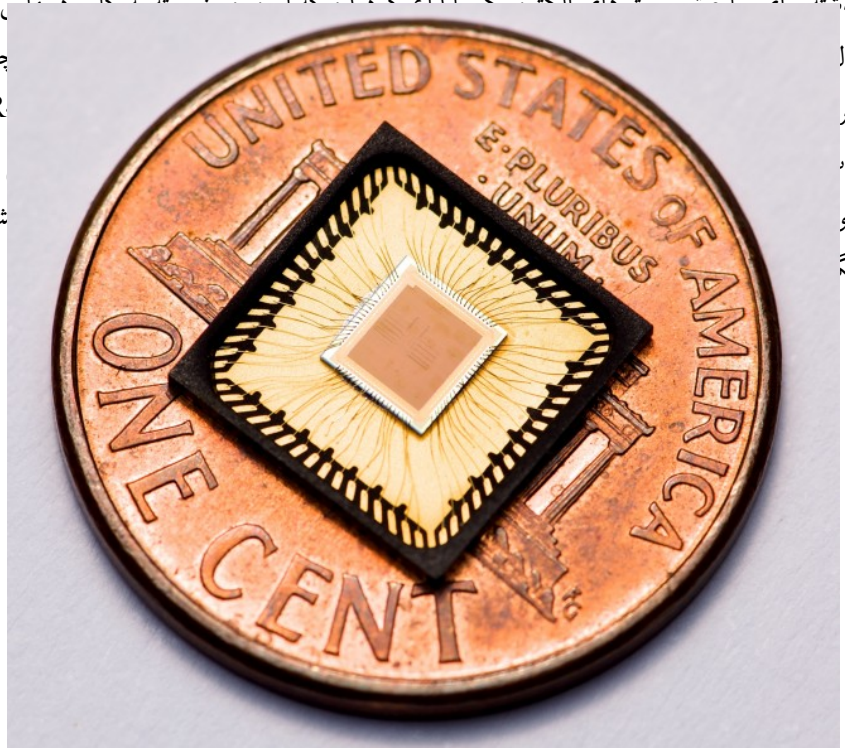
با توجه به ماهیت تجربی الکترونیک، آزمایشگاه بخش مهمی از آموزش الکترونیک می‌باشد. آزمایشگاه جهت اثبات، تأیید و تحکیم قوانین و تئوری‌هایی چون قانون اهم و قوانین کیرشهف می‌باشند. به طور سنتی آزمایشگاه‌های الکترونیک شامل قطعات الکترونیکی و وسائل و تجهیزات تست فیزیکی آنها بوده است. هر چند که امروزه تمایل به سمت ابزارهای کامپیوتری شبیه‌سازی این مدارات همچون Circuit Logix، Multisim و Pspice بیشتر می‌باشد.

- **طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)**

مهندسین الکترونیک امروزه قادر به طراحی سیستم‌های الکترونیکی با استفاده از مدل ادوات الکترونیکی قبل از ساخت آنها توسط نرم‌افزارهای مربوطه می‌باشند. هر چند که طراحی و تست مدارهای الکترونیکی توسط نرم‌افزارهای امروزی کاملاً قابل انجام می‌باشد، اما در اکثر موارد نیاز است که پیاده‌سازی واقعی صورت گیرد تا کلیه مسائل و مشکلات واقعی نیز مشهود گردند. امروزه نرم‌افزارهای بسیاری جهت تحلیل مدارهای الکترونیکی آنالوگ و دیجیتال موجود می‌باشند و مهندسین الکترونیک قسمت اعظم طراحی خود را در این محیط‌ها انجام می‌دهند. بسته به پیچیدگی اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم الکترونیکی نهایی، نرم‌افزارهای متفاوت جهت طراحی می‌بایست مورد استفاده قرار گیرند.

- **روش‌های ساخت**

روش‌های متعددی در سالیان گذشته [illegible] سیستم در حال طراحی از آن‌ها استفاده می‌گردد. برای مثال [illegible] جوبی متصل می‌گردیدند و سیم‌کشی روی آن صورت می‌گر[illegible]FR ساخته شده و روی آن مسیرهای مسی جهت اتصال قطعا[illegible] قرار می‌گیرند که هم جای کمتری می‌گیرد و هم در اکثر مو[illegible]ش از ۱۰ میلیون ترانزیستور در فضایی کوچکتر از یک بند انگ[illegible]



مراجع

۵- آشنایی با گرایش مخابرات

امروزه ما همه وقت و همه جا به نوعی با سیستمهای مخابراتی سر و کار داشته و از آنها استفاده می کنیم. از جمله معمولترین سیستمهای مخابراتی می توان به رادیو، تلویزیون، تلفن (ثابت و همراه) و اینترنت اشاره کرد. به کمک این سیستمها می توانیم با دیگران در مسافتهای بسیار زیاد به شکل (تقریبا) لحظه ای ارتباط برقرار کرده و به مبادله اخبار و اطلاعات بپردازیم. آیا می توانید تصور کنید که دنیای امروز بدون سیستمهای مخابراتی به چه شکلی در خواهد آمد؟!

۵-۱ تاریخچه

اولین سیستم انتقال اطلاعات الکتریکی اطلاعات، تلگراف بود. مورس[۱] اولین دستگاه عملیاتی تلگراف را در سال ۱۸۴۴ برای ارتباط بین دو شهر واشنگتن و بالتیمور راه اندازی کرد. وی برای انتقال اطلاعات از سیستمی مبتنی بر کدهای نقطه و خط استفاده می کرد (جدول ۴-۱). در کد مورس حروف با احتمال استفاده بیشتر دارای طول کمتری هستند. چرا؟ در واقع سیستم مورس اولین سیستم مخابراتی دیجیتال[۲] باینری[۳] (دوتایی) بود. ساخت تلگراف زمینه ساز مخابره اطلاعات از راه دور شد به نحوی که در سال ۱۸۵۸ اولین کابل کشی زیر دریایی جهت ارتباط تلگرافی بین آمریکا و اروپا آغاز و در سال ۱۸۶۶ از آن بهره برداری شد.

A	·—	N	—·		
B	—···	O	———		
C	—·—·	P	·——·		
D	—··	Q	——·—	1	·————
E	·	R	·—·	2	··———
F	··—·	S	···	3	···——
G	——·	T	—	4	····—
H	····	U	··—	5	·····
I	··	V	···—	6	—····
J	·———	W	·——	7	——···
K	—·—	X	—··—	8	———··
L	·—··	Y	—·——	9	————·
M	——	Z	——··	0	—————

(a) Letters (b) Numbers

Period (·)	·—·—·—	Wait sign (AS)	·—···
Comma (,)	——··——	Double dash (break)	—···—
Interrogation (?)	··——··	Error sign	·····
Quotation Mark (")	·—··—·	Fraction bar (/)	—··—·
Colon (:)	———···	End of message (AR)	·—·—·
Semicolon (;)	—·—·—·	End of transmission (SK)	···—·—
Parenthesis ( )	—·——·—		

(c) Punctuation and Special Characters

جدول ۴-۱ کد مورس [۱]

مخابرات آنالوگ[۴] با ابداع اولین تلفن قابل استفاده، توسط گراهام بل[۵] در سال ۱۸۷۶ شروع می شود. نخستین سیستمهای تلفنی در فواصل کوتاه قابل استفاده بودند، اما به تدریج و با پیشرفت فناوری در سال ۱۹۱۵ اولین خط تلفن بین قاره ای نیز عملیاتی شد. دو جنگ جهانی باعث بروز وقفه در گسترش سیستمهای تلفنی شد، اما پس از آن و در سال ۱۹۵۳ اولین خط تلفن بین دو قاره اروپا و

---

۱ Samuel Morse
۲ Digital
۳ Binary
۴ Analog
۵ Alexander Graham Bell

آمریکا راه اندازی شد. امروزه سیستمهای تلفن ثابت با جایگزینی فیبر نوری به جای کابل مسی و نیز استفاده از سوئیچهای الکترونیک قابلیتهای خود را تا حد بالایی ارتقاء داده اند.

استفاده از تلگراف و تلفن بکمک سیم انجام می شد. به علت وابستگی این سیستمها به سیم، در به کار گیری آنها محدودیت وجود داشت و به همین دلیل انتقال اطلاعات بدون سیم مطلوب بود. پایه مخابرات بی سیم بر مبنای نتایج تحقیقات ارستد، فارادی، گاوس، ماکسول و هرتز قرار گرفته است. ارستد[۱] در سال ۱۸۲۰ نشان داد که جریان الکتریکی می تواند تولید میدان مغناطیسی نماید. فارادی[۲] در سال ۱۸۳۱ نشان داد که با حرکت میدان مغناطیسی می توان جریان الکتریکی القاء کرد. ماکسول[۳] در سال ۱۸۶۴ امکان انتشار امواج الکترومغناطیسی را پیش بینی کرده و به صورت یک تئوری مدون ارائه کرد. و در نهایت هرتز[۴] در سال ۱۸۸۷ صحت پیش بینی ماکسول را توسط آزمایشی نشان داد و این سر آغازی بود بر عصر مخابرات بی سیم. پوپف[۵] در سال ۱۸۹۶ یک تلگراف بی سیم ساخت و توانست اطلاعات را بدون سیم به فاصله ۶۰ متری منتقل نماید. در همان سال مارکونی[۶] توانست به ارسال اطلاعات تا فاصله ۲۴۰۰ متری دست یابد. وی در سال ۱۹۰۱ توانست سیگنال رادیو را در فاصله ای بیش از ۲۷۰۰ کیلومتربه شکل بی سیم انتقال دهد. در سال ۱۹۰۱ براون[۷] یکسو ساز نیمه هادی و در سال ۱۹۰۴ فلمینگ[۸] اولین لامپ رادیو رادیو (دیود خلاء) را ابداع می کنند. در سال ۱۹۰۶ لامپ تقویت کننده (تریود[۹]) توسط دی فارست[۱۰] و بالاخره در سال ۱۹۱۷ روش سوپر هترودین[۱۱] توسط آرمسترانگ[۱۲] اختراع می شود. پس از این فناوری ها، اجزای سیستم های مخابراتی کامل می شوند. به طوری که مخابرات بی سیم مدرن امروزی نیز بر همین اصول بنا شده اند.

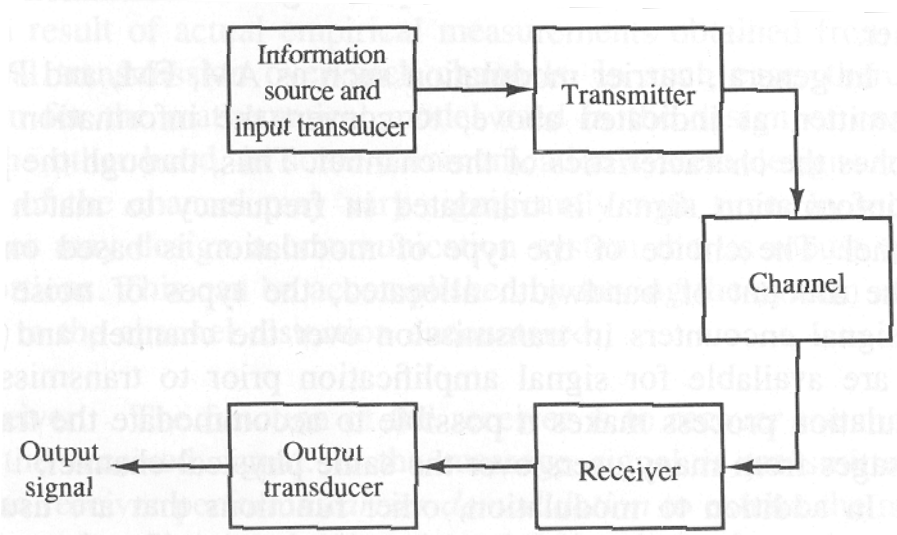
توسعه فناوری در ۵۰ ساله اخیر باعث پیشرفت روزافزون در سیستمهای مخابراتی شده است. ابداع ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ توسط براتین[۱۳]، باردین[۱۴] و شاکلی[۱۵]؛ معرفی مدارهای مجتمع توسط کیلبی[۱۶] و نویس[۱۷] و به کارگیری لیزر توسط تاونز[۱۸] و شاولو[۱۹] در سال ۱۹۵۸ گامهای بلندی در جهت توسعه تجهیزات مخابراتی سبک، کوچک، با سرعت بالا و توان پایین بوده اند. به عنوان نمونه، به کارگیری این تجهیزات امکان مخابره ماهواره ای سیگنالهای تلویزیونی بین قاره ای را از سال ۱۹۶۲ فراهم کرده است.

۲-۵ ساختار یک سیستم مخابراتی

یک سیستم مخابراتی برای ارسال اطلاعات از منبع پیام به یک یا چند مقصد طراحی می شود (شکل ۴-۱). پیام تولید شده توسط منبع می تواند به شکل صدا[۲۰] (صحبت انسان پشت تلفن، یک قطعه موسیقی و ...)، تصویر[۲۱] (تصاویر یک فیلم سینمایی، عکسی

---

۱ Oersted
۲ Michael Faraday
۳ James Clerk Maxwell
۴ Heinrich Hertz
۵ Alexander Popov
۶ Guglielmo Marconi
۷ Helmut Braun
۸ John Fleming
۹ Triode
۱۰ Lee De Forest
۱۱ Super Heterodyne
۱۲ Howard Armstrong
۱۳ Walter Brattain
۱۴ John Bardeen
۱۵ William Shockley
۱۶ Jack Kilby
۱۷ Robert Noyce
۱۸ Townes
۱۹ Schawlow
۲۰ Voice
۲۱ Image

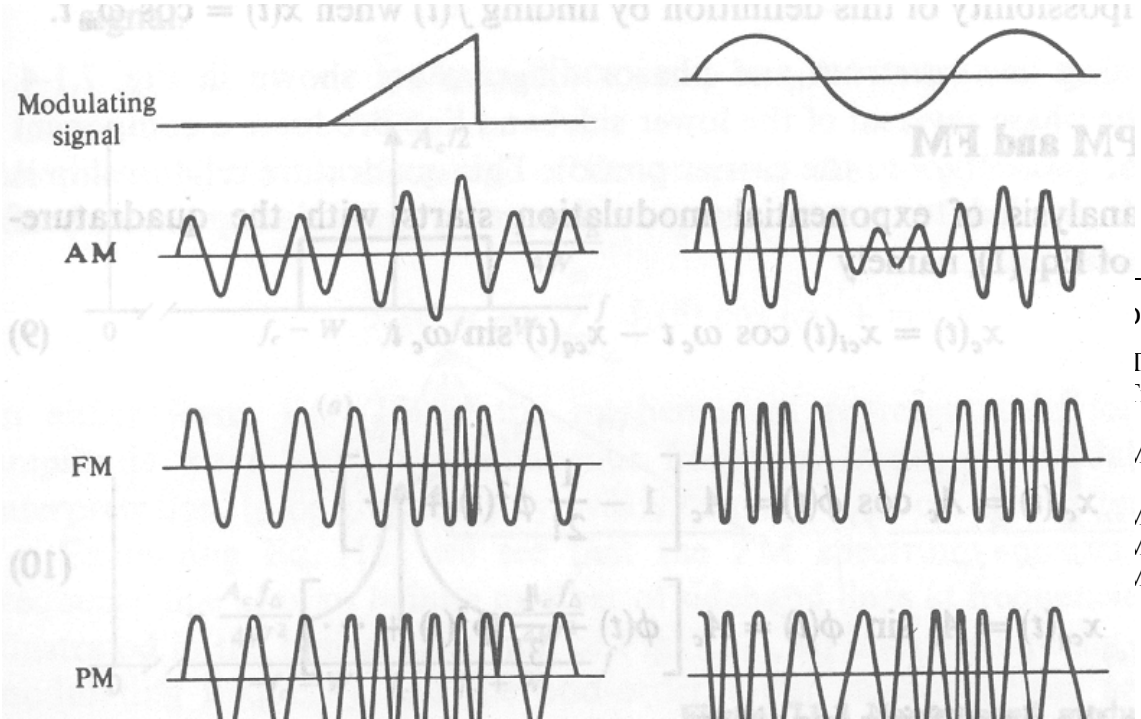


برای فکس و ...) و یا متن[۱] (ایمیل، داده های معاملات یک شرکت و ...) باشد. این پیام توسط مبدل[۲] به صورت یک سیگنال الکتریکی مناسب برای ارسال در می آید. به عنوان مثال میکروفون یک مبدل صدا به سیگنال الکتریکی و دوربین دیجیتال هم یک مبدل تصویر به سیگنال الکتریکی است. در گیرنده هم مبدلی دیگر وظیفه تبدیل سیگنال الکتریکی دریافتی به فرم مناسب اولیه را دارد. قلب یک سیستم مخابراتی شامل ۳ بخش بنیادین فرستنده[۳]، کانال و گیرنده[۴] می باشد.

شکل ۴-۱ ساختار یک سیستم مخابراتی [۱]

۵-۲-۱ فرستنده: وظیفه فرستنده تبدیل سیگنال الکتریکی به فرمی است که برای انتقال روی کانال مناسب باشد. به عنوان مثال در رادیو و تلویزیون هر یک از ایستگاه ها می بایست روی باند فرکانسی مشخصی مخابره شوند و بنابراین فرستنده می بایست سیگنال خود را به نحو مناسبی در باند تخصیص یافته به آن ایستگاه تبدیل کند. بدین ترتیب از بروز تداخل اجتناب می شود.

معمولا فرستنده های مخابراتی عملیات خود را به کمک فرایندی به نام مدولاسیون[۵] انجام می دهند. در مدولاسیون از سیگنال پیام پیام جهت تغییر در دامنه، فرکانس و یا فاز یک حامل[۶] سینوسی استفاده می کنند (شکل ۴-۲). به عنوان مثال در مدولاسیونهای **AM**[۷]، **FM**[۸] و **PM**[۹] سیگنال پیام به ترتیب باعث تغییر در دامنه، فرکانس و فاز حامل می گردد. انتخاب نوع مدولاسیون مورد استفاده به پهنای باند در اختیار، نوع نویز[۱۰] و تداخلی که سیگنال در کانال با آن مواجه خواهد شد، تجهیزات در دسترس در فرستنده/گیرنده و ... دارد. علاوه بر مدولاسیون عملیات دیگری شامل فیلتر کردن و تقویت سیگنالها و انتشار توسط آنتن (در سیستمهای بی سیم) نیز در فرستنده انجام می شود.



[۱] Data یا Text
[۲] Transducer
[۳] Transmitter
[۴] Receiver
[۵] Modulation
[۶] Carrier
[۷] Modulation
[۸] Modulation
[۹] Modulation
[۱۰] Noise

شکل ۴-۲ نمونه ای از سیگنالهای مدوله شده **AM**، **FM** و **PM** [۲]

۵-۲-۲ کانال: کانال مخابراتی محیط فیزیکی است که برای انتقال سیگنال فرستنده به گیرنده مورد استفاده قرار می گیرد. در مخابرت بی سیم کانال معمولا فضای آزاد[۱] را شامل می شود. اما سیستمهای دیگر از انواع متفاوتی از محیطهای فیزیکی شامل سیم سیم مسی، کابل کواکسیال[۲]، فیبر نوری، موجبر[۳] و ... استفاده می کنند. اما کانال از هر نوعی که باشد همواره سیگنال فرستنده را دچار تغییراتی ناخواسته و عموما نامطلوب کرده و به گیرنده تحویل می دهد. از جمله این خرابی ها می توان به تضعیف سیگنال، افزودن نویز (حرارتی، اتمسفری و ...)، تداخل از سایر منابع مخابراتی، اثرات چند مسیری و ... اشاره کرد. یکی از اصلی ترین وظایف یک طراح سیستم مخابراتی آنست که در طرح خود راهکارهایی مناسب جهت مقابله با این اثرات در نظر بگیرد.

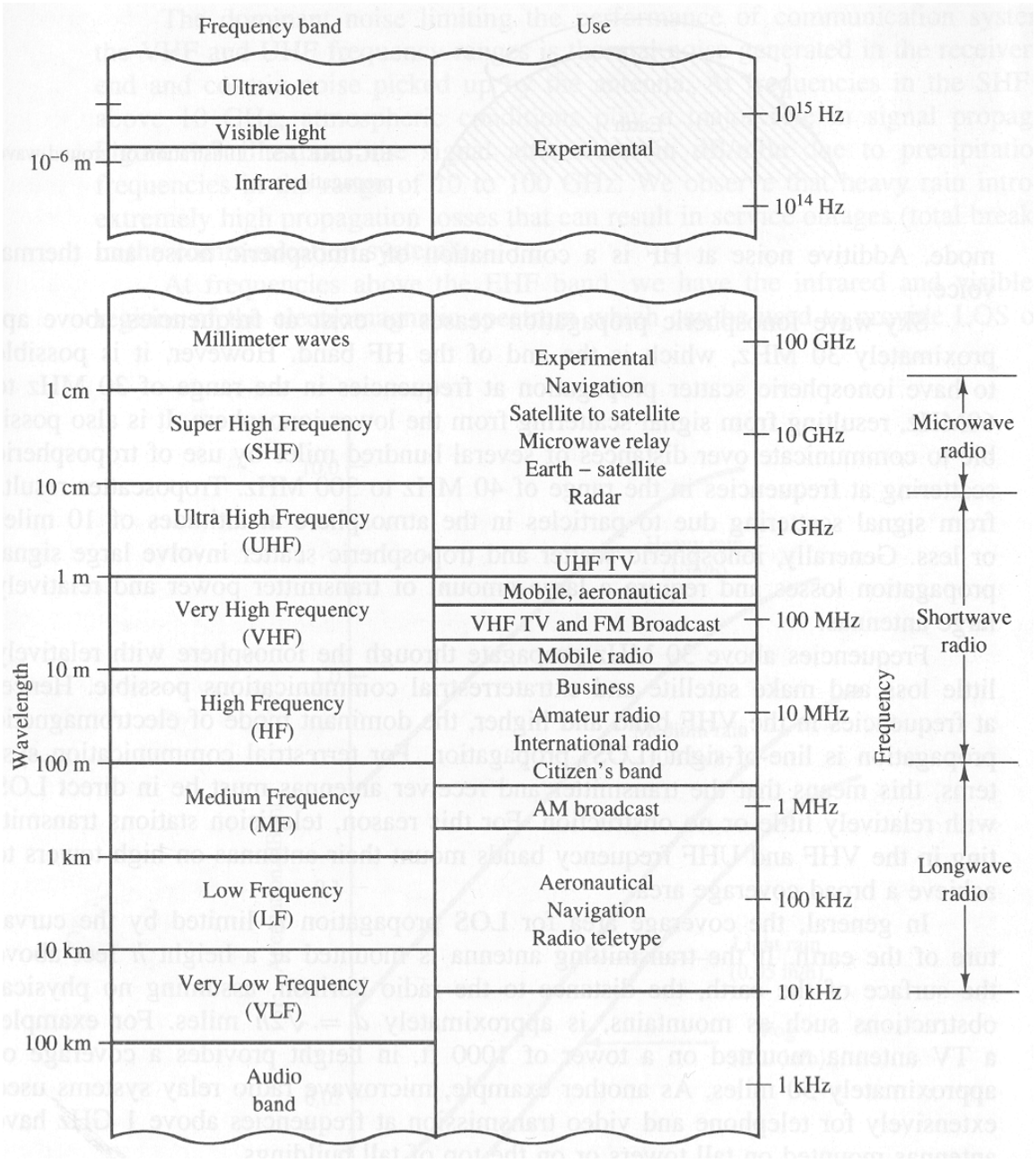
سیم مسی و کابل کواکسیال از جمله پرکاربردترین کانالهای سیمی محسوب می شوند که در انتقال صدا و تصویر در تلفن و تلویزیون به وفور مورد استفاده قرار می گیرند. پهنای باند مفیدی که یک زوج سیم مسی در اختیار قرار می دهد در حدود چند صد کیلوهرتز و در کابل کواکسیال در حدود چند مگاهرتز است. از آنجا که هر چه پهنای باند یک کانال مخابراتی بیشتر باشد امکان انتقال حجم بیشتری از پیامها در مدت زمان معینی از آن بیشتر است، کابل کواکسیال می تواند داده های افزونتری را نسبت به سیم مسی از خود عبور دهد. فیبر نوری پا را از این هم فراتر گذاشته و به راحتی پهنای باندی در حدود چند صد گیگاهرتز فراهم می کند. همین ویژگی فیبر نوری در کنار تضعیف کم سیگنال در آن باعث توجه روز افزون به آن و جایگزینی آن در سیستمهای قدیمی به جای سیمهای مسی یا کابل کواکسیال شده است.

در سیستمهای بی سیم که از فضای آزاد به عنوان کانال استفاده می گردد، طیف الکترومغناطیسی[۴] دارای باندهای فرکانسی مجزایی است که هر کدام دارای ویژگی، نام و کاربرد خاصی هستند (شکل ۴-۳). همانگونه که در شکل ۴-۳ مشخص است در هریک از این باندهای فرکانسی تنها کاربرهای مشخصی حق فعالیت دارند و بدین وسیله از ایجاد تداخل بین سیگنال باندهای مختلف جلوگیری می شود. علاوه بر نویز، تضعیف و اثرات چند مسیری در کانالهای بی سیم بسته به باند فرکانسی ممکن است با پدیده های مخرب دیگری هم مواجه باشیم. به عنوان نمونه می بایست در باند **VLF**[۵] رعد و برق و در باند **MF**[۶] پدیده تضعیف

---

۱ Free Space
۲ Coaxial Cable
۳ Waveguide
۴ Electromagnetic Spectrum
۵ Very Low Frequency
۶ Medium Frequency

شدید سیگنالها در طول روز در مدلسازی کانال در نظر گرفته شوند. آیا می توانید باند فرکانسی و طول موج سیگنالهای رادیو **AM**، تلویزیون **UHF**[1] و تلفن همراه خود را در این طیف الکترومغناطیسی بیابید؟



شکل ۴-۳ طیف الکترومغناطیسی [۲]

۳-۲-۵ گیرنده: وظیفه گیرنده بازیابی پیام ارسالی از سیگنال دریافتی است. به عنوان نمونه در گیرنده از عکس عملیات مدولاسیون فرستنده جهت بازیابی پیام استفاده می شود که به این فرایند دمدولاسیون[2] گویند. بدیهی است که با توجه به ایجاد تغییرات ناخواسته روی سیگنال ارسالی در کانال، پیام دمدوله شده دقیقا مشابه پیام ارسالی نیست. میزان تشابه این دو پیام معیاری از کیفیت سیستم مخابراتی به کار رفته خواهد بود. مشابه فرستده، در گیرنده نیز علاوه بر دمدولاسیون عملیاتی مانند دریافت توسط آنتن (در سیستمهای بی سیم)، فیلتر کردن و حذف نویز نیز انجام می گیرد.

---

[1] Ultra High Frequency
[2] Demodulation

مراجع

[1] Communication Systems Engineering, John G. Proakis and Masoud Salehi, 2nd Edition, 2002, Prentice Hall.
[2] Communication Systems, A. Bruce Carlson, 3rd Edition, 1986, McGraw-Hill.

۶- آشنایی با مهندسی پزشکی

مهندسی و پزشکی از زمانی با یکدیگر پیوند خوردند که ابزار تکنولوژیکی در اختیار طبیب قرار گرفت. امروزه ارتباط بین این دو پدیده بقدری مستحکم گردیده که انجام حرفه پزشکی بدون ابزار مذکور بسیار دشوار و گاه غیر ممکن است. نکته‌ای که در این میان نبایستی از ذهن دور شود. نقش اصلی است که پزشک ایفا می‌کند. تکنولوژی تنها هنگامی کمال ارزندگی خود را نشان می‌دهد که توسط خبره به کار گرفته شود. [۱]

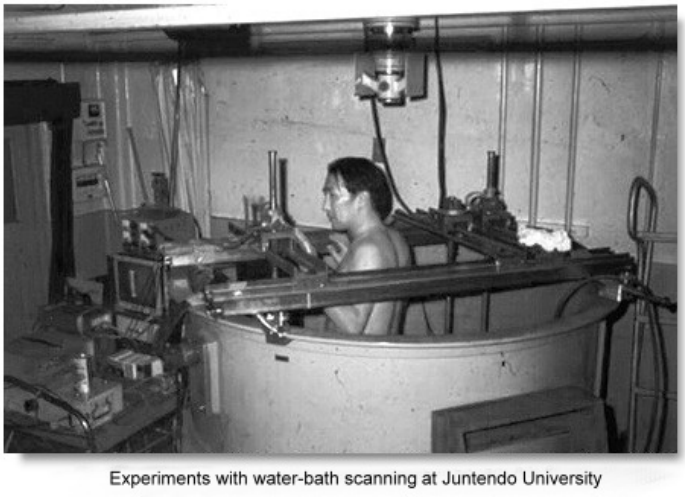
۶-۱ تاریخچه

می‌توان گفت که تا پیدایش مهندسی برق، مهندسی پزشکی کما بیش در حالت ابتدایی خود به سر برده است. حتی اولین سیستمهای اندازه گیری علائم بیوالکتریک چنانچه با استانداردهای امروزی بررسی شود بسیار اولیه به نظر می‌رسند. مثال بارز آن روش ثبت علائم الکتروکاردیوگرام در اوایل قرن ۱۸ میلادی می‌باشد (شکل ۳-۱).

شکل ۳-۱ *روش تاریخی* برقرار اتصال الکتریکی برای ثبت ECG [۲]

حتی سالها بعد نیز بکارگیری ادوات اندازه گیری یا درمان با مشکلات ابعاد بزرگ مواجه بود. در شکل ۳-۲ یک تصویر بردار اولیه ماورا صوتی مربوط به دهه ۵۰ میلادی که در کشور ژاپن استفاده می‌شده است نمایش داده شده است. این امواج برای انتشار نیاز به یک محیط با چگالی بالا دارند لذا تضعیف بسیار بالایی را در هوا متحمل خواهند شد. در نتیجه محققین ناگزیر از محیط کوپلاژی مانند آب یا ژل مخصوص استفاده می‌نمایند.

نکته جالب توجه این است که تحول تکنولوژی الکترونیک بقدری سریع است که تجهیزات پزشکی از نظر ابعاد و دقت پیشرفتهای چشمگیری پیدا نمود به صورتی که تنها ۳۰ سال پس از آزمایشات ابتدایی با ماورا صوت اولین تصاویر جنین به صورت ۳ بعدی در اختیار پزشک قرار گرفت (شکل ۳-۳). امروز تکنولوژی تصویر برداری ۳ بعدی ماوراء صوتی به صورتی تجاری کاملاً مهیا و حتی بعد چهارمی نیز (زمان) به آن اضافه گردیده(4D). پزشکان امروز می‌توانند به صورت بلادرنگ تصاویر قلب یا جنین در حال حرکت را مشاهده کنند.



شکل ۳-۲ دستگاه ماوراء صوتی ابتدایی [۳]

شکل ۳-۳ تصویر برداری سه بعدی از جنین [۴]

۶-۲-تعاریف

۶-۲-۱ مهندسی پزشکی

تعاریف متعددی برای مهندسی پزشکی وجود دارد که عمدتاً تفاوتهای جزئی با یکدیگر دارد. این تفاوتها ناشی از زمینه کاری افرادی است که این تعاریف را به رشته نگارش در می‌آورند. ما در اینجا تعریف عامه آن را به صورت ذیل پذیرا هستیم.

مهندسی پزشکی عبارت است از کاربرد اصول و فنون مهندسی در پزشکی که در آن ترکیب مهارتهای طراحی و حل مسئله مهندسی با علوم پزشکی - زیستی این امکان را فراهم می‌آورد که کیفیت تشخیص و درمان و در نتیجه کیفیت زندگی انسانها ارتقاء یابد. [۵]

با توجه به اینکه در این رشته، مهندسی و پزشکی به یکدیگر گره خورده‌اند، طبیعت مهندسی پزشکی چند رشته‌ای بودن آن می‌باشد. [۶]

مهندسی پزشکی می‌تواند باز به بخشهای زیر تقسیم بندی گردد:

الف- بیوالکترونیک (Bioelectronics)

ب- بیومکانیک (Biomechanics)

ج- بیوانفورماتیک (Bioinformatics)

د- بیومواد (Biomaterials)

۶-۲-۲ مهندسی بیولوژیک (بیوتکنولوژی)

تمرکز این رشته بیشتر روی فعالیت ژنها می‌باشد. کاربرد اصلی آن اصلاح نژاد محصولات کشاورزی و ساخت داروهایی است که نه تنها برای بیماری خاص بلکه برای شخص خاص تجویز می گردد.

نکته: مهندسی بیولوژیک رشته نوینی از مهندسی می‌باشد که علم بیولوژی (و به خصوص بیولوژی مولکولی سلول) اساس آن را تشکیل می‌دهد. [۸]

۶-۲-۳ مهندسی بالینی[1]

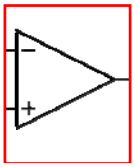
فارغ التحصیلان این رشته مسئولیت اصلی‌شان در مدیریت تجهیزات بیمارستانی می‌باشد. این مدیریت می‌تواند مواردی چون خرید، انبارداری، نگهداری و نظارت بر امور ایمنی به خصوص حین استفاده از ابزار پزشکی را شامل شود. معمولاً تکنسینهای مهندسی پزشکی تحت رهبری مهندسین بالینی امور مربوط به تجهیزات را عهده دار هستند. مهندسین بالینی همکاری نزدیکی را با بخش‌های انفورماتیک و فیزیک پزشکی بیمارستان دارند. [۹]

۶-۳ چند کاربرد شاخص مهندسی پزشکی

۶-۳-۱ تقویت علائم بیولوژیک

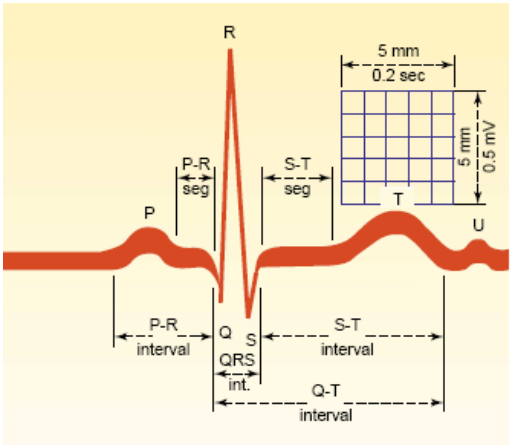
طرح مسئله: ارزیابی عملکرد صحیح اعضا و اندامهای حیاتی مانند قلب و مغز

راه حل: ثبت غیر تهاجمی علائم حیاتی الکتریکی توسط تقویت کننده ابزار دقیق که به عنوان مثال در شکل ۳-۴، یک تقویت کننده عملیاتی برای اینکار نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ تقویت کننده ابزار دقیق [۱۰]

چنین مدارهایی (و مشتقات آن) کاربردهای فراوانی در ثبت علائم الکتریکی از قبیل علائم قلب ECG[2]، مغز EEG[3]، و ماهیچه EMG[4] دارد. در شکل ۳-۵ نمونه‌ای از سیگنال ECGآورده شده است. نمادهایی که به صورت حروف الفباء لاتین (P, Q, R, S, T, U) در این شکل به چشم می‌خورد نقاط کلیدی سیگنال ECG است که مقادیر آن توسط دستگاه ثبت کننده تعیین و به متخصص جهت تعیین میزان سلامت ارائه می گردد.



شکل ۳-۵ نمونه‌ای از سیگنال ECG[۱۱]

[1] Clinical Engineering
[2] Electrocardiogram
[3] Electroencephalogram
[4] Electromyogram

۶-۳-۲ اندام مصنوعی

طرح مسئله: قطع عضو (مانند دست) در اثر سانحه یا بیماری

راه حل: ترکیب مهندسی برق، الکترونیک (آنالوگ و دیجیتال)، الگوریتمهای پردازش سیگنال، مواد، نرم افزار و بالاخره مهندسی سیستم جهت تولید عضو مصنوعی. یکی از نکات مهم مطرح در دست مصنوعی نحوه کنترل آن می‌باشد چرا که مسیرهای فرمان که از مغز صادر می‌گردد تا نقطه ضایعه ادامه پیدا می‌کند لیکن به علت عدم وجود خود عضو می‌بایست ابتدا این علائم توسط الکترودهایی که در جای مناسبی تعبیه شده است ثبت شود. نمونه‌ای از این الکترودها در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است. علیرغم اینکه جنس الکترودهایی که برای اندازه گیری بکار برده می‌شود از نقره با روکش کلرور نقره می‌باشد (Ag-AgCl)، اکثر الکترودهایی که در دستهای مصنوعی به کار برده می‌شود از جنس فولاد ضدزنگ[1] می‌باشد.

شکل ۳-۶ الکترود فلزی [۱۲]

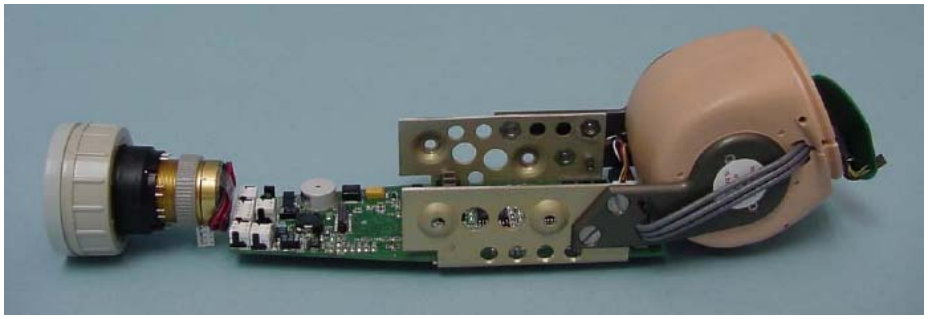
پس از اینکه علائم الکترومایوگرام توسط الکترود به سیمهای رابط منتقل شد، و توسط تقویت کننده ابزار دقیق سامان یافت پردازشگری می‌بایست الگوریتمهای خاصی را روی این علائم اجرا و تعیین نماید که بتوان تشخیص دهد شخص اراده چه حرکتی را نموده است. این پردازنده می‌تواند با پردازنده ای که وظیفه کنترل موتورهای محرک را دارد مشترک باشد که نمونه‌ای از آن در شکل ۳-۷ آمده است

شکل ۳-۷ پردازشگر و کنترل موتورهای محرک [۱۲]

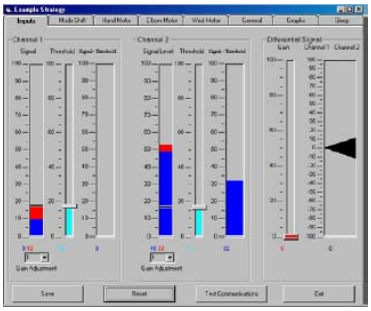
اما بحث عضو مصنوعی به همینجا ختم نمی‌شود چرا که اعضاء مصنوعی نیاز به تطبیق با باقیمانده عضو دارد. این تطبیق هم مکانیکی است هم الکترونیکی - پردازشی.

بخش مکانیکی که شامل روکش پروتز است در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. طراحی این قطعه که معمولاً از جنس پلاستیک مقاوم است به گونه‌ای است که بتواند مدارها و موتورها و منبع تغذیه پروتز را در خود جای دهد. تطبیق پردازشگر توسط نرم افزار انجام می‌گردد (شکل ۳-۹) و هدف از آن تنظیم پارامترهایی است که در الگوریتم پردازشی دخالت می‌کند.

[1] Stainless Steel

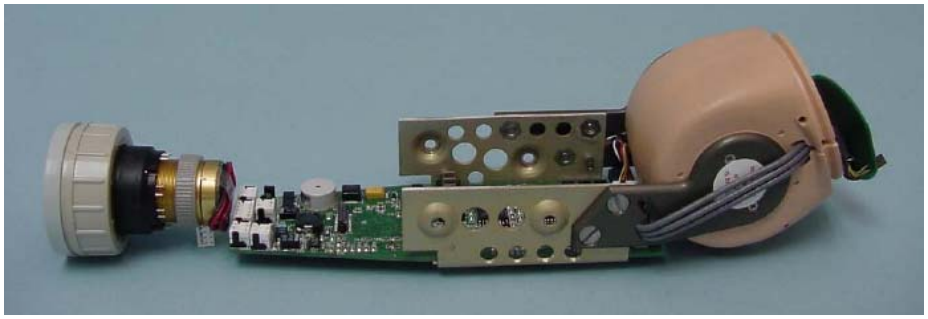


شکل ۳-۸ بخش مکانیکی دست مصنوعی [۱۲]



شکل ۳-۹ واسط اپراتور هنگام تطبیق پردازشگر [۱۲]

نهایتاً بخشهای الکترونیک و مکانیک در یکدیگر ادغام شده عضو مصنوعی (قبل از روکش پلاستیک مقاوم) آماده می‌گردد (شکل ۱۰). در این شرح فشرده شاید لازم باشد به منبع تغذیه این سیستم اشاره شود. معمولاً باطریهای نیکل - کادمیدم ظرفیت بالا (mA.Hr) 1100 استفاده می‌شود. که علیرغم این که از باطریهای یون لیتیوم[1] با قیمت بالاتر استفاده نگردیده است، هزینه یک دست مصنوعی مانند دست بستون[2] حدوداً ۲۹٫۰۰۰/- دلار آمریکا می‌باشد.



شکل ۳-۱۰ ادغام بخشهای الکترونیک و مکانیک در یکدیگر (قبل از روکش و بدون باطری) [۱۲]

۳-۳-۶ نوسانساز قلبی[3]

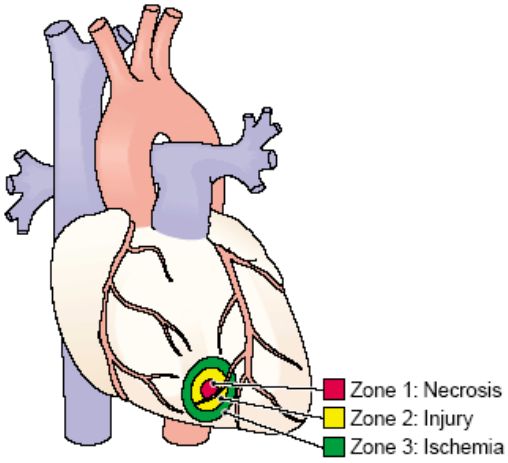
طرح مسئله: فعالیت الکتریکی قلب توسط بیماری دچار اختلال گردیده است.

راه حل: فعالیت مناسب عضله قلب از طریق تحریک الکتریکی مجدداً برقرار گردد.

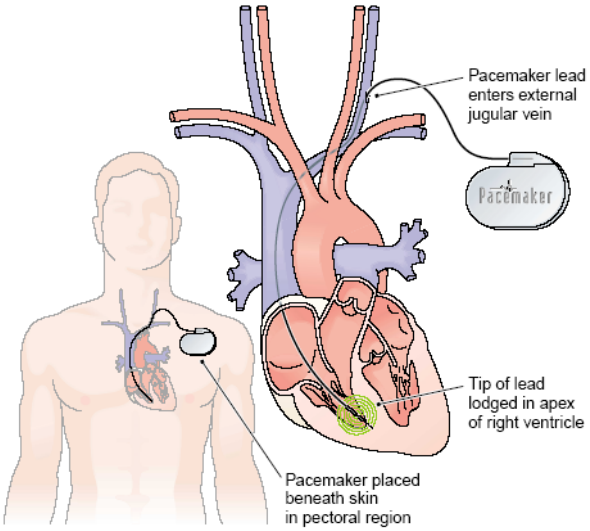
در سال بیش از ۴۰۰ هزار نوسانساز قلبی توسط عمل جراحی کاشته می‌شود [۱۳] چرا که عارضه‌های قلبی یکی از شایع ترین بیماریهای قرن حاضر است. در شکل ۳-۱۱ نحوه ایجاد ضایعه نمایش داده شده است. عدم پمپاژ صحیح خون موجب عدم خون رسانی به عضله قلب شده، که این خود تاثیر منفی به خون دهی قلب به سایر اعضاء بدن منجمله خود قلب داشته بدین ترتیب قلب در یک دایره باطل قرار می‌گیرد. در صورتی که مشکل عدم کارکرد صحیح نوسانساز طبیعی قلب باشد، دستگاه نوسانساز قلبی در ناحیه قفسه سینه کاشته می‌شود که توسط الکترودها علائم تحریک الکتریکی به ناحیه ضایعه دیده اتصال می‌یابد (شکل ۳-

[1] Lithium-Ion
[2] Boston Elbow
[3] Pacemaker

۱۲). لازم به توضیح است که قبل از کاشت دستگاه باید ناحیه دچار ضایعه تشخیص داده شود که این مهم از طریق نوار قلبی (ECG) و تصویربرداری ماوراء صوت قلبی[1] صورت می‌پذیرد.



شکل ۳-۱۱ نحوه ایجاد ضایعه قلبی [۱۴]



شکل ۳-۱۲ کاشت نوسانساز قلبی در ناحیه قفسه سینه: الکترودها علائم تحریک الکتریکی را به عضله قلب میرساند [۱۴]

۶-۳-۴ سیستمهای پشتیبانی حیاتی[2]

طرح مسئله: عضوی (مانند قلب) هیچ نوع فعالیتی ندارد و کاملاً از کار افتاده است.

راه حل: کل عضو جایگزین گردد تا امکان پیوند عضو جدید هویدا شود.

تا کنون روشهای ذکر شده به ثبت علائم (تقویت کننده ابزار دقیق) یا جایگزینی عضو خارجی (دست مصنوعی) یا کمک به تحریک الکتریکی نوسانساز قلبی می‌پرداخته‌اند. در این قسمت با مشکل اساسی تری مواجه هستیم. عضوی (مانند قلب) هر لحظه امکان دارد از کار بیفتد (و معمولاً چندین ایست قلبی اتفاق افتاده است) و به همین لحاظ ۲۴ ساعته می‌بایست تحت مراقبه ویژه ICU[3] باشد.

یکی از نمونه‌های دستگاههای پشتیبانی حیاتی دستگاه قلب مصنوعی است (شکل ۳-۱۳) که البته در بیرون از بدن قرار گرفته بیمار را تا پیدا شدن قلب جایگزین که امکان پیوند داشته باشد زنده نگه می‌دارد. دستگاه قلب مصنوعی یکی از شاهکارهای مهندسی است که در طراحی و ساخت آن رشته‌های متنوعی مانند مهندسی برق (موتورها و قسمت کنترلی)، مکانیک (اتصالات و محاسبه

[1] Echocardiogram
[2] Life Support Systems
[3] Intensive Care Unit

جریان خون)، مواد (روکشهای سازگار با بدن و به خصوص خون) دست بدست هم داده تلاش در ارائه خدماتی شبیه (اما هنوز بسیار بعید) به یکی از شاهکارهای خلقت (قلب انسان) است.

شکل ۳-۱۳ قلب مصنوعی [۱۵]

۶-۴ قوانین حاکم بر تجهیزات پزشکی [۱۶]

در آمریکا و خیلی از کشورهای دیگر جهان، تجهیزات پزشکی به صورت زیر طبقه بندی می گردند:

کلاس یک: دستگاهها و وسایلی هستند که حداقل خطر را برای استفاده کننده دارد. این دستگاهها معمولاً از طراحی ساده‌ای برخوردار می‌باشد و مثال آن چوبهای بازبینی حلق، روکشهای تحتانی بیمارستانی، باندها، دستکشها، و برخی از وسایل جراحی است.

کلاس دو: در این دسته کنترلهای اضافه‌ای بر دستگاههای تحت پوشش اعمال می گردد که می‌تواند شامل بر چسبهای مخصوص، کنترل استانداردهای ویژه و کنترل کیفیت هنگام استفاده باشد. مثالهایی از این دستگاهها که عمدتاً غیر تهاجمی هستند دستگاهها تصویر برداری اشعه X، صندلی‌های موتوردار، پمپهای تزریق خودکار دارو می‌باشد.

کلاس سه: این دستگاهها قبل از ارائه به بازار می‌بایست تاییدیه‌ای را کسب کنند، و یک گروه علمی مستقل (معمولا دانشگاهی) کیفیت عملکرد آن را تایید کنند. مثالهای این کلاس دستگاههای نوسانساز قلبی[1]، تحریک کننده‌های مغزی، ایمپلنت‌ها[2] می باشد.

مراجع

[۱] پیام دبیر هفتمین کنفرانس مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی شریف -۱۳۷۳

[2] http://www.engr.iupui.edu/bme/faq.shtml

[3] http://www.ob-ultrasound.net/japan_water-bath.html

[4] http://www.ob-ultrasound.net/japan_ultrasonics.html

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Biomedical_engineering

[6] http://web.mit.edu/bmes/www/academics.html

[7] http://web.mit.edu/bmes/www/academics.html

[8] http://web.mit.edu/bmes/www/academics.html

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Biomedical_engineering

[10] http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Opampinstrumentation.svg

[11] *Medical Terminology: An Illustrated Guide*, 4th Edition (eBook CDROM)

[12] http://www.liberatingtech.com/products

[1] Pacemaker
[2] Implants

[13] http://www.engr.iupui.edu/bme/faq.shtml
[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Biomedical_engineering
[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Dn966-1_200.jpg
[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Biomedical_engineering

برخی مراجع مفید:

[17] J.G. Webster, Ed., *Medical Instrumentation, Application and Design*, John Wiley & Sons, 1998.
[18] J. Carr, *Introduction to Biomedical Equipment Technology*, Prentice Hall International, 1998.

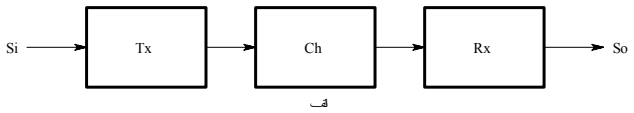
۷- ارتباط گرایشهای مهندسی برق با یکدیگر در یک سیستم پیچیده

فرض کنید می خواهیم مطالعاتی در باره سطح مریخ انجام دهیم. برای این منظور باید یک روبات مریخ پیما را در سطح این سیاره پیاده کنیم. پس از فرود این روبات بر روی مریخ، طبق دستورالعمل های از پیش تعیین شده، شروع به حرکت، نمونه برداری از خاک مریخ، تجزیه و تحلیل آن و ارسال اطلاعات به زمین میکند. این روبات باید قادر باشد رأساً، با توجه به شرایط زمانی و مکانی، در کوتاه مدت تصمیماتی را اتخاذ نموده، عملیاتی را انجام دهد. یا این که فرامینی را که از اتاق فرمان در زمین دریافت میکند، اجرا نماید (شکل ۱-۱).

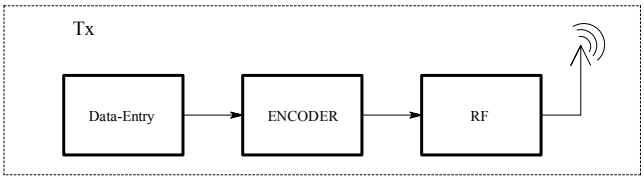
شکل ۱-۱ مریخ پیما [1]

طبیعتاً انجام این پروژه یک کار بسیار عظیمی است و برای اجرای آن نیاز به همکاری تیم هایی متشکل از دانشمندان، مهندسین و تکنسین های مکانیک، هوا فضا، برق، مواد،... دارد. هدف ما در این درس آشنایی مقدماتی با مطالبی است که مربوط به تیم کاری

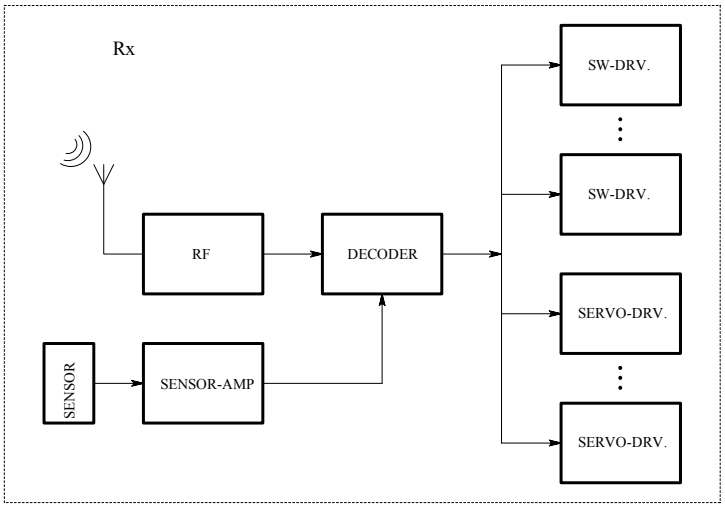
برق می شود. مسلماً تمام مهندسین برق قرار نیست روبات مریخ نورد طراحی کرده، بسازند! در زندگی روزمره با وسایل گوناگونی مواجه می شوید که توسط مهندسین برق طراحی و ساخته شده اند. نحوه عملکرد این وسایل، مستقیماً یا غیر مستقیم تشابهاتی با نحوه کار کرد سیستم های به کار رفته در ساخت مریخ نورد دارند. طبیعی است که از مریخ نورد – با کمی تغییرات – می توان به عنوان ماه نورد، زهره نورد،... نیز استفاده کرد. همچنین روباتی که در کف اقیانوس ها به کنکاش مشغول است، یا...، حتی یک ماشین کنترل از راه دور که ممکن است شما در کودکی با آن بازی کرده باشید، از لحاظ اصولی مشترکات زیادی با مریخ پیمای مورد بحث دارد. مشابه قسمت هایی از این روبات در وسایل معمولی خانگی امروزی نظیر: پنکه، جارو برقی، ماشین رختشویی، مایکرو فر، رادیو، تلویزیون و سایر وسایل صوتی – تصویری، تلفن همراه، کامپیوتر،... وجود دارد. در انتهای این درس امیدواریم بتوانیم طرز کار یک سیستم کنترل از راه دور ساده – مثلاً یک ماشین اسباب بازی – را تجزیه و تحلیل نماییم.



الف



ب



پ

شکل ۱–۲ نمونه ای از بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل از راه دور

بلوک دیاگرام*[۱] قسمت برقی یک ماشین کنترل از راه دور در شکل ۱–۲ نمایش داده شده است. به طور کلی، یک سیستم کنترل از راه دور – مانند هر سیستم مخابراتی دیگر – از سه قسمت اصلی تشکیل شده است (شکل ۱–۲ الف)؛ فرستنده[۲]، گیرنده[۳] و کانال[۴] ارتباطی. فرامین[۵] به عبارت دیگر سیگنال ها[۶] (Si) به فرستنده (Tx) اعمال می شوند. فرستنده، سیگنال ها را به فرمی تغییر

* در این فصل از اصطلاحات و مفاهیمی استفاده می شود که ممکن است برای همگان مانوس نباشند. اکثر این مفاهیم در فصل ۲ و بقیه در جاهای مناسب تعریف خواهند شد.

۱ نمودار قالبی، Block Diagram

۲ Sender, Transmitter (Tx)

۳ Receiver (Rx)

۴ Channel (Ch)

۵ Commands

۶ Signals

می دهد که توسط کانال (*Ch*) قابل انتقال باشند. کانال ممکن است مادی باشد، مانند: سیم، لوله، فیبر نوری، هوا، آب،... یا غیر مادی باشد (خلا). سیگنال ها پس از عبور از کانال توسط گیرنده دریافت و به فرم اولیه باز گردانیده می شوند. شکل ۲-۱ ب مثالی برای یک فرستنده سیستم کنترل از راه دور رادیویی و شکل ۲-۱ پ گیرنده آن را نمایش می دهد. امواج رادیویی برای انتشار و انتقال اطلاعات نیاز به ماده ندارند. بنابراین در این مثال؛ کانال، خلا (فضای بین فرستنده و گیرنده) است. توجه شود که هوا (جوّ) تاثیر قابل توجهی بر روی انتشار امواج رادیویی نمی گذارد و بنابراین ماشین اسباب بازی کنترل از راه دور ما در اتاق منزل به همان خوبی عمل خواهد کرد که فرضاً بر روی سطح کره ماه!

در این مثال می خواهیم ماشینی بسازیم که بتواند رو به جلو و رو به عقب با سرعت کنترل شونده، همچنین به چپ و راست، با زاویه مطلوب، حرکت کند؛ بتوانیم چراغ های آنرا روشن یا خاموش کنیم، بوق بزنیم، راهنمای راست یا چپ را فعال کنیم، ....

برای این منظور بر روی جعبه فرستنده یک چرخ کوچک تعبیه می شود، که نقش فرمان خودرو را ایفا میکند. با چرخانیدن این چرخ به سمت چپ یا راست، ماشین باید در همان سو و زاویه ای که تعیین می شود، تغییر مسیر دهد. یک اهرم کوچک هم بر روی جعبه نصب می شود که همزمان نقش پدال گاز، ترمز و دنده را بعهده دارد. هنگامی که اهرم در وسط قرار دارد، خودرو در حال سکون است. با حرکت اهرم به سمت جلو، اتومبیل رو به جلو حرکت می کند (دنده جلو). هر قدر اهرم بیشتر به جلو حرکت داده شود، سرعت ماشین نیز بیشتر می شود (پدال گاز). به همین ترتیب با حرکت اهرم به سمت عقب، اتومبیل رو به عقب حرکت می کند (دنده عقب). هر قدر اهرم بیشتر به عقب حرکت داده شود، سرعت ماشین نیز بیشتر می شود (پدال گاز). در صورتی که خودرو رو به جلو در حرکت باشد و بطور ناگهانی اهرم را به سمت عقب بکشیم، ماشین متوقف می شود (ترمز)، همچنین در صورتی که خودرو رو به عقب در حرکت باشد و بطور ناگهانی اهرم را به سمت جلو بکشیم، ماشین متوقف می شود. علاوه بر این ها بر روی جعبه ی فرستنده، کلیدها و شستی هایی نصب می شود. مثلاً با فشردن یک شستی بوق ماشین به صدا در می آید، با وصل یا قطع کردن یک کلید چراغ های جلو روشن یا خاموش شوند، ... و اعمالی نظیر اینها.

در شکل ۲-۱ ب جعبه فرستنده به صورت مستطیل خط چین (**Tx**) نمایش داده شده است. فرامین مورد نظر کاربر[۱] از طریق چرخ (فرمان)، اهرم (پدال گاز) و کلیدها به اتومبیل ابلاغ می شود. این قسمت توسط مستطیلی که با **"Data-Entry"** مشخص شده است، نمایش داده می شود. فرامین وارد یک مدار الکترونیکی میشوند. این قسمت که با **"ENCODER"** مشخص شده است، فرامین را طوری تغییر میدهد (کد[۲] میکند) که برای فرستنده قابل انتقال باشند. با جزییات و نحوه کارکرد این قسمت در دروس مربوط به *"الکترونیک"* آشنا می شوید. خروجی این قسمت به بخش رادیویی **"RF"** اعمال می شود. وجود این قسمت لازم است تا اطلاعات بتوانند بدون نیاز به سیم از سمت فرستنده به سوی گیرنده گسیل داده شوند. خروجی این قسمت به آنتن - که به عنوان مبدل سیگنال های الکتریکی به امواج الکترومغناطیسی به کار می رود - اعمال می شود. آنتن این امواج را در فضا منتشر میکند. با جزییات و نحوه کارکرد این قسمت در دروس مربوط به *"مخابرات"* آشنا می شوید.

در شکل ۲-۱ پ جعبه گیرنده به صورت مستطیل خط چین (**Rx**) نمایش داده شده است. امواج رادیویی که به آنتن گیرنده میرسند، مجدداً تبدیل به سیگنال های الکتریکی می شوند. این سیگنال ها که بسیار ضعیف هستند در قسمت **"RF"** گیرنده ابتدا تقویت شده، سپس فرم آنها به گونه ای تغییر می کند که برای سایر قسمت های گیرنده قابل استفاده باشند. خروجی بلوک **"RF"** به بلوک **"DECODER"** اعمال می شود. این قسمت سیگنال ها را طوری رمز گشایی[۳] می کند که فرامین ارسالی از

---

[۱] User

[۲] رمز، رمز کردن، Coding, Code

[۳] Decode

سوی فرستنده، برای ماشین قابل درک و در نهایت اجرا باشند. برای این که ماشین بتواند در بعضی از مواقع مستقلاً تصمیم گیری کند یا حتی در صورت اضطرار از فرمان صادر شده سر پیچی نماید (مثلاً اگر خودرو به لبه میز رسیده و فرمان حرکت رو به جلو صادر شده باشد - برای جلو گیری از سقوط - ماشین باید متوقف شود، یا به عقب بر گردد)، توسط حسگرهایی[۱] (بلوک **"Sensor"**) موقعیت اتومبیل تشخیص داده شده اطلاعات دریافت شده پس از تقویت توسط بلوک **"SENSOR-AMP"** جهت تصمیم گیری به بلوک **"DECODER"** اعمال می شوند. با جزییات و نحوه کارکرد این قسمت در دروس مربوط به *"کنترل و ابزار دقیق"* و *"الکترونیک (آنالوگ و دیجیتال)"* آشنا می شوید. خروجی **"DECODER"** به چند بلوک اعمال می شود. تعداد و نوع این بلوک ها به تنوع فرامینی که ماشین باید اجرا کند بستگی دارد. به کلیه این بلوک ها، ماژول[۲] *"راه انداز[۳]"* گویند. ماشین ما دارای دو نوع راه انداز است؛ *"سروو[۴]"* و *"سویچ[۵]"*. ماژول سروو در مواقعی مورد استفاده قرار می گیرد که بخواهیم مقداری را به صورت پیوسته تغییر دهیم؛ مانند حرکت چرخ ها به سمت چپ و راست با زاویه دلخواه یا به جلو و عقب با سرعت دلخواه. بنابراین برای این ماشین نیاز به دو ماژول راه انداز سروو (بلوک های **"SERVO-DRV"** در شکل ۱-۲ پ) داریم. ماژول سویچ در مواقعی مورد استفاده قرار می گیرد که بخواهیم مقداری را به صورت قطع و وصل تغییر دهیم؛ مانند بوق زدن، روشن کردن چراغ ها، راهنمای سمت راست و راهنمای سمت چپ. لذا برای این ماشین نیاز به چهار ماژول راه انداز سویچ (بلوک های **"SW-DRV"** در شکل ۱-۲ پ) داریم. خروجی هر سروو به موتور مربوطه اعمال می شود. خروجی هر سویچ هم قسمت مربوطه (مثلاً لامپ یا بوق) را تحریک می کند. با جزییات و نحوه کارکرد موتورها در دروس مربوط به *"تبدیل انرژی"* و با جزییات و نحوه کارکرد سروو در دروس مربوط به *"کنترل سیستم ها"* آشنا می شوید. طبیعتاً برای این که مدارهای مربوطه را بتوانید تجزیه و تحلیل نمایید باید دروس مربوط به *"تئوری مدار"* و *"الکترونیک"* را بیاموزید.

۸- دوره کار شناسی مهندسی برق و برخی قوانین آن

برنامه آموزشی کار شناسی مهندسی برق در دانشگاه صنعتی شریف - همانند بسیاری از دانشگاه ها و رشته های دیگر - برای یک دوره چهار ساله تدوین شده است. برای اخذ مدرک کار شناسی باید حداقل ۱۴۰ واحد را با موفقیت گذراند. دروس به چهار گروه تقسیم می شوند: دروس عمومی: ۲۰ واحد، شامل: معارف اسلامی، فارسی، انگلیسی و تربیت بدنی. دروس پایه: ۲۹ واحد، شامل: فیزیک و ریاضیات. دروس اصلی: ۵۵ واحد، شامل دروسی که کلیه دانشجویان برق باید علاوه بر ۴۹ واحد فوق بگذرانند. دروس تخصصی: ۳۶ واحد، دروسی که با توجه به گرایشی که دانشجو انتخاب می کند، تعیین می شوند. از این دروس ۲۴ تا ۲۶ واحد برای کلیه دانشجویان آن گرایش یکسان (اجباری) است. واحد های باقی ماند (۱۰ تا ۱۲) را هر دانشجو با - توجه به ضوابطی - می تواند انتخاب نماید.

---

[۱] Sensor
[۲] مدول، ماجول، Module
[۳] Driver
[۴] Servo
[۵] Switch

ندانستن قانون مجوزی برای نقض آن نیست! گاهی اوقات بعضی از دانشجویان ضوابط آموزشی را نقض می کنند. پس از این که به مشکل بر خوردند، به مسئولین مربوطه مراجعه کرده از آنان استمداد می طلبند. در اکثر موارد ممکن است دیر شده باشد و کسی نتواند مشکل دانشجو را بر طرف سازد. لذا توصیه اکید می شود که هر دانشجو اطلاعات لازم در مورد قوانین و آیین نامه های آموزشی را از مراجع ذیربط بدست آورد. به همین دلیل، برخی از قوانین آموزشی در زیر ذکر می شود.

هیات رییسه دانشکده متشکل است از رییس دانشکده و سه معاون: دانشجویی، آموزشی، پژوهشی و تحصیلات تکمیلی. علاوه بر آن دانشکده برق شش گروه آموزشی دارد که هر کدام از آنها متولی ارایه دروس مربوط به یکی از گرایش های مذکور در بخش ۱-۴ می باشد. مسئول اجرایی هر کدام از این گروه ها مدیر همان گروه است. شما در دوره کار شناسی عملاً فقط با معاونین آموزشی و دانشجویی در ارتباط خواهید بود. در موارد خاص ممکنست نیاز به مراجعه به رییس دانشکده یا مدیر گروه مربوطه نیز داشته باشید. برای هر دانشجوی جدیدالورود، در اواسط ترم اول توسط معاونت آموزشی یکی از اعضای هیات علمی دانشکده به عنوان "*استاد راهنما*" تعیین می شود. کلیه امور آموزشی (و بعضاً غیر آموزشی) شما، نظیر: انتخاب واحد، ترمیم (حذف و اضافه پس از ثبت نام)، حذف تک درس (در اواخر ترم)، حذف ترم، مرخصی تحصیلی، ... باید با اطلاع و نظر استاد راهنما انجام شود. به نکات زیر توجه کنید:

همواره، به خصوص قبل از شروع ترم، هنگام ثبت نام، ترمیم و اواخر ترم، به تابلوی اعلانات مراجعه کرده اطلاعات خود را به روز کنید.

به هنگام اخذ درس رعایت پیشنیازی و هم نیازی الزامی است.

به شماره دروس دقت کنید. ممکنست در مواردی یک درس با اسامی مختلف ذکر شده باشد، در صورتی که این نام ها دارای یک شماره باشند؛ آن اسامی با هم معادل خواهند بود. بر عکس اگر چند درس یک نام ولی چند شماره داشته باشند، آن دروس با هم یکسان نیستند. گاهی نیز ممکنست چند درس با شماره و نام متفاوت باشند ولی با یک دیگر هم ارز باشند. در چنین مواردی باید حتماً با استاد راهنما و (یا) معاون آموزشی مشورت شود. مثال: درس با شماره ۲۵۰۵۱ ممکنست با نام های: اخبار سیستم، سیگنال و سیستم، سیگنال ها و سیستم ها، یا مشابه دیده شود. دروس تئوری مدار ۲۵۰۲۴ و تئوری مدار ۴۰۰۳۶ با هم یکسان نیستند ولی دروس پاسکال به شماره ۴۰۱۵۱ و **C** به شماره ۴۰۱۲۱ با هم معادل هستند. در هر صورت، موقع انتخاب واحد حتماً به شماره درس توجه کنید.

تعداد واحدهای قابل اخذ در هر ترم محدود است. برای مثال طبق ضوابط کنونی در هر ترم (بجز ترم آخر) باید حداقل در ۱۲ واحد ثبت نام کرد. تعداد حداکثر واحدها به معدل دانشجو در ترم قبل بستگی دارد (معدل زیر ۱۲: ۱۴ واحد، بین ۱۲ تا ۱۴: ۱۷ واحد، بین ۱۴ تا ۱۷: ۲۰ واحد و بالای ۱۷: تا ۲۴ واحد). برای ترم آخر - مستقل از معدل ترم قبل - باید در حداقل یک و حداکثر ۲۴ واحد ثبت نام نمود.

طبق قانون، حضور در کلاس درس الزامی است. در صورتی که دانشجویی بیش از شش جلسه (بطور پیوسته یا گسسته) در سر کلاسی حاضر نباشد، چنان که غیبت وی موجه تشخیص داده شود، آن درس حذف و در غیر این صورت نمره آن درس صفر خواهد بود. در هر ترم، دانشجو فقط یک درس را می تواند حذف کند (حذف **W**). زمان حذف تک درس حدوداً یک ماه قبل از پایان ترم است. موعد آن در آغاز هر ترم توسط دانشگاه اعلام می شود. در صورت غیبت در امتحان پایان ترم، نمره آن امتحان صفر خواهد بود. در این صورت معمولاً نمره نهایی درس به حد نصاب قبولی نمی رسد. در صورتی که غیبت به خاطر بیماری باشد، باید قبلاً پزشک بهداری دانشگاه از این امر مطلع شود. در صورت تایید پزشک دانشگاه، دانشجو می تواند این درس (دروس) را حذف پزشکی کند.

در طول تحصیل فقط دو ترم را می توان حذف کرد (مرخصی تحصیلی). این ترم ها جزو سنوات تحصیلی به حساب می آیند. حد اکثر زمان مجاز تحصیل (با احتساب مرخصی تحصیلی) شش سال است. در موارد استثنایی، مثلاً اگر به دلایلی دانشجویی بخواهد درسی و پیشنیازش را در یک ترم اخذ کند، باید از اداره آموزش دانشکده فرم "درخواست دانشجویی" را دریافت، تقاضای خود را با ارایه دلایل و مدارک لازم، ذکر نماید. پس از موافقت استاد راهنما، استاد درس مربوطه و معاونت آموزشی، این درخواست به شورای آموزشی دانشکده ارجاع می شود. در صورت موافقت این شورا با درخواست، دانشجو مجاز به عدم رعایت آن ضابطه خواهد بود.

به منظور آشنایی بیشتر دانشجویان با دوره پیش رو، برخی سایتهای مهم نیز در ادامه معرفی می شوند:

نقشه دانشگاه	**http://www.sharif.ir/fa/about/map.jsp**
دانشکده مهندسی برق	**http://ee.sharif.ir**
قوانین آموزشی دانشکده مهندسی برق	**http://ee.sharif.edu/indexacademic.htm**
سیستم آموزش	**https://edu.sharif.edu/login.jsp?f=off**
فرمها، آیین نامه ها و مقررات	**http://www.sharif.ir/fa/education/rules**
تقویم آموزشی	**http://www.sharif.ir/fa/education/calendar**
دروس اینترنتی	**http://courses.sharif.ir**
کتابخانه مرکزی	**http://sharif.ir/~library**

۹- مفاهیم پایه در مهندسی برق

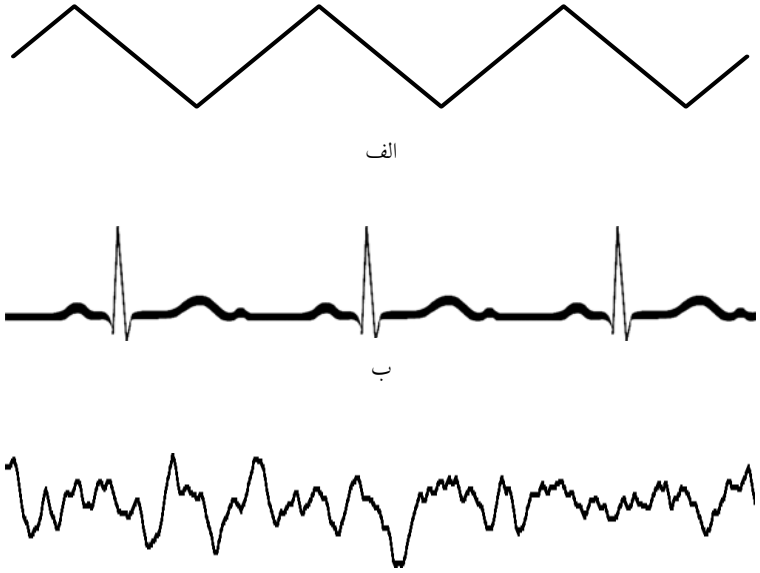
مهندسی برق شاخه ای وسیع و متنوع از مهندسی است که به مطالعه، بررسی و کاربرد آن دسته از پدیده های مختلف فیزیکی می پردازد، که دارای ماهیت الکترومغناطیسی هستند. این رشته جذاب به عنوان یک اشتغال حرفه ای از اواخر قرن نوزدهم میلادی؛ همزمان با تجاری سازی خطوط تلگراف، پا به عرصه وجود نهاد و امروزه شامل زیر رشته های بسیاری است نظیر قدرت، الکترونیک، سیستم های کنترل و مخابرات؛ که هر یک دارای زیر شاخه های بسیار بیشتری بوده و ارتباطات تنگاتنگی با بسیاری از زمینه های دیگر نظیر علوم کامپیوتر، بیوالکتریک، بیوفیزیک، لیزر، فوتونیک، ... دارد. آشنایی اولیه با این رشته از دو طریق ممکن است:

- اول، دیدگاه سیستمی: که فارغ از بسیاری جزییات مربوط به پیاده سازی و مسایل عملیِ مهندسی، صرفاً با تجرید و نگاه از بالا به بررسی و مدل سازی می پردازد و
- دوم، دیدگاه فیزیکی: که مشکلات و محدودیت های عملیِ حین پیاده سازی را مد نظر قرار می دهد.

این دو دیدگاه مختلف که در این درس به اختصار معرفی می گردند، شما را با برخی مفاهیم بنیادی و پایه ای مهندسی برق آشنا خواهد کرد.

- **سیگنال و سیستم**
- سیگنال

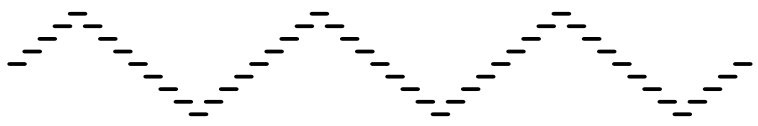
به کمیات فیزیکی متغییر با زمان (و (یا) مکان)، در صورتی که حاوی اطلاعات مفید باشند، سیگنال[۱] گویند. در غیر اینصورت به آن نویز[۲] گفته میشود، سیگنال و نویز هر دو حامل انرژی هستند. سیگنال ها می توانند پریودیک[۳] باشند؛ مانند سیگنال سینوسی یا مربعی، ضربان قلب، ... یا غیرپریودیک باشند؛ مانند سیگنال های صوتی، تصویری، فشار یا دمای محیط و ... علاوه بر آن سیگنالها می توانند پیوسته[۴] یا گسسته[۵] در زمان یا دامنه باشند (سیگنالهای آنالوگ[۶] یا دیجیتال[۷]). شکل ۲-۱ مثال هایی برای سیگنال های پیوسته و شکل ۲-۲ مثال هایی برای سیگنال های گسسته را نمایش می دهد.



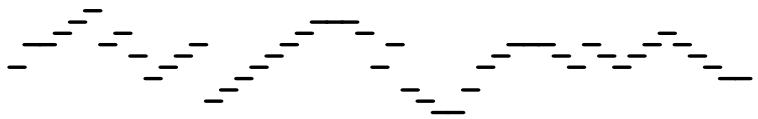
شکل ۲-۱ چند مثال برای سیگنال های پیوسته (محور افقی: زمان، محور عمودی: کمیت فیزیکی، محورها رسم نشده اند)
الف- مثلثی (پریودیک)، ب- نوار قلبی (پریودیک) و پ- صوتی (غیر پریودیک)

---

[۱] Signal, علامت
[۲] Noise, همهمه، اغتشاش، نوفه
[۳] Periodical, متناوب
[۴] Continuous
[۵] Discrete
[۶] Analog, تشابهی
[۷] Digital, رقمی



الف



ب

پ

شکل ۲-۲ چند مثال برای سیگنال های گسسته (محور افقی: زمان، محور عمودی: کمیت فیزیکی، محورها رسم نشده اند)
الف و ب- پیوسته در زمان، گسسته در دامنه (الف- پریودیک، ب- غیر پریودیک)، پ- گسسته در زمان و دامنه (پریودیک)

ساده ترین سیگنال بصورت: $\omega = 2\pi f$, $s(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$ تعریف میشود که در این رابطه A دامنه[۱]، f فرکانس[۲] و φ فاز[۳] سیگنال نام دارد. در این درس عمدتاً با سیگنال های الکتریکی و آنالوگ سر و کار خواهیم داشت. برای بررسی سیگنال سیگنال الکتریکی، توان، ولتاژ، یا جریان آنرا در نظر می گیرند. بنابراین مثلاً: $v(t) = V_P \sin(\omega t + \varphi)$

برای تبدیل سیگنال های غیر الکتریکی به الکتریکی یا بلعکس، مبدل ها[۴] به کار گرفته میشوند. برای مثال یک سیگنال صوتی - که ماهیتاً یک سیگنال مکانیکی است - توسط میکروفن، تبدیل به سیگنال الکتریکی شده، پس از تقویت - توسط تقویت کننده الکتریکی - مجدداً توسط بلندگو، تبدیل به سیگنال صوتی میشود.

- سیستم

هرگاه اجزای یک مجموعه، در ارتباط با یکدیگر، از یک ورودی* مشخص، طبق یک دستورالعمل خاص، یک خروجی معین ایجاد کند؛ به آن مجموعه یک سیستم[۵] گویند. برای مثال دانشگاه را می توان یک سیستم دانست؛ مدرسین، دستیاران آموزشی، تکنسین های آزمایشگاه ها، کارمندان اداری، ... ، کلاس ها، آزمایشگاه ها، وسایل کمک آموزشی، ... اجزای این مجموعه هستند. برنامه و ضوابط آموزشی به مثابه دستورالعمل تلقی می شود. دانش آموزانی که دبیرستان را با موفقیت پشت سر گذاشته و در کنکور سراسری امتیاز مورد نیاز را بدست آورده، یا در المپیادهای علمی موفق به کسب مدال شده اند؛ به عنوان ورودی و فارغ التحصیلان به عنوان خروجی سیستم محسوب می شوند. طبیعتاً هر سیستمی دارای تلفاتی نیز هست. دانشجویانی که قبل از فراغت از تحصیل - به هر علت - از لیست دانشجویان دانشگاه حذف شوند، جزو تلفات سیستم به حساب می آیند.

---

[۱] Amplitude, Magnitude

[۲] بسامد, Frequency

[۳] Phase

[۴] تراگردان, Transducer

* توجه شود که ورودی و خروجی خود نیز یک مجموعه هستند؛ که برای مفهوم تر بودن جمله، از ذکر "مجموعه" بعد از "ورودی و خروجی" خودداری شده است.

[۵] سامانه، System

یک فرستنده رادیویی را نیز می توان یک سیستم دانست، که ورودی آن صوت و خروجی آن امواج الکترومغناطیسی (رادیویی) میباشد. اجزای این مجموعه را میکروفن، تقویت کننده صوتی، نوسان ساز، ... و آنتن تشکیل می دهند. دستورالعمل هم می تواند فرکانس امواج، قدرت فرستندگی، نوع مدولاسیون، ... در نظر گرفته شود*.

تذکر: گاهی اوقات به سیگنال ورودی، *تحریک*[۱] و به سیگنال خروجی، *پاسخ*[۲] اتلاق می شود.

برای بررسی سیستم ها، آنها را - با توجه به مشخصات ذاتیشان - به چند گروه تقسیم می کنند. از جمله:

- خطی یا غیر خطی: سیستمی خطی[۳] است که اصل برهم نهی در آن صادق باشد، یعنی (۱) اگر ورودی در ضریبی ضرب شد، خروجی هم در همان ضریب ضرب شود و (۲) اگر مجموع دو ورودی به سیستم اعمال شد، خروجی نیز حاصل جمع دو خروجی قبلی باشد. در غیر این صورت سیستم را غیر خطی[۴] می نامند.
- آنالوگ یا دیجیتال: سیستم هایی که سیگنال های ورودی، خروجی و درونی آنها آنالوگ باشند، *سیستم های آنالوگ* نامیده می شوند. سیستم هایی که در آنها کلیه این سیگنال ها دیجیتال باشند، جزو *سیستم های دیجیتال* محسوب می شوند. اگر در یک سیستم، هم سیگنال های آنالوگ و هم سیگنال های دیجیتال فرآورده[۵] شوند؛ به آن "*سیستم مختلط*[۶]" گویند. برای مثال در یک مبدل آنالوگ به دیجیتال[۷] ورودی یک سیگنال آنالوگ و خروجی یک سیگنال دیجیتال متناظر با آن خواهد بود. هم چنین در یک مبدل دیجیتال به آنالوگ[۸] ورودی یک سیگنال دیجیتال، و خروجی یک سیگنال آنالوگ متناظر با آن خواهد بود. در سیستم های صوتی امروزی، سیگنالهای ورودی و خروجی سیگنال صوتی - بنابراین آنالوگ - و فرایندی که بر روی آن انجام می شود (مثلاً ضبط یا انتقال آن)، عموماً به صورت دیجیتال (مثلاً در قالب **MP3**) است. سیستم هایی که در این درس بررسی می شوند عمدتاً آنالوگ هستند.
- مستقل یا وابسته به زمان: سیستم هایی که مشخصات (پارامترهای) اجزای آنها - در طول زمان بررسی - ثابت باشد، *سیستم های مستقل از زمان*[۹] و در غیر اینصورت *سیستم های وابسته به زمان*[۱۰] نامیده می شوند. سیستم هایی که در این درس بررسی می شوند مستقل از زمان هستند.
- عِلّی یا غیر عِلّی: سیستم هایی که برای آنها اصل عِلّیّت صادق است، یعنی معلول زاییده علت است، به عبارت دیگر اول سیستم تحریک می شود و سپس سیستم به این تحریک پاسخ می دهد، *سیستم های عِلّی*[۱۱] نامیده می شوند؛ در غیر این صورت *غیر عِلّی*[۱۲] هستند. سیستم های واقعی (طبیعی) همگی عِلّی هستند. سیستم غیر عِلّی فقط به صورت انتزاعی (ریاضی) وجود دارد (زمان منفی).

• کمیات اصلی الکتریکی

---

* ر.ک. به دروس مربوط به مخابرات

۱ Excitation
۲ Response
۳ Linear Systems
۴ Nonlinear Systems
۵ Processed
۶ Mixed-Mode Systems
۷ ADC: Analog to Digital Converter
۸ DAC: Digital to Analog Converter
۹ Time Invariant Systems
۱۰ Time Variant Systems
۱۱ Causal Systems
۱۲ Non-Causal Systems

همانطور که ذکر شد، پایه مهندسی برق بر روی ریاضی و فیزیک بنا شده است. به همین جهت در این بخش میخواهیم برخی از کمیات الکتریکی و مغناطیسی را که در دبیرستان با آنها آشنا شده اید، یاد آوری کنیم.

- انرژی: برای زمانی طولانی کار و توان مفاهیم جدا از هم نبوده و توسط یک کلمه به نام *نیرو* تعریف می شدند. به تدریج با پیشرفت بشر در مطالعه سیستم های مکانیکی مفهوم دیگری به نام *تکانه* شکل گرفت و سرانجام با اختراع موتور بخار و تبدیل گرما به کار مکانیکی بود که *انرژی* به عنوان منبع توان فعال و منبع تولید کار معرفی شد. با پیدا شدن این مفاهیم و پیشرفت تدریجی علم بشر، انواع مختلف انرژی مطرح شده و مفاهیم جدیدتری نظیر انرژی شیمیایی، انرژی الکتریکی، انرژی مغناطیسی و ... به آرامی وارد فرهنگ لغات بشر شد. به طور ساده می توان گفت که: توانایی انجام کار را انرژی نامند. واحد انرژی *ژول*[1] است ($1\,J = 1\,Nm$).

- توان: نرخ زمانی تبدیل انرژی را توان گویند $p = \frac{dw}{dt}$. واحد توان *وات*[2] است ($1W = 1\,J/s$).

- بار الکتریکی: کلمه الکتریک[3] و نیز کلمه الکتریسیته[4]، هر دو در سال ۱۶۰۰میلادی، توسط ویلیام گیلبرت[5]، تعریف تعریف شدند. این کلمات ریشه در لغت یونانی الکترون به معنی عنبر یا کهربا دارند. ریشه استفاده از کلمه کهربا در این حقیقت نهفته است که با مالش قطعاتی از آن، تکه های سبک کاه جذب آن می شوند. این پدیده پس از طی حدود ۲۰۰۰ سال پیدایش روش علمی، مورد مطالعه دقیق قرار گرفت و در نهایت مفهوم بار الکتریکی شکل جدیدی بخود گرفت. ما در اینجا برای ارایه مفهوم جدیدی که از بار الکتریکی استنباط می شود، از سه خاصیت بنیادی آن استفاده می کنیم:

الف: بار الکتریکی در دو نوع که اصطلاحاً مثبت و منفی نامیده می شوند، مشاهده می شود. این نامگذاری بدین دلیل صورت گرفته است که، این دو نوع بار اثر یکدیگر را خنثی می نمایند.

ب: بار پایستار است، یعنی نمی توان آنرا ایجاد یا نابود کرد.

پ: بار کمیتی است کوانتیزه[6] و بنابراین در اندازه های صحیحی از واحد پایه ای که همانا بار پروتون **e+** یا بار الکترون **e–**، باشد مشاهده می گردد.

به طور خلاصه، خاصیت الکتریکی توسط بار الکتریکی (q) توصیف می شود. واحد بار الکتریکی *کولن*[7] است. یک کولن معادل بار ۶,۲۴×۱۰[18] عدد الکترون به عبارت دیگر بار یک الکترون $q \approx 1.6\times10^{-19}C$ است.

- میدان الکتریکی: حال که عامل موثر در ایجاد نیروهای الکتریکی را شناختیم به بررسی مجدد مفهوم میدان و به طور خاص میدان الکتریکی می پردازیم. همانطور که پیشتر نیز گفته شد، هدف نهایی، پیدا کردن پاسخ این سئوال است که نیروهای الکتریکی ایجاد شده توسط بارها، با چه ساز و کاری بر روی یکدیگر، به طور خاص؛ و بر روی مواد به طور عام، اثر می گذارند. شما حتماً با حل مسایل الکترواستاتیک و قانون کولن که در آن نیروهای وارد بر بارهای ثابت محاسبه می شود، آشنا هستید. میدان الکتریکی را می توان به صورت *حداقلی* بر مبنای نیروها تعریف کرد و از این قرار نیروی الکتریکی وارد بر بارآزمون را – همانطور که در دروس فیزیک پایه دیده اید – میدان الکتریکی نامید. در این تعریف *حداقلی*، میدان الکتریکی و محاسبه آن صرفاً نقش *گام میانی* را عهده دارد و در نتیجه به نظر می رسد که مفهومی انتزاعی، جهت محاسبه نیروهای

---

[1] J: Joule
[2] W: Watt
[3] Electric
[4] Electricity
[5] William Gilbert
[6] چندی، Quantize
[7] C: Coulomb

الکتریکی باشد. حال آنکه میدان مفهومی است بسیار واقعی تر از این، به طوری که شما می توانید آنرا به عنوان وجودی فیزیکی[1] تلقی کنید که فضای اطراف بارهای الکتریکی را پر می سازد*. اما چه دلیلی برای اثبات این مدعا در دست است؟ انرژی الکتریکی که در فضای اطراف بار ذخیره شده است! ما بحث بیشتر در این زمینه را به دروس *"الکترومغناطیس"* و *"میدان ها و امواج"* واگذاشته و به ذکر این نکته بسنده می کنیم که در حل مسایل واقعی، محاسبه ی میدانها نه *گام میانی*، که اساسِ خودِ *حل* مسئله است. حالتی را تصور کنید که بارهای ثابت قبلی، شروع به حرکت نموده و با دینامیکی خاص به یکدیگر نیرو وارد نمایند. محاسبه نیروها در چنین حالتی، با استفاده از مفهوم میدان، که با پرکردن فضای اطراف بارها همانا *میانجی*[2] اثر متقابل آنها است، بسیار ساده تر است، تا محاسبه بدون استفاده از مفهوم میدان.

- جریان: نرخ زمانی عبور بار الکتریکی از یک سطح است، $i = \frac{dq}{dt}$. واحد جریان الکتریکی *آمپر*[3] نامیده می شود ($1A = 1C/s$).

- ولتاژ: مفهوم ولتاژ دارای اصالتی همانند مفهوم میدان نیست، با این وجود مفهومی است بسیار مفید؛ به طوری که سروکار شما – به عنوان مهندس برق – بیشتر با ولتاژ الکتریکی خواهد بود، تا با میدان الکتریکی. اما برای اینکه منظور خود از این مفهوم را روشن تر سازیم به ذکر یک مثال می پردازیم، فرض کنید از شما بپرسند که ارتفاع شهر تهران چقدر است، دز این صورت پاسخ شما چه خواهد بود؟ در واقع پاسخ این سئوال بستگی دارد به این که شما ارتفاع شهر تهران را نسبت به کجا می سنجید، سطح دریا، نوک قله دماوند و یا هر نقطه جغرافیایی دیگری که به عنوان مرجع انتخاب شده است. بنابراین اختلاف ارتفاع؛ و نه خود ارتفاع است، که دارای معنایی است مشخص. به طور مشابه، ولتاژ مفهومی است نظیر ارتفاع، بدین معنی که ما همیشه از اختلاف ولتاژ صحبت می کنیم، مگر آنکه نقطه مرجعی به صورت پیش فرض تعریف شده باشد که می تواند مثلاًسطح زمین باشد. اما پرسش بعدی این است که اختلاف ولتاژ مذکور چه چیزی را نشان می دهد؟ برای پاسخ دادن به این سئوال به مثال قبلی خود باز می گردیم. اختلاف ارتفاع از نظر فیزیکی مرتبط است با میدان گرانشی و انرژی پتانسیل گرانشی، به طوری که اشیاء در ارتفاع بالاتر دارای قابلیت – یا همان پتانسیل – به حرکت در آمدن و جنبش بیشتری دارند. به عبارت دیگر وقتی شما سنگی را به بالای سطح شیبدار می رسانید، انرژی صرف شده به صورت انرژی پتانسیل گرانشی ذخیره می شود. به همین ترتیب وقتی که بار الکتریکی از سطح الکتریکی پایین تر به سطح الکتریکی بالاتری جابجا می شود، دارای قابلیت برقراری جریان خواهد بود. دقت کنید؛ همانطور که اختلاف ارتفاع خود اختلاف انرژی نیست، اختلاف ولتاژ الکتریکی نیز خود الزاماً اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی نخواهد بود، بلکه از طریق بار به طور مستقیم با آن در ارتباط است. به عبارت دقیقتر ولتاژ الکتریکی در واقع برابر است با نرخ تغییرات انرژی بر حسب بار. این که چه ارتباطی بین ولتاژ الکتریکی و جریان الکتریکی وجود دارد بسته به وضعیت، متفاوت خواهد بود. همین قدر می توان گفت که وجود ولتاژ قابلیت برقراری جریان را نشان می دهد و بر قراری جریان موجب پیدایش اختلاف ولتاژ می شود. در واقع تعیین ارتباط دقیق بین این دو در هر وضعیت مشخصی، از جمله مهارت های لازم برای یک مهندس برق است.

بنابراین، توانایی تبدیل انرژی به هنگام انتقال بار الکتریکی را ولتاژ یا اختلاف سطح الکتریکی گویند $v = \frac{dw}{dq}$. واحد ولتاژ *ولت*[1] *ولت*[1] است ($1V = 1J/C$). چنان که ولتاژ توانایی ایجاد حرکت در بار را داشته باشد، به آن *نیروی محرکه*[2] گویند و گاهی آنرا

---

[1] Physical Entity

* در نظریه اولیه ماکسول، میدان ها مفاهیم مکانیکی استرس و کشش در فضایی به نام اتر هستند.

[2] Mediator

[3] A: Ampere

آنرا با *EMF* نمایش میدهند. برای مثال یک باتری دارای نیروی محرکه (مثلاً ۱۲ ولت) است. این ولتاژ (در حالت ایده آل) مستقل از میزان عبور بار الکتریکی (جریان) است. یعنی حتی اگر جریانی هم از باتری نگذرد، باز هم ولتاژ همان مقدار است. چنان که ولتاژ بر اثر حرکت بار الکتریکی بوجود آید، به آن *افت ولتاژ*[۳] یا *افت پتانسیل* گویند. طبیعتاً در این حالت ولتاژ تابعی از جریان خواهد بود حتی اگر جریان صفر شود، افت ولتاژ نیز صفر خواهد شد. مثلاً اگر سه عدد لامپ مشابه را بطور سری با هم و به باطری وصل کنیم، ولتاژ هر کدام برابر یک سوم ولتاژ باتری خواهد بود. ولتاژ باتری نیروی محرکه، و ولتاژ هر کدام از لامپ ها افت پتانسیل بر روی آن لامپ خواهد بود.

EMF → **I** → **V**

(علت۱) → (علت۲ ، معلول۱) → (معلول۲)

- میدان مغناطیسی: کلمه مغناطیس یا مگنت[۴] ریشه در کلمه یونانی مگنزیا[۵] دارد که نام سنگ معدن آهنربا در دوران باستان بوده است. همانطور که بار الکتریکی به اجسام در اطراف خود نیرو وارد می کند و حوزه تاثیر این نیرو را میدان الکتریکی نام نهادیم، آهنربا نیز به ذرات آهن در اطراف خود نیرو وارد می کند که به حوزه تاثیر این نیرو، میدان مغناطیسی گفته می شود. در سال ۱۸۲۰ پروفسور کپنهاگی هانس کریستن ارستد[۶] متوجه اثر جریان الکتریکی بر روی سوزن آهنربای مغناطیسی شد. چند هفته بعد در پاریس آندره ماری آمپر[۷]، مقاله ای در باره اثر متقابل نیرو بین آهنربا و سیم حامل جریان الکتریکی منتشر کرد. او نشان داد که سیم های حامل جریان کاملاً نظیر آهنربا عمل می کنند. بالاخره در سال ۱۸۶۴ فیزیکدان اسکاتلندی، جمیز کلارک ماکسول[۸] ارتباط تنگاتنگ و اثر متقابل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را در قالب روابط ریاضی - که به افتخار وی معادلات ماکسول نامیده می شوند - بیان نمود. بررسی دقیق میدان های الکتریکی و مغناطیسی از حوصله این درس خارج بوده به دروس دیگر نظیر"الکترومغناطیس" و"میدانها و امواج" محول می شود.

• رسانایی مواد در حالت جامد

در مهندسی برق می توان مواد را بر حسب بزرگی رسانایی یا به عبارت دیگر میزان مقاومت الکتریکی آنها به چهار گروه بزرگ تقسیم نمود: رسانا ها، عایق ها، نیمه رسانا ها و ابر رسانا ها. این چهار گروه در این بخش به اختصار معرفی شده اند.

جدول ۲-۱ مقاومت ویژه و ضریب حرارتی چند هادی

ردیف	نام هادی	ترکیب	مقاومت ویژه $\rho[\mu\Omega cm]$	ضریب حرارتی $T_C[ppm/°C]$
۱	نقره	Ag	1.59	5000
۲	مس	Cu	1.68	4000
۳	طلا	Au	2.21	3700
۴	آلومینیم	Al	2.65	4400
۵	سدیم	Na	4.77	4600
۶	نیکل	Ni	8.31	6000
۷	آهن	Fe	9.61	5600
۸	پلاتین	Pt	10.5	3800
۹	سرب	Pb	20.8	2900

۱ V: Volt
۲ e Force
۳ ge Drop
۴ Magnet
۵ agnesia
۶ Oersted
۷ Ampere
۸ Maxwell

- رسانا ها

رسانا[1] ها یا هادی ها، همانطور که از نام آنها پیداست، موادی هستند با رسانایی الکتریکی زیاد و به عبارت دیگر مقاومت الکتریکی کم. رابطه ولتاژ – جریان این مواد عموماً یک رابطه خطی است، به عبارت دیگر قانون اهم در مورد این مواد صدق می کند[2]. از دید فیزیکی، رسانا ها دارای بار آزاد هستند که در حضور میدان الکتریکی اعمال شده به آنها – که عموماً به صورت اختلاف ولتاژ بین دو نقطه (دو سطح) از ماده اعمال می شود – به حرکت در می آیند. این بار ها در حین حرکت با مقاومت مکانیکی روبرو می شوند که اثر آن به صورت مقاومت الکتریکی ظاهر می شود. رساناها عموماً مواد فلزی هستند اما می توان گرافیت، محلول نمک و پلاسما[3] را نیز رسانای الکتریکی به حساب آورد. مقاومت ویژه رسانا ها در محدوده $\rho \approx 10^{-8} \cdots 10^{-3} \Omega m$[4] قرار دارد **[1]**. جدول ۲-۱ مقاومت ویژه چند رسانا را نمایش می دهد [این جدول بکمک تلخیص و تلفیقی از مراجع ۲ تا ۶ تهیه شده است].

- نارسانا ها

نارسانا[5] ها یا عایق ها؛ همانطور که از نام این دسته از مواد پیداست، تقریباً فاقد رسانایی الکتریکی بوده و بنابراین مقاومت الکتریکی بسیار بزرگی از خود نشان می دهند. در مقابل رساناها، در این مواد الکترون آزادی برای حرکت در حضور میدان وجود ندارد و عمده این مواد را ترکیبات غیر فلزی، سرامیک ها و یا اکسید ها تشکیل می دهند. البته می توان به گازها و مایعات غیر یونیزه و یا چوب نیز اشاره کرد. نکته دیگر آن که مقاومت بالای نارسانا ها در ولتاژهای عموماً بزرگ شکسته شده و شاهد

---

[1] Conductor

[2] کسانی که این مفاهیم را از دبیرستان فراموش کرده اند به فصل ۳ مراجعه نمایند.

[3] البته محلول نمک و پلاسما محیط های پیچیده تری هستند.

[4] مقاومت ویژه یک ماده یعنی مقاومت الکتریکی بین دو سطح متقابل یک مکعب به ابعاد یک متر از آن ماده. واحد آن Ωm است که در نشریات مهندسی معمولاً از $\mu\Omega cm$ استفاده می شود ($1\Omega m \equiv 10^8\ \mu\Omega cm$).

[5] Insulator

عبور جریان خواهیم بود. از آنجایی که عمده کاربرد این دسته از مواد در عایق بندی است پدیده شکست؛ که معمولا با تغییرات برگشت نا پذیر شیمیایی و یا فیزیکی نیز همراه است، اثری غیر مطلوب به شمار می آید. مقاومت ویژه نا رسانا ها در محدوده $\rho \approx 10^{6} \cdots > 10^{19} \Omega m$ [1] قرار دارد **[1]**. جدول ۲-۲ مقاومت ویژه چند نا رسانا را نمایش می دهد **[2, 6, 7]**.

سئوال: ما در مورد حد بالای ولتاژ الکتریکی در نارساناها بحث کردیم. آیا حد بالا یی برای رساناها وجود دارد؟

۲-۳-۳ نیمه رسانا ها

همانطور که از نام نیمه هادی پیداست، ما با عناصری سرو کار داریم که رسانایی آنها نه به بزرگی رسانا ها است و نه به کوچکی نا رسانا ها[2]. این عناصر که در صورت ساده خود در گروه چهار جدول عناصر قرار گرفته اند[3]، دارای یک خاصیت بسیار قابل توجه هستند: هدایت الکتریکی آنها با اضافه کردن مقداری ناخالصی یا اصطلاحاً آلاینده *قابل کنترل* است و *قابلیت کنترل* دقیقاً همان چیزی است که در مهندسی بدنبال آن هستیم. در جدول ۲-۳ مقاومت ویژه و ضریب حرارتی نیمه رسانا های ساده در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) ذکر شده اند **[7]**.

معروف ترین نیمه هادی ها سیلیسیوم است که علاوه بر خواص بسیار جالب الکتریکی دارای مشخصات بسیار جالب دیگری از جمله برخی خواص قابل توجه مکانیکی نیز هست. حال اگر به سیلیسیوم به عنوان یک نیمه هادی گروه چهار جدول عناصر مقداری ناخالصی از عناصر گروه ۳ و یا گروه ۵ اضافه کنیم، همانطور که در دروس فیزیک مدرن و فیزیک الکترونیک خواهید دید، شاهد افزایش قابل ملاحظه ای در هدایت الکتریکی خواهیم شد. با این تفاوت که در حالت اول این کار از طریق نوعی حامل الکتریکی به نام حفره که معادلاً دارای بار مثبت است انجام می پذیرد و در حالت دوم از طریق حامل های الکتریکی عادی که همانا الکترون ها هستند. بنابراین ما می توانیم دارای دو نوع نیمه رسانای سیلیسیومی با هدایت الکتریکی قابل توجه باشیم، یکی نوع n با آلاینده ای از گروه ۵ و دیگری نوع p با آلاینده ای از گروه ۳[4] جدول عناصر.

جدول ۲-۲ مقاومت ویژه چند نا رسانا

ردیف	نام عایق	مقاومت ویژه $\rho[\mu\Omega cm]$	مقاومت ویژه $\rho[\Omega m]$
۱	تفلن	$10^{30} \cdots 10^{32}$	$10^{22} \cdots 10^{24}$
۲	کوارتز	7.5×10^{25}	7.5×10^{17}
۳	گوگرد (S)	2×10^{23}	2×10^{15}
۴	انواع لاستیک	$10^{22} \cdots 10^{23}$	$10^{13} \cdots 10^{15}$
۵	انواع شیشه	$10^{17} \cdots 10^{21}$	$10^{9} \cdots 10^{13}$
۶	انواع پلیمر	$2\times10^{15} \cdots > 10^{23}$	$2\times10^{7} \cdots > 10^{15}$
۷	برم (Br)	7.8×10^{18}	7.8×10^{10}
۸	کلر (Cl)	10^{17}	10^{9}
۹	ید (I)	1.3×10^{15}	1.3×10^{7}
۱۰	انواع چوب	$3\times10^{12} \cdots 3\times10^{15}$	$3\times10^{4} \cdots 3\times10^{7}$

[1] مقاومت ویژه ی

[2] در درس فیزیک

[3] می توانیم نیمه

[4] در واقع در هر نیمه هادی خالصی الکترون ها و حفره ها هر دو به یک میزان حضور دارند و وارد کردن آلاینده ها، به دلایلی که بعداً خواهید دید، تعادل جمعیتی بین الکترون ها و حفره ها را بر هم زده و در نهایت دو نوع نیمه هادی که در یکی الکترون ها (حفره ها) و در دیگری حفره ها (الکترون ها) اکثریت (اقلیت) دارند، بوجود می آید.

جدول ۲-۳ مقاومت ویژه و ضریب حرارتی نیمه رسانا های ساده در دمای اتاق

ردیف	نام نیمه هادی	مقاومت ویژه $\rho[\Omega cm]$	ضریب حرارتی $T_C[\%/°C]$
۱	سیلیسیوم (سیلیکون) Si	$10\cdots6000$	-7
۲	ژرمانیوم Ge	$1m\cdots0.5$	-5

کنار هم قرار دادن نیمه هادی ها که در آن انواع مختلفی از آلاینده ها در کنار یک دیگر به کار رفته باشد؛ در ابعاد بسیار کوچک – از مرتبه زیر میکرو متر – به راحتی قابل انجام است و خود می تواند منجر به پدید آمدن بسیاری از المان های جدید شود. این خانواده جدید المان ها که بخش قابل توجهی از بازار الکترونیک را بخود اختصاص داده اند دارای تفاوت های بنیادی با المان های ایده آل می باشند که از جمله مهمترین این تفاوت ها رفتار غیر خطی آنها است. از آنجایی که عناصر ایده آل خطی هستند، هر مدلی که برای این دسته از المان ها پیشنهاد شود فقط در رژیم مشخصی قابل استفاده خواهد بود. شما با انواع این مدل ها در دروس مربوط به الکترونیک آشنا خواهید شد.

- ابررساناها

ایجاد درجه حرارت های بسیار پایین در اوایل قرن بیستم یک چالش تکنولوژیکی به شمار می آمد که معدودی از پژوهشگران و دانشمندان در مراکز تحقیقاتی به آن دسترسی داشتند. یکی از این دانشمندان به نام انس[۱] که پژوهشگر دما های پایین به حساب می آمد در حین مطالعه هدایت الکتریکی جیوه متوجه پدیده بسیار قابل توجهی شد: مقاومت جیوه در دمای ۴/۲ درجه کلوین به صفر رسید! بدین ترتیب وی موفق به کشف پدیده ای شد که خود هیچ تصوری از اهمیت و چگونگی آن نداشت. البته کم شدن مقاومت الکتریکی با پایین آمدن درجه حرارت پدیده ای است قابل انتظار (چرا؟)، اما صفر شدن ناگهانی آن به سادگی قابل توجیه نیست. بدین ترتیب ابررساناها موادی با مقاومت صفر هستند[۲] که عموماً در درجه حرارت های پایین قابل دسترسی بوده و خواص منحصر به فردی از خود نشان می دهند. برخی از این خواص – نظیر قابلیت ایجاد میدان های مغناطیسی بزرگ، که فعلا در درجه حرارت های پایین قابل دسترسی هستند – از آنچنان اهمیتی برخوردارند، که رویای بدست آوردن ابر رسانا های درجه حرارت اتاق یکی از موضوعات مورد علاقه نویسندگان داستانهای علمی تخیلی بوده است. دمایی که در آن یک ماده به ابر رسانا تبدیل می شود، دمای بحرانی[۳] نامیده می شود. در جدول ۲-۴ دمای بحرانی چند ماده ذکر شده اند **[9, 10]**.

---

[۱] Heike Kamerlingh Onnes

[۲] البته صفر شدن مقاومت تنها خاصیت جالب ابر رسانا ها نیست. در واقع عبور جریان و حضور میدان مغناطیسی خود طیف دیگری از پدیده ها را موجب می شود.

[۳] Critical Temperature

جدول ۲-۴ دمای بحرانی چند ابر رسانا

ردیف	نام ماده	دمای بحرانی $[K]$ $([^\circ C])$
۱	تیتان (تیتانیوم) Ti	0.39 (-273)
۲	روی Zn	0.91 (-272)
۳	آلومینیم Al	1.19 (-272)
۴	سولفید مس $Cu\,S$	1.61 (-271)
۵	قلع Sn	3.72 (-269)
۶	جیوه Hg	4.16 (-269)
۷	سرب Pb	7.21 (-266)
۸	آلیاژ نیوبیوم و قلع $Nb+Sn$	18.1 (-255)
۹	سرامیک $Y\,Ba_2\,Cu_3\,O_7$	90 (-183)
۱۰	سرامیک $Tl\,Ba\,Ca\,Cu\,O$	125 (-148)

- **.مدل**

برای بررسی علمی سیستم ها و اجزای آن معمولاً سعی میشود خاصیت عناصر و ارتباط بین خروجی و ورودی سیستم را بکمک روابط ریاضی توصیف نمود، به این عمل *مدلسازی*[۱] گویند. تابع ریاضی که سیستم یا عنصر را توصیف می کند، *مدل*[۲] نامیده می شود. برای مثال یک تقویت کننده، که یک سیگنال ورودی ضعیف با توان P_i را به اندازه A_p برابر تقویت کرده و آنرا تبدیل به سیگنال خروجی با توان بیشتر P_o می نماید با رابطه: $P_o = A_p \times P_i$ تعریف می شود. یا یک مقاومت الکتریکی با رابطه: $R = \frac{V}{I}$ مدل می شود.

- **دقت در محاسبات و اندازه گیری**
- خطای تولید و اندازه گیری

بر خلاف مقادیر عددی ریاضی که بطور دلخواه می توان آنها را دقیق[۳] بدست آورد*، در دنیای واقعی دقت تولید، و اندازه گیری محدود است. برای مثال اگر در محاسبه قطر استوانه ای، $d = 5mm$ (یعنی $5.00\cdots\infty\cdots00$) بدست آمد، در عمل ممکن است مقدار واقعی قطر استوانه $d' = 4.92mm$ ساخته، و هنگام اندازه گیری $d'' = 4.9mm$ خوانده شود. از آن جایی که مقدار واقعی را نمی دانیم چقدر است! (چرا؟) مقدار اندازه گیری شده، معیار بررسی ها قرار می گیرد. طبیعتاً هر قدر دستگاه اندازه گیری دقیقتر و روش اندازه گیری صحیحتر باشد، مقدار اندازه گیری شده به مقدار واقعی نزدیکتر خواهد بود. در این رابطه به تعریف چند مفهوم می پردازیم:

---

[۱] Modeling
[۲] Model
[۳] دقت، Precision

* مثلاً $\sqrt{۴} = ۲$ و ۲ یعنی ۲ ممیز، تا بینهایت صفر! یا عدد π را مثلاً می توان تا ۱۵۰ رقم اعشار بدست آورد یا ... .

- مقدار نامی: بنا به تعریف، مقدار محاسبه شده برای ساخت یک عنصر (در مثال فوق $5mm$) را *مقدار نامی*[۱] آن کمیت گویند ($d_n = 5mm$).

- خطای مطلق: در صورتی که خطای اندازه گیری قابل اغماض باشد (اندازه گیری ایده آل)، به اختلاف بین مقدار اندازه گیری شده یک کمیت (X_m) و مقدار نامی آن (X_n)، *خطای مطلق*[۲] (E_{abs}) گفته میشود.

$$E_{abs} = X_m - X_n \qquad (۱-۲)$$

توجه شود که کمیت[۳] خطای مطلق همان کمیت مقدار نامی است. برای مثال:

$$d_n = 5mm, \quad d_m = 4.98mm \quad \Rightarrow \quad E_{abs} = d_m - d_n = -0.02mm$$

- خطای نسبی: میزان خطای مطلق نسبت به مقدار نامی را، *خطای نسبی*[۴] (E_{rel}) گویند:

$$E_{rel} = \frac{E_{abs}}{X_n} = \frac{X_m - X_n}{X_n} \qquad (۲-۲)$$

توجه شود که خطای نسبی کمیتی بدون واحد است که معمولاً آنرا برحسب ٪ (در صد) بیان میکنند؛ یا برای دقتهای بالا به **ppm**[۵] می سنجند. مثلاً برای مثال فوق:

$$d_n = 5mm, \quad E_{abs} = -0.02mm \quad \Rightarrow \quad E_{rel} = \frac{E_{abs}}{d_n} = -0.4\%$$

- تلرانس: از آن جایی که هنگام ساخت قطعات، معلوم است که به مقدار محاسبه شده نمی توان دست یافت، لذا از قبل محدوده یِ خطایِ مجازِ تولید را تعریف میکنند. بعنوان مثال، پس از محاسبه ی $d = 5mm$، در دستورالعمل ساخت، مثلاً $d = 5mm \pm 0.1mm$ یا $d = 5mm \pm 2\%$ * ذکر می شود. به حداکثر خطای مجاز نسبی تولید، *تلرانس*[۶] گویند.

- انحراف معیار: از آنجایی که به هنگام تولید تعداد زیادی قطعه[۷] با مقدار نامی یکسان، مقادیر واقعی یکسان نخواهند بود، بعبارت دیگر هنگام اندازه گیری یک کمیت - به دلیل خطا در اندازه گیری - مقدار واقعی مشخص نخواهد بود، برای حصول اطمینان بیشتر از مقادیر بدست آمده، از روابط آماری در تعیین مقدار یک کمیت استفاده میکنند. برای مثال اگر ولتاژ یک باطری را ده بار متوالی با یک ولت متر اندازه گیری کنیم، در حالت کلی، ده مقدار مختلف بدست خواهیم آورد. علت این امر وجود نویز، غیر ایده آل بودن ولت متر، ... است. یا اگر صد عدد مقاومت با مقادیر نامی برابر را اندازه گیری کنیم (حتی در شرایط ایده آل)، صد مقدار مختلف بدست خواهیم آورد! طبق اصول آمار و احتمالات، نزدیکترین مقدار به مقدار واقعی، میانگین[۸] مقادیر اندازه گیری شده است.

$$Avg\ (X)\ =\ X_{av}\ = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \qquad (۳-۲)$$

---

[۱] Nominal Value

[۲] Absolute Error

[۳] Dimension

[۴] Relative Error

[۵] ppm: Parts Per Million (10^{-6})

[*] این نحوه نگارش از نظر فیزیکی اشتباه، ولی در مهندسی متداول است، منظور $d = 5mm(1 \pm 0.02)$ بعبارت دیگر $d = 4.9 \cdots 5.1mm$ می باشد.

[۶] Tol.: Tolerance

[۷] عنصر، المان، Element, Component

[۸] Avg: Average

هر قدر مقادیر اندازه گیری شده به هم نزدیکتر باشند، بعبارت دیگر تغییرات مقادیر نسبت به یک دیگر کمتر باشد، دقت بیشتر است. یکی از مفاهیمی که برای بیان این منظور به کار می رود *واریانس*[1] نام دارد، که طبق رابطه (۲-۴) تعریف می شود.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_{av})^2}{(n-1)} \qquad (۴-۲)$$

در عمل، اکثراً از جذر واریانس استفاده میکنند، که به آن *انحراف معیار*[2] گویند.

$$s = \sqrt{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_{av})^2}{(n-1)}} \qquad (۵-۲)$$

۲-۵-۲ تخمین خطا و تقریب در محاسبات

این مطلب درست است که در محاسبات می توان به هر دقت مطلوب دست یافت، ولی این امر اولاً هزینه بر است (مالی و زمانی)، ثانیاً غیر ضروری. برای مثال اگر دو عدد مقاومت $R_1 = 6k\,\Omega$ و $R_2 = 7k\,\Omega$ را باهم موازی کنیم*:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 3.2307692307\cdots\, k\,\Omega$$

محاسبه می شود. این مقدار با یک دقت بسیار بالایی (خطای بسیار کمی) بدست آمده است ($|E_{abs}| < 0.1\mu\Omega$، $|E_{rel}| < 3\cdot 10^{-11}$ (چرا؟)). در عمل محاسبه با چنین دقت هایی بی معنی است؛ زیرا همان طور که میدانیم، در دنیای واقعی مقاومت ها دارای تلرانس هستند. اگر فرض کنیم تلرانس مقاومت های استفاده شده $Tol. = \pm 10\%$ باشد، در بدترین حالت:

$$R_{eq} = 2.9076923\ldots \;\cdots\; 3.5538461\ldots\, k\,\Omega$$

خواهد بود (چرا؟). بنابراین اگر $R_{eq} \approx 3.2k\,\Omega$ در نظر گرفته شود مقدار معقولی خواهد بود. به همین ترتیب اگر $Tol. = \pm 1\%$ باشد، محاسبه $R_{eq} \approx 3.23k\,\Omega$ قابل قبول است.

به عنوان مثالی دیگر، فرض کنیم دو مقاومت $R_1 = 1k\,\Omega$ و $R_2 = 1M\,\Omega$ را باهم به صورت سری یا موازی ببندیم؛ در این صورت:

$$R_s = R_1 + R_2 = 1.001M\,\Omega, \quad R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 0.999000999\cdots\, k\,\Omega$$

حال اگر تلرانس مقاومت ها $Tol. = \pm 0.1\%$ باشد، $R_s = 1.001M\,\Omega$ و $R_p = 0.999k\,\Omega$ باید در نظر گرفته شوند. در صورتی که اگر تلرانس مقاومت ها $Tol. = \pm 10\%$ یا حتی $Tol. = \pm 1\%$ باشد:

$$R_s = R_1 + R_2 = 1.001M\,\Omega \approx 1M\,\Omega = R_2 \qquad \Rightarrow \qquad R_s \approx R_2$$

و:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 0.999k\,\Omega \approx 1k\,\Omega = R_1 \qquad \Rightarrow \qquad R_p \approx R_1$$

---

[1] Variance

[2] Standard Deviation

* فرض بر این است که دانشجویان از دوران دبیرستان با مفاهیم *مقاومت*، *سری*، *موازی*، ... و نحوه محاسبه آنها آشنا هستند. در غیر این صورت پس از فرا گرفتن فصل ۳ مجدداً به این بخش مراجعه نمایند.

از مثال های فوق نتیجه می گیریم که محاسبات فقط تا حد لازم (و معقول) باید دقیق انجام شوند. این *"حدلازم"* توسط مقدار و تلرانس عناصر بعبارت دیگر نسبت اثر گذاری عناصر در مدار، مشخص می شود. اگر دو مقاومت با هم سری باشند، میزان تأثیر مقاومت بزرگتر، در مدار بیشتر است. لذا اگر مقدار مقاومتی *"خیلی"* بزرگتر از مقاومت دیگر باشد، از اثر مقاومت کوچکتر می توان صرفنظر کرد. هم چنین اگر دو مقاومت با هم موازی باشند، میزان تأثیر مقاومت کوچک تر، در مدار بیشتر است. لذا اگر مقدار مقاومتی *"خیلی"* بزرگتر از مقاومت دیگر باشد، از اثر آن می توان صرفنظر کرد. بنابراین با توجه به مقدار المان های به کار رفته، دقت آنها و نحوه استفاده آنها در مدار، قبل از حل شبکه (معادلات مربوطه)، می توان حدود جواب را *"تخمین"* زده، دقت لازم برای محاسبات را مشخص نمود. در صورتی که ظرفیت عنصری در دقت محاسبات تأثیر قابل توجهی نداشته باشد، آن المان از مدار حذف می شود. در مثال فوق بجای سری کردن دو مقاومت، فقط مقاومت R_2 و بجای موازی کردن دو مقاومت، فقط مقاومت R_1 در نظر گرفته شده است. ممکن است این سوال پیش آید که: محاسبه دو مقاومت سری یا موازی که مسئله پیچیده ای نیست؛ پس چرا باید فکر کرد، تخمین زد و یکی از مقاومت ها را حذف نمود؟ در جواب باید گفت که:

اولاً: فکر کردن همیشه خوبست! یک مهندس، ماشین حساب نیست که فقط محاسبات را انجام دهد. یک کامپیوتر از سریعترین آدم، هم سریعتر و هم دقیقتر محاسبه می کند. برتری انسان بر ماشین، توانایی فکر کردنش است! فکر کردن باعث می شود تا مدار یا سیستم را بهتر بشناسیم. اگر از قبل بتوانیم حدود جواب را تخمین بزنیم، اگر پس از محاسبه به جوابِ دور از انتظار برسیم، نتیجه می گیریم که باید جایی در محاسبات اشتباه کرده باشیم.

ثانیاً: مدارها همواره مانند مثال فوق ساده نیستند. اگر در شبکه ای ده عنصر وجود داشته باشد، در حالت کلی حل آن شبکه از روش های تحلیلی و بصورت دستی بسیار مشکل یا حتی عملاً غیر ممکن خواهد بود، در صورتیکه در مدارهای واقعی اکثراً از اثر خیلی از عناصر در مقابل بعضی از آنها می توان صرفنظر کرده مشخصات خواسته شده مدار را با تقریب خوب بدست آورد. مثلاً ممکن است با حذف المان های کم اثر گذار در مدار، از یک دستگاه ۸ معادله، ۸ مجهولی به یک دستگاه ۳ معادله، ۳ مجهولی دست یافت. طبیعتاً حل این دستگاه ساده تر و امکان خطای محاسباتی بسیار کمتر است. پس از بدست آوردن جواب های تقریبی، در صورت نیاز به دقت های بالاتر، می توان از برنامه های شبیه ساز (مانند ***PSpice***) استفاده کرد*.

مراجع:

[1] http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_1.html

[2] David R. Lide (ed), *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition*. CRC Press. Boca Raton, Florida, 2003; Section 12, Properties of Solids; Electrical Resistivity of Pure Metals

[3] http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_2.html

[4] http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_12/6.html

[۵] محمد حسین علوی، الکترونیک کاربردی، ضمیمه جلد اول، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۶۳

[6] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/rstiv.html

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Resistivity

[8] http://en.wikipedia.org/wiki/P-n_junction

[9] http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_12/7.html

[10] http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2001/accelerators/superconductivity/superconductivity.htm

* ر.ک. فصل ۳