

# مبانی بیوفیزیک

تألیف

پی. کی. اسری واستاوا

ترجمه

**دکتر ارسطو بدویی دلفارد**

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان

**دکتر زهرا کرمی**

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان

**دکتر باقر سیدعلیپور**

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر

**دکتر حمید مباشری**

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات بیوشیمی - بیوفیزیک (IBB) دانشگاه تهران





کتاب ارجمند

<p>سرشناسه: سریواستاوا، پرادپ کی. Srivastava. P. K. (Pradeep k) عنوان و نام‌پدیدآورنده: مبانی بیوفیزیک / مؤلف پی. کی. اسری و استاوا؛ مترجم ارسطو بدویی... [و دیگران]. مشخصات نشر: تهران، کتاب ارجمند، ۱۳۹۰ مشخصات ظاهری: ۳۶۸ ص، وزیری. شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۲۰۰-۰۷۵-۰ وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا یادداشت: مترجم ارسطو بدویی، حمید مباشری، باقر سیدعلیپور، زهرا کرمی. عنوان اصلی: Elementary biophysics موضوع: فیزیک زیستی شناسه افزوده: بدویی، ارسطو، ۱۳۵۸ - مترجم رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۰ م ۴س/ ۵۰۵ QH رده‌بندی دیویی: ۵۷۱/۴ شماره کتابشناسی ملی: ۲۳۲۵۷۹۶</p>	<p>پی. کی. اسری و استاوا <b>مبانی بیوفیزیک</b> ترجمه: دکتر ارسطو بدویی، دکتر حمید مباشری دکتر باقر سیدعلیپور، دکتر زهرا کرمی فروست: ۲۵۱ صفحه‌آرا: آیدا روستا طراح جلد: احسان ارجمند چاپ: سامان، صحافی: روشنگ چاپ اول، اردیبهشت ۱۳۹۲، ۱۱۰۰ نسخه شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۲۰۰-۰۷۵-۰ <a href="http://www.arjmandpub.com">www.arjmandpub.com</a> این اثر، مشمول قانون حمایت از مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه مؤلف، ناشر، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.</p>
---	--

#### مرکز پخش: انتشارات ارجمند

- دفتر مرکزی: تهران بلوار کشاورز، بین خ کارگر و ۱۶ آذر، پلاک ۲۹۲، تلفن ۸۸۹۸۲۰۴۰  
شعبه اصفهان: خیابان چهارباغ بالا، پاساژ هزارگریب، تلفن ۰۳۱۱-۶۲۸۱۵۷۴  
شعبه مشهد: ابتدای احمدآباد، پاساژ امیر، انتشارات مجد دانش، تلفن ۰۵۱۱-۸۴۴۱۰۱۶  
شعبه بابل: خ گنج افروز، پاساژ گنج افروز، تلفن ۰۱۱۱-۲۲۲۷۷۶۴  
شعبه رشت: خ نامجو، روبروی ورزشگاه عضدی، تلفن ۰۱۳۱-۳۲۳۲۸۷۶  
شعبه ساری: بیمارستان امام، روبروی ریاست تلفن ۰۹۱۱۸۰۲۰۰۹۰

بها: ۲۰۰۰۰ تومان

## پیشگفتار ویرایش دوم

---

راب فیلیپس<sup>۱</sup> و استیو کواک<sup>۲</sup> (مقاله فیزیک امروزی، می ۲۰۰۶) با همکاری یکدیگر سه مسئله را در زمینه‌های موجود بین فیزیک و زیست‌شناسی توصیف کردند: (i) کار کردن ماشین‌های مولکولی به‌عنوان اساس حیات، (ii) کار کردن مرتبط با هم تشکیلات ماکرومولکول درون سلولی و (iii) رفتار خارج از تعادل این سیستم‌ها. در مقاله دیگری (فیزیک امروزی، مارچ ۲۰۰۵)، ری گلدستین<sup>۳</sup>، فیل نلسون<sup>۴</sup> و تام پورز<sup>۵</sup> یک درس مقدماتی بیوفیزیک را نیز پیشنهاد کرده‌اند که ممکن است راهی برای توصیف دستکاری تک مولکول، موتورهای مولکولی و ... پیدا کند.

با انگیزش ایجاد شده توسط این سه مؤلف، فصل ۱۲ به‌عنوان ماشین‌های مولکولی در این ویرایش اضافه گردیده است. که تنها توصیف کمی ماشین‌ها را پوشش می‌دهد. علاوه بر این تصمیم گرفته شد که بخشی تحت عنوان ”مباحث ویژه“، در این ویرایش اضافه شود. زمان تنها اجازه یک مبحث را داد که آن تصویربرداری توموگرافیک پزشکی بود که بر اساس پیشنهاد ناشر، اضافه شد. که درخواست‌های مشابهی از برخی خوانندگان حوزه فیزیک پزشکی دریافت کرده بود. مابقی کتاب به میزان زیادی بدون تغییر باقی مانده است.

پی. کی. اِسریواستاو<sup>۶</sup>

---

1. Rob Philips  
3. Ray Goldstein  
5. Tom powers

2. Steve Quake  
4. Phil Nelson  
6. P.K. Srivastava

## پیشگفتار ویرایش اول

این کتاب برگرفته از مطالبی است که در طی سالیان متعدد، به‌عنوان واحد درسی بیوفیزیک به دانشجویان کارشناسی ارشد علوم زیستی دانشگاه کانپور تدریس شده است. بنابراین، طرح اولیه کتاب به گونه‌ای تدوین گردید که نیازهای دانشجویان گروه زیست‌شناسی را برآورده سازد. در نتیجه، واجد توضیحات متعددی از اصول ابتدایی فیزیک است که ممکن است برای یک دانشجوی رشته فیزیک، ابتدایی و غیر ضروری به نظر برسد. در ادامه، مطالب کتاب به صورتی بسط داده شد که مطالب مورد نیاز، در قالب یک واحد برای دانشجویان سال سوم کارشناسی فیزیک را تحت پوشش قرار می‌دهد. از این رو توضیحات متنوعی در مورد ساختار و نقش سلول و اجزای آن و دیگر سیستم‌های زیستی اضافه گردیدند، که ممکن است برای دانشجویان زیست‌شناسی فشرده یا ناکافی به نظر آید. هر چند این کار دو جانبه ممکن است محدودیت‌هایی داشته باشد، اما با این حال امیدواریم که برای هر دو گروه مفید واقع شود.

بیوفیزیک، مطالعه سیستم‌های زنده بر اساس مفاهیم و قوانین فیزیک است. از این نظر با این تعریف کلیشه‌ای، بیوفیزیک یک موضوع بین‌رشته‌ای در نظر گرفته می‌شود. در ساده‌ترین سطح، فیزیک را می‌توان برای درک نحوه عمل اندام‌ها مورد استفاده قرار داد. این موضوع از قدیم در حیطه علم فیزیولوژی قرار داشته است. در سطح بالاتر، بیوفیزیک برای فهم ساختار و دینامیک سلول و مولکول‌های زیستی تلاش می‌کند. این مفهوم با مطالعات زیست‌مولکولی و بیوشیمی همپوشانی دارد. با این حال، بین این رشته‌ها نقاط متمایزی نیز وجود دارد که به نحوه نگرش به آن موضوع بستگی دارد. امیدواریم بتوانیم از دید علم فیزیک موضوع را مورد بررسی قرار دهیم. در دنیای فیزیک می‌توانیم بین فیزیک تجربی و تئوری تفاوت قائل شویم. در این کتاب، تکنیک‌های تجربی بیوفیزیک مورد بحث قرار نمی‌گیرد. این مطالب در کتابی که توسط دی. پاتابهای<sup>۱</sup> و ان. گوتام<sup>۲</sup> انتشار یافته است با کلیه جزئیات مورد بحث قرار گرفته‌اند. در این کتاب تنها مباحث نظری را در سطح بسیار ابتدایی و مقدماتی بحث می‌نماییم.

محتوای این کتاب به دو قسمت تقسیم می‌شود: قسمت الف، درباره اندام‌ها بحث می‌کند و قسمت ب، بیوفیزیک سلولی و مولکولی را شامل می‌شود. جزئیات ساختاری و ریخت‌زایی سیستم‌های زیستی و بیوشیمی آن‌ها به اختصار مورد بحث قرار گرفته و تنها مفاهیم فیزیکی به طور کامل توضیح داده می‌شوند. مشتقات اکثر معادلات مهم موجود در متن، در کادرهای جداگانه‌ای آورده شده‌اند.

---

1. V.Pattabhi  
2. N.Gautham

من تدریس بیوفیزیک را به دعوت پروفیسور ال. سی. میشر<sup>۱</sup> (رئیس گروه زیست‌شناسی دانشگاه کانپور) آغاز کردم که در یک صبح زود به طور غیرمنتظره‌ای از من خواسته شد که این واحد را به دانشجویانش تدریس کنم. پیشاپیش آموزش‌هایی در زمینه فیزیک نظری ذرات داشتم، اما هرگز تا آن زمان زیست‌شناسی نخوانده بودم. با این حال وقتی که به گذشته می‌اندیشم از او متشکر می‌شوم که اجازه نداد این کار را رها کنم. همچنین از تمام همکارانم از جمله دکتر پی. باجپایی<sup>۲</sup> متشکرم که کتاب‌هایی در زمینه فیزیولوژی جانوری (تألیف اِکر<sup>۳</sup> و رندل<sup>۴</sup>) و فیزیولوژی انسانی (تألیف گایتون<sup>۵</sup>) من امانت داد که توسط آن‌ها سفرم به دنیای سیستم‌های زنده را آغاز نمودم. همچنین از ان. کی. ویشونی<sup>۶</sup> و ای میترا<sup>۷</sup> که در درک مفاهیم پایه بیوشیمی آلی به من کمک کردند نیز، سپاسگذارم. من شکل حاضر این کتاب را مدیون معلم خود، پروفیسور پی. گوپتابهایی<sup>۸</sup> یا<sup>۹</sup> هستم که ساعات زیادی را با دقت به مطالعه دست نوشته قسمت دوم کتاب پرداخت و پیشنهادات متعددی را برای بهبود مطالب و نمودارهای این کتاب ارائه داد. من صمیمانه‌ترین قدردانی‌ها را به او تقدیم می‌کنم. همچنین از خانم پاراما وانکار<sup>۹</sup> در کانپور IIT متشکر هستم که زحمت مرور کامل دست‌نوشته را متحمل شدند، ولی با این حال ممکن است عدم تجربه من دیر یا زود در متن نمایان شود. در نهایت، من مدیون همسر و فرزندانم هستم که سال‌ها از این‌که نتوانستند حتی یک بعد از ظهر با من باشند، بی‌اندازه رنج کشیدند: من از مهربانی‌ها و شکیبایی‌شان متشکرم.

پی. کی. اِسریواستاو

---

1.L.C.Mishra  
3.Eckert  
5.Guyton  
7.A Mitra  
9.Vankar

2.P. Bajpai  
4.Randal  
6.N.K.Vishnoi  
8.P.Guptabhaiya

## مقدمه مترجمان

---

خداوند متعال را سپاسگزاریم که فرصتی عطا فرمود که در راه انجام خدمت به جامعه علمی کشور و توسعه علوم نوین گامی هرچند کوچک را در حد توانایی خویش برداریم. بیوفیزیک علمی است بین رشته ای که به بررسی و شناخت ماهیت فیزیکی عوامل زنده می پردازد و ارتباط آن‌ها را با محیط‌های مولکولی میکروسکوپی و ماکروسکوپی گاه پیچیده در داخل و خارج از آن مورد نقد و کنکاش قرار می‌دهد. نظر به اهمیت یافتن علوم بین رشته‌ای و کاربردی در سیاست‌های برنامه‌ریزی کلان کشور، توجه به علوم پایه‌ای و بین رشته‌ای جایگاه ویژه‌ای یافته است. از این رو ضرورت ترجمه و یا تالیف کتاب‌هایی با این موضوع با توجه به رشته‌های دانشگاهی مرتبط کاملاً احساس می‌شود. در کتاب حاضر، تلاش شده است به برخی از نکات بنیادین برای درک بهتر سیستم‌های پیچیده زیستی پرداخته شود و با طرح ساختمان پروتئینها، غشاهای و عوامل حفظ ساختار و عملکرد آن‌ها، مقدمات درک ساختمان‌های پیچیده‌تری چون ارگانل‌ها، سلول‌ها و بافت‌ها فراهم آید. بنابراین در کنار نگرش‌های مولکولی، برای مثال تولید انرژی در میتوکندری، به موضوعات ماکروسکوپی چون بینایی، شنوایی، مکانیک، سیستم عضلانی، سیستم تنفسی و حتی انتقال پیام‌های عصبی و ترمودینامیک پرداخته شده است. همچنین مباحث نوینی چون موتورهای مولکولی و تکنیک‌های کاربردی از جمله توموگرافی کامپیوتری و نشر پوزیترون در فصل‌های پایانی مطرح شده است. بنابر این می‌تواند مورد استفاده دانشجویان رشته‌های مختلف که گاه اطلاعات زیادی از سیستم‌های زیستی ندارند نیز قرار گیرد و زمینه تفکر فارغ التحصیلان رشته‌های غیر زیستی در جهت درک بهتر و بیشتر این سیستم‌ها را فراهم آورد. امید است که چاپ این کتاب خلاء موجود در متون فارسی در ارتباط با ترجمه کتاب در حوزه بیوفیزیک برای خوانندگان بویژه پژوهشگران و دانشجویان رشته‌های مختلف علوم زیستی و علوم پایه پزشکی و پیراپزشکی را مرتفع کند. بدون شک، ترجمه حاضر خارج از اشکال نمی‌باشد و با وجود تلاش تمام همکاران ممکن است نکاتی دور از نظر قرار گرفته باشد که امید است با انعکاس آن از طرف خوانندگان گرامی، امکان ارتقاء کیفیت کتاب حاضر در چاپ مجدد فراهم آید. در خاتمه از مدیریت و کارکنان محترم انتشارات ارجمند که با حوصله و بردباری مراتب طولانی تهیه کتاب را تحمل و در کلیه مراحل حمایت‌های مالی و معنوی خود را دریغ نکرده‌اند تشکر می‌شود.

گروه مترجمان

زمستان ۹۱

# فهرست

بیوفیزیک چیست؟	۱۱
بخش اول : بیوفیزیک سیستم‌ها	۱۹
فصل ۱: بیومکانیک	۲۱
۱-۱ بیواستاتیک	۲۱
۱-۲ بیوفیزیک عضله	۲۵
۱-۳ استحکام استخوان‌ها	۳۱
۱-۴ بیودینامیک	۳۲
۱-۵ حرکت روی خشکی	۳۴
۱-۶ حرکت در هوا	۳۹
۱-۷ حرکت در آب	۴۴
۱-۸ نقش جاذبه زمین	۴۶
فصل ۲: بیوفیزیک و جریان سیال	۴۸
۲-۱ جریان لایه‌ای ثابت	۴۹
۲-۲ فرمول پوزیولی	۵۲
۲-۳ انرژی‌های مطرح در جریان سیال	۵۴
۲-۴ آشفستگی	۵۵
۲-۵ دینامیک خون	۵۶
۲-۶ جریان سیال در گیاهان	۶۱
فصل ۳: بیوفیزیک و انتقال گاز	۶۸
۳-۱ گاز ایده‌آل	۶۸
۳-۲ انتقال همرفتی گازها	۷۳
۳-۳ انتشار گازها: قوانین فیک	۷۵
۳-۴ فیزیولوژی تنفس	۸۱
فصل ۴: فیزیک شنوایی	۸۶
۴-۱ موج‌های طولی و عرضی	۸۶
۴-۲ مشخصات فیزیولوژیکی صدا	۹۱

۹۳.....	۴-۳ گوش انسان.....
۹۸.....	۴-۵ اثر داپلر.....
۱۰۰.....	<b>فصل ۵: فیزیک بینایی.....</b>
۱۰۰.....	۵-۱ ماهیت موجی نور.....
۱۰۲.....	۵-۲ نورشناسی هندسی.....
۱۰۵.....	۵-۳ توان انکساری.....
۱۰۹.....	۵-۴ شبکه و گیرنده‌های نور.....
۱۱۵.....	۵-۵ گیرنده‌های نوری و فیبرهای نوری.....
۱۱۸.....	۵-۶ توان تفکیک چشم.....
۱۲۰.....	۵-۷ قطبیت و بینایی.....
۱۲۳.....	<b>بخش دوم: بیوفیزیک سلولی و مولکولی.....</b>
۱۲۵.....	<b>فصل ۶: سلول: اندامک‌ها و مولکول‌های آن.....</b>
۱۲۶.....	۶-۱ پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها.....
۱۳۲.....	۶-۲ مولکول‌های تشکیل‌دهنده سلول.....
۱۳۴.....	۶-۳ کربوهیدرات‌ها.....
۱۳۸.....	۶-۴ لیپیدها.....
۱۴۱.....	۶-۵ پروتئین‌ها.....
۱۴۶.....	۶-۶ اسیدهای نوکلئیک.....
۱۵۰.....	۶-۷ هتروماکرومولکول‌ها.....
۱۵۲.....	<b>فصل ۷: فیزیک مولکول‌های زیستی.....</b>
۱۵۲.....	۷-۱ نیروهای مولکولی.....
۱۵۳.....	۷-۲ نیروی قوی.....
۱۵۶.....	۷-۳ نیروهای بین مولکولی ضعیف.....
۱۷۱.....	۷-۴ سازمان ساختمانی پروتئین‌ها.....
۱۷۷.....	۷-۵ سازمان ساختمانی اسیدهای نوکلئیک.....
۱۷۹.....	<b>مباحث تکمیلی.....</b>
۱۷۹.....	۷-۶ مکانیسم مولکولی انتقال اطلاعات ژنتیکی.....
۱۸۰.....	۷-۷ کد ژنتیکی.....
۱۸۲.....	۷-۸ انتقال اطلاعات ژنتیکی.....
۱۸۳.....	۷-۹ مکانیسم مولکولی سنتز پروتئین.....
۱۸۹.....	۷-۱۰ اساس شناسایی مولکولی.....



فصل ۸: فیزیک غشاهای زیستی.....	۱۹۲
۸-۱ غشای سلولی.....	۱۹۲
۸-۲ انتقال از میان غشا.....	۲۰۰
۸-۳ انتقال غیرفعال.....	۲۰۰
۸-۴ انتشار تسهیل شده.....	۲۰۷
۸-۵ انتقال فعال.....	۲۱۱
فصل ۹: ترمودینامیک و سیستم‌های زیستی.....	۲۲۰
۹-۱ ترمودینامیک تعادلی.....	۲۲۱
۹-۲ ترمودینامیک نزدیک به تعادل.....	۲۲۴
۹-۳ انرژی آزاد گیبس.....	۲۲۶
۹-۴ پتانسیل شیمیایی.....	۲۲۹
۹-۵ آنالیز ترمودینامیکی انتقال غشایی.....	۲۳۳
۹-۶ فاز تعادل.....	۲۳۶
۹-۷ مطالب تکمیلی پیرامون ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر.....	۲۴۰
فصل ۱۰: بیوانرژی‌تیک.....	۲۵۱
۱۰-۱ بیوانرژی‌تیک و مولکول‌های ATP.....	۲۵۲
۱۰-۲ واکنش‌های احیا.....	۲۵۶
۱۰-۳ تنفس سلولی.....	۲۶۱
۱۰-۴ فرضیه شیمی‌اسمزی.....	۲۶۴
۱۰-۵ فتوسنتز.....	۲۶۷
۱۰-۶ انقباض عضله.....	۲۸۲
فصل ۱۱: بیوفیزیک عصب.....	۲۸۷
۱۱-۱ آناتومی نورون‌ها.....	۲۸۸
۱۱-۲ ماهیت فیزیکی - شیمیایی پتانسیل غشا.....	۲۸۹
۱۱-۳ معادل الکتریکی غشا.....	۲۹۸
۱۱-۴ تحریک عصبی.....	۳۰۲
۱۱-۵ پتانسیل عمل.....	۳۱۲
۱۱-۶ هدایت پتانسیل عمل.....	۳۱۶
فصل ۱۲: فیزیک نانو ماشین‌های زیستی.....	۳۲۴
۱۲-۱ ماشین‌های مولکولی.....	۳۲۵
۱۲-۲ ترمودینامیک ماشین‌های مولکولی.....	۳۳۶
۱۲-۳ تکنیک‌های آشکارسازی.....	۳۳۹
۱۲-۴ میکروسکوپ روبشی تفاضلی.....	۳۳۹

۳۴۱.....	۱۲-۵ میکروسکوپ نیروی اتمی.....
۳۴۲.....	۱۲-۶ تویزهای نوری.....
۳۴۷.....	<b>بخش سوم : موضوعات خاص.....</b>
۳۴۹.....	<b>فصل ۱۳: تصویربرداری پزشکی.....</b>
۳۴۹.....	۱۳-۱ تصویربرداری برجسته.....
۳۵۱.....	۱۳-۲ توموگرافی سی تی اسکن.....
۳۵۶.....	۱۳-۳ توموگرافی نشری (اسپکت و پت).....
۳۵۹.....	۱۳-۴ تصویربرداری رزونانس مغناطیس (MRI).....

## بیوفیزیک چیست؟

"علم تلاشی است برای ایجاد تفکری منطقی و یکپارچه از تجربیات حسی متنوعی که به صورت مبهم در ما وجود دارد. انیشتین<sup>۱</sup> علم را در حالت کلی، به عنوان فعالیت نظری ساخته‌های بشری تعریف کرد که می‌تواند به طور منطقی مشاهدات تجربی را تفسیر کرده و بهم ارتباط دهد." او همچنین نوشت، "آنچه که ما آن را فیزیک می‌نامیم، شامل گروهی از علوم طبیعی است که مفاهیم پایه آن‌ها بایستی قابل سنجش باشد؛ بگونه‌ای که این مفاهیم قابلیت فرمول‌بندی را داشته باشند."

بنابراین، بر اساس نظریه انیشتین، فیزیک شامل حوزه کاملی از فعالیت‌هایی است که در آن اندازه‌گیری‌های تجربی و تکرارپذیر با تئوری فرمول شده ریاضی در ارتباط است. با پیشرفت علم، محدوده فیزیک گسترش زیادی یافته است، به نظر می‌رسد تنها عامل محدودکننده آن، محدودیت روش‌هایش بوده است. یعنی، علی‌رغم همه تعریف‌های قابل قبول از نظر علمی، فیزیک در نهایت توسط "محدودیت‌های به کار رفته در آن"، محدود شده است. به دلیل همین محدودیت‌ها است که فیزیک از زمان نیوتن<sup>۲</sup>، خود را به مطالعه ساختار و خصوصیات مواد بی‌جان در بعد زمان و مکان محدود کرده است.

در این دوره، فیزیک نظریه متقاعدکننده جهانی را ایجاد کرد که کل جهان تنها شامل دو ماهیت ماده و انرژی (که خود شکلی از ماده است) در یک حرکت مداوم است. علاوه بر این، یکی از مهمترین مفاهیمی که آن نظریه ایجاد نموده بود، جهانی (یکسان) بودن ساختار و خصوصیات ماده هم در زمان و هم در مکان است. تمام مواد قابل اندازه‌گیری در جهان از مجموعه مشابهی از عناصر ذکر شده در جدول مندلیف<sup>۳</sup> تشکیل شده‌اند. حرکت در همه جا بوسیله برهمکنش‌های اساسی یکسان مانند نیروی‌های جاذبه‌ای، الکترومغناطیسی و هسته‌ای (قوی و ضعیف) ایجاد می‌شود. فرض شده است که همه قوانین و نظریه‌های فرمول‌بندی شده در هر زمان و در هر مکان درست باشند. بنابراین، طبق این فرض بر اساس فیزیک (مدرن)، ماده در شرایط یکسان در هر زمانی و هر مکانی رفتار مشابهی دارد.

در مقابل دنیای فیزیک، زیست‌شناسی نه تنها بسیار پیچیده‌تر از اشیاء بی‌جان است، بلکه همواره در حال تکامل می‌باشد. "یک فیزیکدان که برای اولین بار با مسائل زیست‌شناسی مواجه می‌شود به علت این‌که هیچ پدیده منطقی در زیست‌شناسی وجود ندارد، دچار ابهام می‌شود. هر چیزی محدود به زمان و مکان است. حیوان یا گیاه یا میکروارگانیسم‌هایی که او با آن‌ها کار می‌کند، فقط یک ارتباط با

1. Einstein

2. Newton

3. Mendeleev's table

اشکال متغیر زنجیره تکاملی دارند که هیچکدام دارای اعتبار دائمی نمی‌باشند.<sup>۱</sup> این همان چیزی است که مکس دلبروک<sup>۱</sup> (فیزیکدان ذرات)<sup>۲</sup> وقتی که به زیست‌شناسی گرایش پیدا کرده بود به آن اشاره کرد. وی سرانجام جایزه نوبل ۱۹۶۹ را برای مطالعات خود درباره زیست‌شناسی ملکولی و ویروس‌ها دریافت کرد. ثابت شده است که حالتی از فیزیک که به مطالعه خصوصیات جهان می‌پردازد، در نهایت در زیست‌شناسی مفید است. جدای از رشته‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژی سنتی، تحقیقات فیزیکو-شیمیایی در زیست‌شناسی بر روی مسائل اساسی مانند؛ متابولیسم، بیوانرژتیک، آنتوزنی، فیولوژی، وراثت و تغییرپذیری و... متمرکز شده است.

در فیزیک یک سیستم پیچیده را بوسیله تبدیل آن به زیرسیستم‌های ساده‌تر تقسیم‌بندی می‌کنند. فیزیکدانان با تجزیه و تحلیل زیرسیستم‌های منفرد به‌عنوان سیستم‌های ایزوله شده تلاش می‌کنند که سیستم‌های پیچیده را از زیرسیستم‌های ساده بازسازی کنند. این طرز تفکر بیان می‌کند که همان‌گونه یک سلول منفرد به‌عنوان واحد حیات شناخته شده است فیزیک نیز ضرورتاً باید واحد اساسی حیات را جستجو کند. به این ترتیب حوزه اولیه فیزیک در زیست‌شناسی برای تحقیق ساختار و خصوصیات سلول زنده بوده است. این به این معنی نیست که فیزیک در نهایت مجبور است پدیده‌های زیستی را در تمام سطوح، از مولکول‌ها و سلول‌ها گرفته تا بیوسفر را در برگیرد. در حقیقت، درک تشکیل سیستم پیچیده از ساده، در مطالعه سیستم‌های زنده دارای محدودیت‌های ذاتی می‌باشد. یک سیستم زنده تجمع غیرفعال سلول‌ها نیست، در حالی که یک جسم غیرزنده پیچیده تجمعی از مولکول‌ها، می‌باشد. بنابراین درک کامل از سیستم زنده نیاز به راهکارهای جامعی دارد و این امر تا به حال وظیفه آسانی نبوده است.

با این وجود، نقش فیزیک در زیست‌شناسی توسط گفته لئوژیلارد<sup>۳</sup> فیزیکدانی که بعدها دانشمند بیوفیزیک شناخته شد، تعیین گردید. او می‌گوید "آنچه که من در زیست‌شناسی بدست آوردم، نگرشی بود که طبق آن اسرار می‌توانند حل شوند و اگر رمزی وجود داشته باشد، آن رمز نیز باید قابل حل شدن باشد."

بنابراین، بیوفیزیک تلاشی به منظور توصیف سیستم‌های زنده بر اساس مفاهیم و قوانین فیزیکی است و صرفاً یک شاخه فرعی از بیولوژی مانند فیزیولوژی نیست که برای گروه‌هایی از سیستم‌ها یعنی سیستم‌های زنده بکار برده می‌شود. پرسش این است که آیا زیست‌شناسی قصد دارد که فیزیک در مفهومی حس شود که شیمی نیز به همان مفهوم احساس شده است. از آنجایی که این مفهوم هنوز بوسیله بیشتر فیزیکدانان تایید نشده است؛ آن‌ها معتقد نیستند که حیات می‌تواند در بعضی رموز بر قوانین فیزیک غلبه کند. می‌توان گفت پرسش بالا زمانی بهتر پاسخ داده می‌شود که ما درک درستی از حیات داشته باشیم.

---

1. M. Delbruck  
2. particle physicist  
3. Leo Szilard

## شیوه زندگی

زندگی چیست؟ هیچ پاسخ کوتاهی برای این پرسش وجود ندارد، هر چند می‌توان پرسش‌های متفاوتی را در این مطرح کرد. مشخصات موجود زنده کدام است یا کدام خصوصیات موجود زنده را از سیستم بی‌جان تمیز می‌دهند؟

- موجود زنده حداقل سه ویژگی زیر را نشان می‌دهد که آن را از سیستم بی‌جان متمایز می‌کند:
۱. موجود زنده از نظر ترمودینامیکی یک سیستم باز محسوب می‌شود که به طور دائم با محیط خود در ارتباط است؛ یعنی ماده و انرژی را برای بقای خود با محیط مبادله می‌کند.
  ۲. یک موجود زنده انرژی دریافت شده از محیط را گرفته و برای ساخت و نگهداری ساختار پیچیده خود از مولکول‌های ساده و نیز انجام کارهای مفید مانند حرکت، مورد استفاده قرار می‌دهد. این یک مرحله خود تنظیمی است که در طول مرحله تکامل رشد انتوژنیک<sup>۱</sup> حس می‌شود.
  ۳. آخرین و شاید مهم‌ترین ویژگی موجود زنده توانایی آن برای تولید دوباره خود است؛ خاصیتی که می‌تواند به‌عنوان جوهره<sup>۲</sup> سیستم زنده مطرح شود.

## حیات از آنتروپی منفی تغذیه می‌شود

یک واحد زنده تجمع ماکروسکوپی پیچیده‌ای از تعداد زیادی از مولکول‌های کوچک تا مولکول‌های بسیار بزرگ می‌باشد. چنین تجمعی چگونه می‌تواند به عنوان یک سیستم منظم باقی بماند؟ کدام قوانین اساسی فیزیک، روی فرآیندهای حیات تأثیر می‌گذارند؟ تلاش برای پاسخ دادن به چنین پرسش‌هایی، از نقطه نظر فیزیکی، برای اولین بار توسط اروین شرودینگر<sup>۲</sup> یکی از بنیان‌گذاران علم مکانیک کوانتوم، به صورت ملموس بیان گردید. شرودینگر این مطلب را در سال ۱۹۴۵ در کتاب "زندگی چیست؟" با این جملات بیان می‌کند:

"ویژگی مشخص زندگی چیست؟ چه زمانی، به ذره‌ای از یک ماده زنده گفته می‌شود؟ زمانی که آن ذره به صورت مدام اعمالی چون حرکت، تبادل ماده با محیط و غیره را انجام می‌دهد و تحت شرایط یکسان، برای مدت زمان بیشتری نسبت به آنچه که برای یک ماده بی‌جان قابل انتظار است، تداوم داشته باشد."

یعنی، بحث شرودینگر، برای یک سیستم پیچیده غیرزنده، در شرایط نزدیک به حالت تعادل که همه فعالیت‌های دینامیکی رشد در نهایت متوقف می‌شوند، به صورت ایزوله باقی بماند. یک سیستم زنده به طور ویژه برخلاف سیستم تعادل بی‌جان از کاهش سریع اجتناب می‌کند و در حالت غیرتعادلی ثابت باقی می‌ماند. زندگی چیزی غیر از فرآیندهایی نیست که به طور سیستماتیک یک حالت دینامیک، پایا و منظم را برای مدت زمان طولانی در مقیاس «ابعاد متوسط» حفظ می‌کند و این مهم‌ترین تفاوت بین سیستم زنده و غیرزنده است.

۱. Ontogenetic: مربوط به تاریخچه رشد و تکامل یک فرد در دوران حیات است.

2. Ontogeny: سیر تکاملی رشد و نمو موجود زنده از هنگام تشکیل تخم تا بلوغ را آنتوژنی (هستی‌زایی) گویند [مترجم].

2. Erwin Schrodinger

تحلیل استدلال‌های فیزیکی بالا منجر به این شد که شرودینگر روی اساس ترمودینامیکی سیستم زنده تأکید کند. بر طبق قانون دوم ترمودینامیک هر فرآیند، اتفاق، حادثه و به عبارتی هر چه که شما می‌خواهید و هر آنچه که در طبیعت اتفاق می‌افتد، بدین معنی است که افزایشی در بی‌نظمی آن قسمت از جهان در آن روی می‌دهد. از این رو، موجودات زنده از طریق فرآیندهای متعدد حیات، باید آنتروپی خود را افزایش داده و به سوی بی‌نظمی کامل (یا مرگ) پیش روند. در مقابل سیستم‌های زنده ظرفیت زنده‌ماندن در حالت آنتروپی پایین یا کاملاً منظم را نشان می‌دهند و این تنها در حالتی امکان‌پذیر است که سیستم‌ها همواره در حال مبادله و انتقال آنتروپی به محیط باشند. بنابراین، شرودینگر ادعا کرد: «سیستم زنده از آنتروپی منفی تغذیه می‌کند، وقتی که یک جریان از آنتروپی منفی روی آن باشد، برای جبران افزایش آنتروپی ایجاد شده توسط سیستم زنده خودش را در حالت آنتروپی نسبتاً پایین و ساکن نگه می‌دارد.»

تحلیل ترمودینامیکی حیات دورنمای تازه‌ای را هم برای نظم عملکردی مشاهده شده در سیستم‌های زنده و هم برای فرآیندهای تکاملی فراهم می‌کند. نظم عملکردی، به فرآیندهای تنظیمی حفظ حیات اشاره می‌کند. اکنون، درک بهتری از اساس فیزیکوشیمیایی متابولیسم و بیوانرژتیک وجود دارد. چگونه واکنش‌های شیمیایی جفت شده متعدد در سلول زنده (در چنین سرعت و زمانی) رخ می‌دهند؛ به طوری که پراکندگی انرژی به صورت بهینه کنترل می‌شود. به عبارت دیگر، بررسی جامعه ترمودینامیک سیستم‌های غیرتعادلی خاطر نشان می‌سازد که جریان پیوسته ماده و انرژی از محیط تحت شرایط معین، به طور خودبه‌خود در سیستم‌های زنده ساختارهای منظمی (مثل پروتئین و غیره) از مخلوط درهمی از مولکول‌های ساده ایجاد کند.

### ماشین زنده خودکار

موجود زنده، همانند ماشینی است که طبق طرح، توسط تکامل داروینی<sup>۱</sup>، برای رسیدن به اهداف خاصی ساخته شده است. یک موجود زنده یک ماشین خودکار نیست که تنها یک سری فعالیت‌های معین را انجام دهد، بلکه آن یک ماشین خودکار زنده است که به جهش‌ها و سازش‌ها<sup>۲</sup> دسترسی دارد. مسئله چگونگی کارکرد ماشین خودکار زنده از دیدگاه زیست مولکولی با کشف ساختار DNA، الگوی رمزدهی، مکانیسم انتقال رمزها در طی سنتز پروتئین و... و مکانیسم همانندسازی ماده ژنتیکی حل شد. [از میان کریک<sup>۳</sup>، واتسون<sup>۴</sup> و ویکینز<sup>۵</sup> که در سال ۱۹۶۲ به دلیل کشف ساختار DNA برنده جایزه نوبل شدند، کریک و ویکینز فیزیکدان‌هایی بودند که به بیوفیزیک روی آوردند. ولی گیلبرت<sup>۶</sup> که دانشمند فیزیک ذرات بود و در ابتدا با عبدالسلام<sup>۷</sup> کار می‌کرد، بعدها روش تعیین توالی بازهای DNA و تکنیک‌های DNA نوترکیب را مطالعه کرد. گیلبرت در نهایت در سال ۱۹۸۰ به دلیل مطالعاتش در زمینه بیوشیمی برنده جایزه نوبل شد].

1. Darwinian  
3. F. Crick  
5. M. wilkins  
7. Abdus Salam

2. Mutations and adaptations  
4. G. Watson  
6. W. Gilbert

در حالی که مطالعات فوق ماهیت دقیق نحوه رمزدی و انتقال اطلاعات در سیستم‌های زنده را نشان داد. اما تئوری ریاضی عملکرد چنین ماشین خودکاری توسط یک ریاضی‌دان و فیزیکدان برجسته، نیومن<sup>۱</sup>، آغاز شد. وی دریافت که در طول تکامل، موجودات نه تنها به تکثیر خود می‌پردازند، بلکه حتی موجودات زنده پیچیده‌تر از موجودات زنده با پیچیدگی کمتر یا ساده‌تر بوجود می‌آیند. این مطلب برای نیومن گیج‌کننده به نظر می‌رسید؛ چرا که وقتی که یک ماشین خودکار عملکردهای معینی را انجام می‌دهد انتظار بر این است که پیچیدگی آن عملکردها، کمتر از پیچیدگی خود ماشین خودکار باشد.

بویژه، اگر یک ماشین خودکار توانایی همانندسازی داشته باشد، در گذر از والد به سمت فرزند انتظار بر این است که پیچیدگی‌ها کاهش یابد. یعنی اگر  $A$  توانایی تولید  $B$  را داشته باشد، در این صورت  $A$  باید توصیف کاملی از  $B$  را دارا باشد. علاوه بر این به منظور اثربخشی به آن، باید آرایش‌های متنوعی در  $A$  وجود داشته باشد که این توصیف را تفسیر کرده و عملکردهای ساختاری آن را ایجاد کند.

نیومن رمز بالا را از طریق منطق ریاضی، اینگونه حل کرد که همانندسازی یک ماشین خودکار امکان‌پذیر می‌باشد. کار بیشتر توسط واینر<sup>۲</sup>، پدر علم سایبرنیک<sup>۳</sup>، صورت گرفت وی نه تنها کامپیوترها را به عنوان ماشین‌های خودکار اولیه توسعه داد، بلکه به طور همزمان مفهوم عملکرد دوگانه نورون‌ها را نیز فرمول‌بندی کرد. به ویژه آن‌که سیستم سوئیچی دوگانه خاموش و روشن که اساس فرآیندهای محاسباتی کامپیوترها را تشکیل می‌دهد در پاسخ همه یا هیچ فعالیت نورون‌ها نیز منعکس می‌شود. بنابراین، می‌بینیم در حالی که یک تئوری ریاضی کلی، ساختارها و مکانیسم‌های احتمالی یک ماشین خودکار زنده را به سادگی بیان می‌کند، در واقع به داشتن یک ساختار مولکولی و برهمکنش‌های فیزیکی شیمیایی درگیر در آن نیز اشاره می‌کند. این یکی از مهم‌ترین دست‌آوردهایی بوده که تأیید می‌کند فرآیندهای حیات حداقل با قوانین جامد شناخته شده ریاضی و فیزیک ناسازگاری ندارد.

### نظم ناشی از بی‌نظمی

سومین ویژگی کلی فرآیندهای حیات شامل این پرسش است که کدام قوانین فیزیکی می‌تواند تشکیل ساختارهای منظم ناشی از تجمع بی‌نظمی مولکول‌ها را در طی آنتوژنسیز<sup>۴</sup> یا در طول دوره پیش‌زیستی<sup>۵</sup> تکامل توضیح دهد. این مطلب همچنین به‌عنوان موضوع خودتجمعی<sup>۶</sup> یا خودسازماندهی<sup>۷</sup> مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

1. J. Von Neumann  
3. Cybernetics

2. N. Wiener

۴. Ontogenesis: هستی‌زایی مجموعه فرایندهای رشد و تکوین از تخم لقاح یافته (زیگوت) یا تخم لقاح نیافته (در مورد بکرایی) تا جاندار کامل با بلوغ جنسی و قدرت تولیدمثل و بالاخره سیر قهقرایی اندامک‌ها تا هنگام مرگ طبیعی [مترجم].

5. Pre-biotic  
7. Self-organization

6. Self-assembly

در طول چند دهه اخیر، تلاش‌های زیادی برای فهمیدن رمز تکامل، خودسازماندهی و سازگاری صورت گرفته است تلاش‌ها برای حل کردن رمز از دیدگاه‌های مختلف انجام شده است. اما، هیچ چیز تاکنون مشخص نشده است. یک تصویر کلی که به نظر صحیح می‌آید، اینگونه می‌باشد؛ نظم زیستی به صورت بخشی از نظم خودبه‌خودی است که از ناپایداری سیستم‌های باز ترمودینامیکی و سیستم‌های دور از تعادل ترمودینامیکی (بی‌نظم) ناشی می‌شود. در این نظم خودبه‌خودی، انتخاب<sup>۱</sup> عمل می‌کند و از این رو تکامل در واقع اتحادی از انتخاب و خودتجمعی خودبخودی است.

پیشتر خاطر نشان کردیم که سیستم‌های ترمودینامیکی، سیستم بازی هستند که ماده و انرژی را با محیط مبادله می‌کنند. در طی شرایط حالت پایا، سیستم حالت غیرتعادلی خود را با ننگ داشتن خود در شرایط نزدیک به تعادل، تنظیم می‌کند. به عبارت دیگر تکامل توسط ناپایداری‌ها در سیستم تعیین می‌شود که به آن یک سیستم اسراف‌آمیز<sup>۲</sup> (پراکنده) گفته می‌شود.

تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های غیرتعادلی یک اندازه کمی از شرایط پایداری را به دست می‌دهد. تجزیه و تحلیل جزئیات نشان می‌دهد که اگر سیستم ناپایدارتر شود، ممکن است یک نظم دینامیکی را بدست آورد که در آن تجمع ذرات به صورت منسجم عمل می‌کند. کل فرآیند، معادل مرحله انتقال است که در آن سیستم قدیمی ناپایدار شده، ذوب و کریستاله شود و به سیستمی با نظم جدید تبدیل می‌شود.

علمی که با ناپایداری‌های سیستم‌های پراکنده که منجر به خودسازماندهی ساختارهای جدید می‌شود سرو کار دارد، سینرژتیک<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. در حالی که ترمودینامیک شرایط پایداری را تعیین می‌کند، وظیفه اصلی سینرژتیک در فرموله کردن مدل‌های ریاضی است که می‌تواند ظهور ساختارهای جدید را توضیح داده و بررسی کند. یکی از اولین مدل‌ها برای خودسازماندهی ماکرومولکول‌ها تکامل پیش‌زیستی توسط ایژن<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۱ ارائه شد. وی تلاش کرد خودتجمعی یک سیستم پراکنده را با در نظر گرفتن یک مکانیسم الگو توضیح دهد.

در مدل ایژن کلیه جنبه‌های حیات مثل ظهور نظم (همانندسازی)<sup>۴</sup> انتخاب آن (جهش‌پذیری)<sup>۵</sup> و بقای آن (متابولیسم)<sup>۶</sup> امکان‌پذیر هستند. در نتیجه، به نظر می‌رسد ترمودینامیک دور از حالت تعادلی و تئوری بی‌نظمی برخی از عمیق‌ترین رازهای حیات را فاش کرده باشند. به نظر می‌رسد، فعالیت خود تولیدمثلی یکی از ویژگی‌های ذاتی بی‌نظمی باشد. امروزه، عقیده بر این است که چنین فعالیت، نه تنها باعث ایجاد تکامل زیستی می‌شود، بلکه منجر به عملکرد منظم مغز نیز می‌شود.

## در این کتاب

موضوعات سایبرنتیک، دور از تعادل ترمودینامیکی و مطالعه مدل‌های سیستم‌های بی‌قاعد و بیان حداقل استفاده ریاضی در طبیعت می‌باشند. بنابراین، آن‌ها در کتاب حاضر مورد بحث قرار نگرفته‌اند.

1. Selection  
3. Synergetic  
5. Self-reproduction

2. Dissipative  
4. M. Eigen  
6. Metabolism



یعنی، از بین سه ویژگی اساسی حیات که در بالا ذکر شد، ما فقط موضوع حفظ حیات، یعنی حالت نزدیک به تعادل در سیستم‌های زنده، را در فصل ۹ بحث خواهیم کرد.

این کتاب به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول با قوانین فیزیکی مورد مطالعه سیستم‌های زنده مانند حرکت، جریان خون، تنفس، شنوایی و بینایی سروکار دارد. این فیزیولوژی به فیزیک فیزیولوژی نیز تأکید دارد. بخش دوم این کتاب، بیوفیزیک سلولی و ملکولی را بررسی می‌کند. این قسمت ماهیت فیزیکی مولکول‌های زیستی و تنظیم مفاهیم انرژی دینامیک حالت پایای سلول‌های زنده را بحث می‌کند. دو ویژگی اساسی فیزیکی فعالیت سلولی از جمله انتقال مواد از عرض غشای سلولی و انتقال پاسخ‌های عصبی به ترتیب در فصول ۸ و ۱۱ بحث خواهد شد (بخش سوم کتاب هم بر روی یک موضوع ویژه به نام تصویربرداری پزشکی متمرکز شده است).



بخش اول

بیوفیزیک سیستم‌ها







## بیومکانیک

بحث را با یکی از مهم‌ترین شاخه‌های بیوفیزیک، یعنی بیومکانیک، آغاز می‌کنیم. در بیومکانیک، تأثیر نیروهای مکانیکی (جاذبه، تغییر شکل‌های ارتجاعی یا اصطکاک) روی سیستم‌های زنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نیروها تعیین‌کننده حرکت جانوران در روی زمین، آب و یا هوا می‌باشند. آن‌ها همچنین باعث ایجاد اثرات ریخت‌زایی می‌گردند، که در تعیین رشد جهت‌دار گیاهان و تکامل اسکلت جانوران مؤثر می‌باشند.

تحرك در جانوران، به ویژه مهره‌داران، توسط شبکه پیچیده‌ای از ماهیچه‌ها، زردپی‌ها و استخوان‌ها که اجزای اصلی یک موجود زنده متحرک هستند، صورت می‌گیرد. این اجزا با هم در ارتباط بوده و به طور کاملاً هماهنگ، با هم کار می‌کنند به طوری که حرکت یک قسمت، طبق یک برنامه از قبل تعیین شده، قسمت‌های دیگر را به حرکت در می‌آورد. به عبارت دیگر، این اجزا یک زنجیر متحرک سازمان یافته را تشکیل می‌دهند. به طور طبیعی در صورتی می‌توانیم مکانیسم عمل یک ماشین متحرک را به طور کامل شناسایی کنیم که ساختار جزئی و نقش اجزای اساسی آن را درک نماییم. مطالعه مکانیسم‌های مولکولی را به بخش (ب) این کتاب موكول می‌کنیم. در این بخش ساختار کلی ماهیچه‌ها و استخوان‌ها را بیان کرده و خواهیم دید که آن‌ها چگونه در حین حرکت جانور با هم کار می‌کنند.

### ۱-۱ بیواستاتیک

مطالعه نیروهای مسئول برای تعادل مکانیکی استاتیک (غیر متحرک) یک سیستم زنده، موضوع علم بیواستاتیک<sup>۱</sup> را تشکیل می‌دهد. در سطح مولکولی تمام فعالیت‌های سلولی به طور پیوسته ادامه می‌یابد و سیستم هیچ وقت ساکن<sup>۲</sup> نیست مگر این‌که مرده باشد. بنابراین تعادل بیواستاتیکی یک ارگانیسم به طور کامل مورد بحث می‌باشد، برای مثال وضعیت تعادلی تمام بدن و یا حالتی را که یک دست برای نگهداشتن یک وزنه تجربه می‌کند در نظر می‌گیرد.

1. Biostatics

2. Stationary

### ۱-۱ الف نیروها و گشتاورها

یک سیستم زمانی در حالت تعادل استاتیکی باقی خواهد ماند که هم برآیند نیروها و هم برآیند گشتاور روی آن سیستم حول هر محور در آن صفر باشد. شرایط مطرح در مورد اول نشان می‌دهد که سیستم حرکت نمی‌کند (تعادل انتقالی)<sup>۱</sup>، در حالی که براساس شرایط مطرح در مورد دوم، می‌توان گفت که سیستم حول هیچ محوری نمی‌چرخد (تعادل چرخشی)، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0 \quad (1-1 \text{ الف})$$

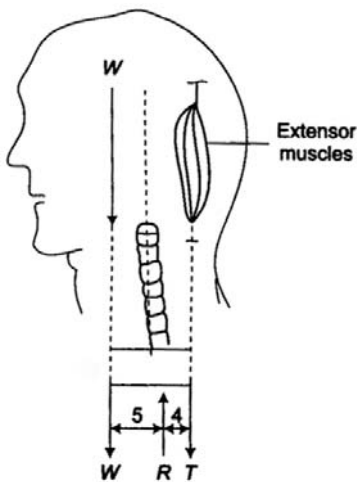
$$\sum \vec{\tau}_i = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \dots = 0 \quad (1-1 \text{ ب})$$

در اینجا  $\vec{F}_1$ ،  $\vec{F}_2$ ، ... و  $\vec{\tau}_1$ ،  $\vec{\tau}_2$ ، ... نیروها و گشتاورهای مختلف عمل‌کننده روی بدن هستند. به طور کلی، نیروها به علت وزن بار خارجی استخوان‌ها و ماهیچه‌ها و همچنین به دلیل کشیدگی و تنش‌ها در ماهیچه‌ها ایجاد می‌شوند. نوع تعادلی که بین آن‌ها وجود دارد، تعادل انتقالی<sup>۲</sup> را در موجود ایجاد می‌کند. نیروهای مشابه، گشتاورهایی را حول محورهای مفاصل استخوانی ایجاد کرده و باعث چرخش<sup>۳</sup> می‌شوند. تعادل چرخشی هنگامی به وجود می‌آید که گشتاور ایجاد شده توسط یک نیرو در جهت عکس گشتاور ایجاد شده توسط نیروی دیگر باشد.

مفاهیم فوق را با طرح چند مثال مربوط به انسان به عنوان یک سیستم مدل روشن خواهیم ساخت.

**مثال ۱-۱:** سر در روی استخوان‌های مهره گردن نگه داشته می‌شود و معادل نیروی وزن آن به وسیله

مهره گردن اعمال شده و سیستم متعادل می‌شود. برای ساکن نگه داشتن سر در موقعیت افراشته، کشیدگی در ماهیچه بازکننده<sup>۴</sup>، نیروی چرخشی معکوس مورد نیاز را ایجاد می‌کند. با فرض این که جرم کل سر ۴ کیلوگرم باشد، میزان کشیدگی در ماهیچه‌های بازکننده را پیدا کنید. برای ملاحظه ابعاد بکار گرفته شده به شکل ۱-۱ توجه نمایید.



شکل ۱-۱ مثال ۱-۱

جمعیه و استخوان‌های مهره گردن انسان از طریق یک مفصل مرکزی به هم متصل می‌شوند. از این رو سر می‌تواند حول محور مرکزی ستون مهره‌های گردن بچرخد. با وجود این، همان‌طور که در شکل ۱-۱ دیده می‌شود، مرکز ثقل سر در فاصله ۴ سانتی‌متری، جلوتر از محور مرکزی مهره گردنی قرار می‌گیرد. این موضوع موجب خم شدن سر به سمت جلو می‌شود مگر این‌که ماهیچه‌های بازکننده، چرخشی را در جهت مقابل ایجاد کنند. در حالتی که سر به

1. Translational equilibrium  
3. Torques

2. Rotational equilibrium  
4. Extensor

صورت افزایش یافته قرار دارد؛ مجموعه وزن سر، مفصل محوری و ماهیچه‌ها، اهرمی از نوع اول ایجاد می‌کنند. در این حالت تکیه‌گاه<sup>۱</sup> مهره گردنی است که بین وزن سر (نیروی محرک) و کشش ماهیچه‌ها (نیروی مقاوم) قرار می‌گیرد. برای ایجاد تعادل استاتیک در چنین سیستمی داریم:

$$W + T = R \quad (۲-۱الف)$$

$$W \times l_{WF} = T \times l_{TF} \quad (۲-۱ب)$$

معادله اول بیان می‌کند که برآیند نیروها صفر است. به عبارت دیگر وزن ( $W$ ) و کشش ماهیچه‌ها ( $T$ ) که به سمت پایین عمل می‌کنند، به وسیله نیروی عکس‌العمل  $R$  در محور اصلی متعادل می‌شوند. بر اساس معادله دوم برآیند چرخش نیروها حول محور چرخش، که می‌تواند به صورت خط عمود بر صفحه عبورکننده از ستون مهره‌های گردن در نظر گرفته شود، برابر صفر می‌باشد. از این رو مقدار کشش در ماهیچه برابر می‌شود با:

$$T = \frac{Mg \times l_{WF}}{l_{TF}} = \frac{۴ \times ۱۰ \times ۴ \times ۱۰^{-۲}}{۵ \times ۱۰^{-۲}} = ۳۲ \text{ N}$$

و نیروی عکس‌العمل برابر  $R = ۴۰ + ۳۲ = ۷۲ \text{ N}$  خواهد بود. اگر فرض کنیم که نیروی وارد شده بر روی مهره، (دیسکی به مساحت ۴ سانتیمترمربع)، به طور یکنواخت (که البته اینگونه نیست) اعمال گردد، آنگاه میزان فشار اعمال شده (نیروی وارد شده بر واحد سطح) به صورت زیر محاسبه خواهد گردید:

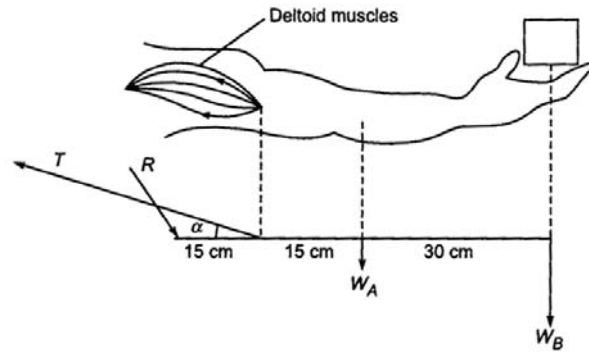
$$P = \frac{۷۲}{۴ \times ۱۰^{-۴}} = ۱۸ \times ۱۰^۴ = ۳۲ \text{ N/m}^۲$$

**مثال ۲-۱:** یک بازوی کشیده شده را نشان می‌دهد که به صورت افقی از شانه به وسیله ماهیچه دلتوئید<sup>۲</sup> نگه داشته شده است. اگر وزن بازو ۲/۵ کیلوگرم باشد، کشش مورد نیاز در ماهیچه برای نگه داشتن بازو به حالت کشیده و بالا نگهداشته چقدر است؟ فرض کنید مرکز جرم بازو در فاصله ۳۰ سانتی‌متری مفصل شانه قرار داشته باشد. با فرض اینکه کف دست حدود ۶۰ سانتی‌متر از شانه فاصله داشته باشد، برای شخصی که ۱۰ کیلوگرم بار در دست دارد، کشش چقدر خواهد بود؟

در بدن انسان همواره مجموعه‌ای از استخوان‌ها و ماهیچه‌ها وجود دارند که به صورت اهرم نوع سوم عمل می‌کنند. در یک اهرم نوع سوم، نیروی محرک بین محل اعمال نیروی مقاوم و تکیه‌گاه وارد می‌شود. به‌عنوان مثال، زمانی که یک بازو به ارتفاع شانه بالا رفته باشد، استخوان فوقانی (استخوان بازو<sup>۳</sup>) که از طریق یک برآمدگی توپ مانند و مفصل کاسه‌ای با استخوان کتف مفصل شده است به طور آزادانه در حول آن دوران می‌کند. مفصل شانه به‌عنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند، در حالی که محل اعمال نیروی وزن بازو، مرکز گرانشی است که در نزدیکی آرنج بوده و در مثال فوق در فاصله ۳۰ سانتی‌متری تکیه‌گاه قرار دارد.

1. Fulcrum  
3. Humerus

2. Deltoid



شکل ۱-۲ مثال ۱-۲

چرخش ایجاد شده در نتیجه وزن بازو حول مفصل شانه با چرخش حاصل از کشش ایجاد شده در ماهیچه دلتوئید متعادل می‌گردد. ماهیچه دلتوئید به عنوان یک نخ رابط عمل می‌کند که از یک طرف به استخوان بازو و از طرف دیگر به شانه متصل شده است. زمانی که بازو به صورت افقی کشیده شود، ماهیچه دلتوئید با زاویه  $\alpha$  به صورت افقی، ( $14^\circ 30'$  در مثال فوق) خم می‌شود. از این رو درحالی که مؤلفه عمودی کشش ماهیچه در خلاف وزن بازو و گشتاور وابسته به آن عمل کند، مؤلفه افقی یک فشار طولی را روی استخوان بازو اعمال می‌کند.

علاوه بر این، نیروی عکس‌العمل  $R$  در مفصل کاسه‌ای وجود دارد که از طریق کتف روی بازو اثر می‌گذارد. مؤلفه عمودی  $R_V$  از سمت  $R$  به سمت پایین عمل می‌کند، در حالی که مؤلفه افقی  $R_H$  یک فشار طولی دیگر روی استخوان بازو اعمال می‌کند. معادلات تعادل استاتیک بازو عبارتند از:

$$W_A + R_V = T \sin \alpha \quad (3-الف)$$

$$W_A + l_{WF} = T \sin \alpha \times l_{TF} \quad (3-ب)$$

نیروی عکس‌العمل عبور کرده از تکیه‌گاه هیچ چرخشی حول آن ایجاد نمی‌کند. با حل معادله چرخش برای  $\alpha = 14^\circ 30'$  ( $\sin \alpha = 0.25$ )،  $l_{TF} = 15 \text{ cm}$ ،  $l_{WF} = 30 \text{ cm}$ ، میزان نیرو به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$T = \frac{2/5 \times 10 \times 30}{0.25 \times 15} = 2000 \text{ N}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$R_V = 2000 \times 0.25 - 2.5 \times 10 = 475 \text{ N}$$

به طور مشابه وقتی که وزنه  $W_B$  در دست نگه داشته شود، می‌توانیم کشیدگی را نیز به دست آوریم که این قسمت را به عنوان تمرین به شما واگذار می‌کنیم.



## ۱-۲ بیوفیزیک عضله

در بحث قبلی، نقش عضلات را به عنوان ماشین‌هایی نشان دادیم که از طریق انقباض، نیروی لازم برای ایجاد توازن بین نیروهای خارجی و گشتاورها و برقراری تعادل پایدار (استاتیک)، را فراهم می‌کنند. نیروها و گشتاورهای مشابه توسط عضلات نیز در طی حرکت به کار گرفته می‌شوند. از آنجایی که جانوران تنها از طریق منقبض کردن عضلات خود می‌توانند حرکت کنند؛ انقباض عضله، فرآیندی کلیدی در جابه‌جایی می‌باشد. بنابراین ضروری است به طور مختصر نگاهی به ساختار و عملکرد عضلات ببندیم.

بحث روی عضله را به یک سیستم و به طور کلی به یک ماشین محدود می‌کنیم که انرژی شیمیایی بدست آمده از غذا را به انرژی مکانیکی حرکتی تبدیل می‌کند. در این قسمت وارد جزئیات ساختار مولکولی یا عملکرد مولکولی این ماشین نمی‌شویم.

عضلات را می‌توان با توجه به نحوه مشاهده آن‌ها در زیر میکروسکوپ معمولی به دو دسته عضلات مخطط<sup>۱</sup> و صاف<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی نمود. عضلات اسکلتی<sup>۳</sup> که مکانیک بدن را کنترل می‌کنند، از نوع عضلات مخطط می‌باشند.

عضلات مخطط در حدود ۴۰ درصد وزن بدن انسان را تشکیل می‌دهند و به صورت یک بافت مجزا در بدن وجود دارند که از میلیون‌ها سلول طولی به نام فیبر تشکیل شده‌اند. فیبرهای عضلانی، هر کدام چند سانتی‌متر (بیش از ۴ سانتی‌متر) طول و بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر قطر دارند که در طول عضله امتداد می‌یابند. یک فیبر منفرد از چندین واحد موازی (تقریباً ۱۰۰۰) ساخته شده است که میوفیبریل نامیده می‌شوند و هر یک قطری به اندازه تقریبی ۱ میکرومتر دارند. هر میوفیبریل از تارهای ضخیمی (به قطر تقریبی ۱۵۰ آنگستروم) از جنس پروتئین میوزین و تارهای نازکی (به قطر تقریبی ۵۰ آنگستروم) از جنس پروتئین اکتین، ساخته شده است. در برش عرضی میوفیبریل هم تارهای میوزین و هم تارهای اکتین دیده می‌شوند که به فاصله کمی (کمتر از ۱۰۰ آنگستروم) در یک آرایش فوق‌العاده منظم قرار گرفته‌اند. تارهای ضخیم و نازک از نظر مکانیکی توسط پل‌های عرضی به هم متصل شده‌اند که شامل یک برآمدگی (بیرون‌زدگی) تار ضخیم به سمت تار نازک می‌باشد. زمانی که یک عضله منبسط یا منقبض می‌شود، تارهای میوزین و اکتین روی هم می‌لغزند (سر می‌خورند)، به طوری که طول هر فیبر عضله تغییر می‌کند (به شکل ۳-۱ مراجعه کنید).

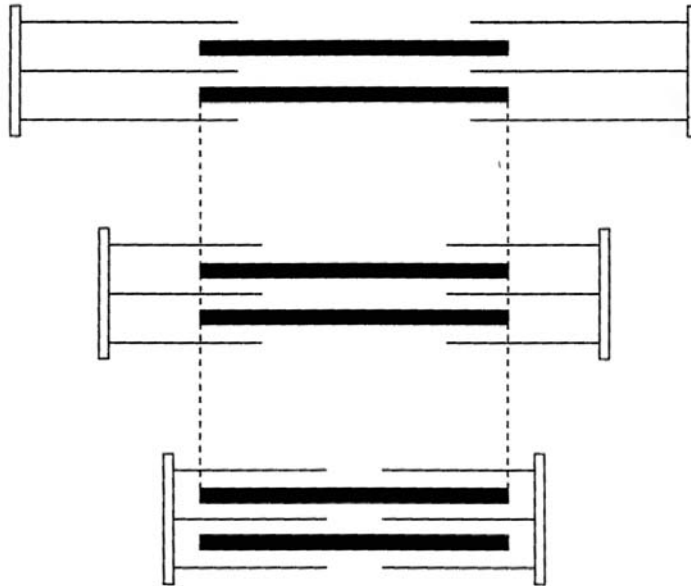
عضلات زمانی منقبض می‌شوند که تحت اثر یک فشار یا بار قرار بگیرند. آزمایش‌های صورت گرفته بر روی انقباض عضله، در دو حالت مختلف انجام می‌شوند. در حالت اول بار موجود بر روی عضله در طول زمان ثابت نگه داشته می‌شود، در این شرایط عضله منقبض شده و انقباض ایزوتونیک<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. در حالت دوم، دو انتهای عضله ثابت می‌گردد، به طوری که طول کلی آن‌ها امکان تغییر نداشته باشد، لذا انقباض صورت گرفته در این حالت، انقباض ایزومتریک<sup>۵</sup> نامیده می‌شود.

1.Striated  
3.Skeletal  
5.Isometric contraction

2.Smooth  
4.Isotonic contraction

در طی آزمایش‌های انقباض ایزومتریک، کشیدگی ایجاد شده از سوی عضلات در پاسخ به محرک خارجی ثبت می‌شود. در طی وضعیت تحرک، جابه‌جایی و غیره، عضلات تحت انقباض ایزوتونیک قرار می‌گیرند. مکانیک عضله به طور گسترده‌ای توسط هیل<sup>۱</sup> مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. براساس مشاهدات وی، زمانی که یک محرک خارجی مناسب به عضله اعمال می‌شود؛ در ابتدا، برای یک دوره زمانی کوتاه مدت که دوره نهفته (کمون<sup>۲</sup>) نامیده می‌شود، عضله پاسخ نمی‌دهد. بعد از این دوره نهفته، عضله شروع به منقبض شدن یا تکمیل کشیدگی می‌نماید. در انقباض ایزوتونیک، انقباض به سرعت شروع شده و سپس همگام با کوتاه شدن عضله، شدت انقباض نیز به تدریج کاهش می‌یابد. یک عضله می‌تواند در نهایت تا یک طول حداقلی ( $x_m$ ) منقبض شود. اگر طول عضله در هر لحظه برابر  $x$  باشد، این طول می‌تواند به اندازه  $(x-x_m)$  کوتاه‌تر شود. از نظر تجربی مشاهده شده است که میزان انقباض (سرعت منقبض شدن) در هر لحظه متناسب با طولی است که عضله می‌تواند قدری کوتاه‌تر شود، یعنی؛

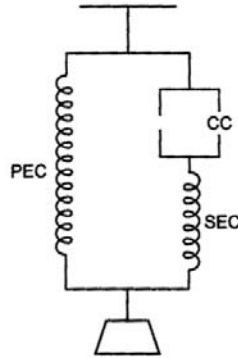
$$v = k(x-x_m) \quad (۱-۴)$$



**شکل ۳-۱** انقباض عضله بر طبق تئوری لغزش و سرخوردن تارها. انقباض عضله زمانی روی می‌دهد که تارهای نازک (اکتین) بین تارهای ضخیم (میوزین) سر بخورند. طول تارها کوتاه نشده بلکه روی یکدیگر می‌لغزند که این امر به علت نیروی حاصل از واکنش بین مولکول‌های اکتین و میوزین صورت می‌گیرد.

1. A.V.Hill

2.Latent



**شکل ۱-۴** عضله را می‌توان به طور مکانیکی به عنوان یک جزء قابل انقباض (CC) به موازات یک جزء کشسان (PEC) و به صورت متوالی متصل به یک جزء کشسان ثانویه (SEC) قرار داد. بافت‌های پیوندی، سارکولما و غیره به عنوان PEC عمل می‌کنند؛ در حالی که زردپی‌ها، مواد خط Z، بافت‌های پیوندی و غیره به عنوان SEC عمل می‌کنند.

بنابراین، زمانی که انقباض آغاز می‌شود سرعت زیاد است و به تدریج که انقباض به حداکثر شدت خود می‌رسد، به سمت صفر میل می‌کند. همچنین، مشاهده شده است که ثابت  $k$  به طور معکوس با بار خارجی  $P$  در ارتباط است. این به آن معنی است که اگر بار خارجی سنگین باشد، عضله به کندی منقبض می‌شود، در حالی که عضله برای بار خارجی سبک به سرعت منقبض می‌شود. معادله (۱-۴) را می‌توان با قرار دادن  $v = dx/dt$  و پس از انتگرال‌گیری، به صورت زیر حل نمود؛

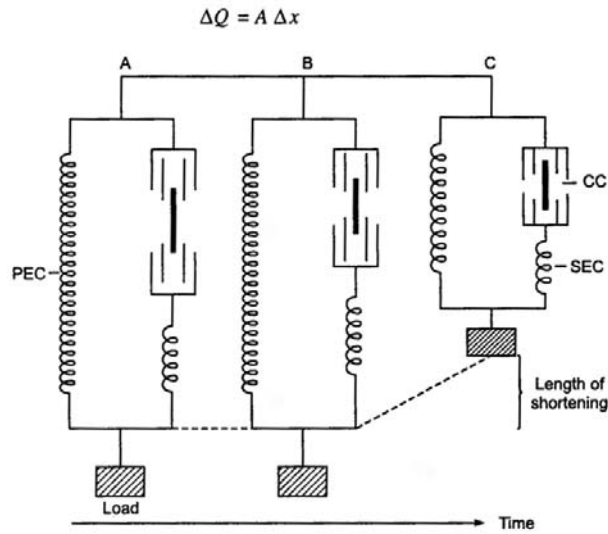
$$x = x_m + (x_0 - x_m)e^{-kt} \quad (1-5)$$

در اینجا  $x_0$  طول عضله در حال استراحت است (در زمان صفر،  $x = x_0$  است).  $k$  ثابت کوتاه شدن عضله نامیده می‌شود. بنابراین، می‌بینیم که کوتاه شدن عضله به صورت نمایی با زمان کند می‌شود.

## ۲-۱ الف توان عضله

عضله در فرآیند انقباض انرژی مصرف می‌کند. انرژی به دو روش مصرف می‌شود؛ بخشی از آن برای کار انجام شده در حین بلند کردن یک بار انجام می‌شود و بخش دیگر آن به صورت گرما آزاد می‌شود. بخش اول شامل جابه‌جایی ماکروسکوپی یک جسم در جهت عکس نیروی جاذبه است و بخش دوم، دینامیک مولکولی را شامل می‌شود. بنابراین، در حال حاضر می‌توان آن را فقط از طریق داده‌های تجربی حدس زد. مشاهده شده است که مقدار گرمای پخش شده در طی انقباض عضلانی، متناسب با میزان سرعت انقباض، یعنی  $\Delta x$  می‌باشد. بنابراین گرمای آزاد شده در طی انقباض عضلانی از طریق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\Delta Q = A \Delta x \quad (1-6)$$



**شکل ۵-۱** مکانیک انقباض عضله. زمانی که نیروی وزنی اعمال می‌شود، تارهای لغزنده عضله موجب کشیدگی SEC می‌شوند. همچنان که SEC تا مرحله B کشیدگی پیدا می‌کند یعنی زمانی که فشار با وزن برابر می‌شود، کشش نیز افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر انقباض عضلانی، باعث کوتاه شدن EC و بلند کردن وزنه می‌گردد. انقباض بین A و B ایزومتریک و انقباض بین B و C ایزوتونیک است.

در اینجا A یک ثابت تجربی است. از طرف دیگر، کار انجام شده برای بلند کردن یک وزنه با جرم مؤثر M به فاصله  $\Delta x$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta W = Mg \Delta x \quad (1-7)$$

بنابراین، کل انرژی مصرف شده توسط عضله بدین صورت به دست می‌آید:

$$\Delta E = (A + Mg) \Delta x \quad (1-8)$$

توان عضله، انرژی مصرف شده در واحد زمان است. یعنی:

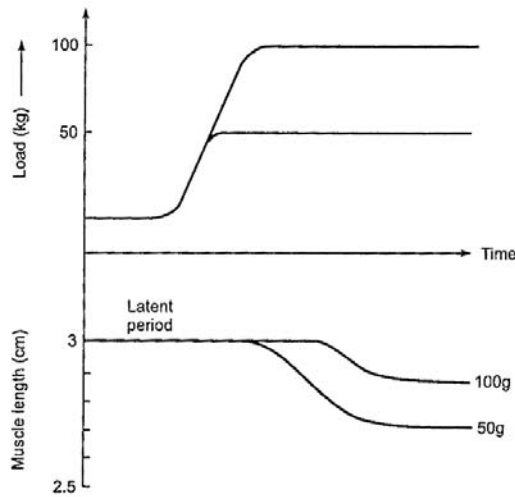
$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = (A + Mg) \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1-8)$$

$$= (A + Mg) v \quad (1-9)$$

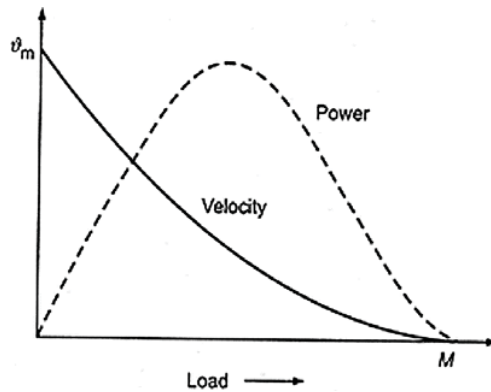
در اینجا  $\Delta t$  زمانی است که طول می‌کشد تا عضله به اندازه  $\Delta x$  منقبض شود. توجه داشته باشید که سرعت انقباض v در معادله بالا به موقعیتی اشاره دارد که وزنه M پیشاپیش به عضله چسبیده باشد. سرعت عضله در غیاب وزنه در بالاترین حد خود است و اگر وزن وزنه M به مقدار بحرانی  $M_0$  برسد، سرعت عضله صفر می‌شود (یعنی، عضله می‌تواند وزنه بیشتر از  $M_0$  را تحمل کند ولی

نمی‌تواند آن را بلند کند). بعلاوه هیل مشاهده کرد که قدرت ایجاد شده در عضله، به اختلاف بین بیشترین باری که می‌تواند بلند کند و باری مؤثری که روی آن اعمال می‌شود، بستگی دارد، یعنی:

$$P = B (M_0 - M) g \quad (1-10)$$



شکل ۱-۶ ایجاد نیرو و تغییر طول عضله در حین انقباض ایزوتونیک. کمترین کشش مورد نیاز در عضله، در پاسخ به بار خارجی، در طی دوره نهفته (کمون) ایجاد می‌شود. بعد از این لحظه، عضله به صورت نمایی در زمان کوتاه می‌گردد. میزان کوتاه شدن برای بار کوچکتر، بیشتر است.



شکل ۱-۷ خط تیره، سرعت کوتاه شدگی عضله را نسبت به بار اعمال شده نشان می‌دهد. این سرعت،  $v_m$ ، برای بار صفر بیشترین مقدار و برای بار  $M_0$  در شرایط بحرانی به صفر می‌رسد. منحنی نقطه چین نشان می‌دهد که توان ایجاد شده توسط عضله با افزایش بار زیاد می‌شود.

$B$  در معادله ۱-۱۰ یک عدد ثابت است. با ترکیب معادلات (۱-۱۰) و (۱-۹) رابطه‌های زیر بدست می‌آیند:

$$(A + Mg)v = B(M_0 - M)g$$

$$(A + Mg)(v + B) = (A + M_0g)B \quad \text{یا}$$

بر اساس معادله بالا، محصول نیرو- سرعت؛  $(A + Mg)(v + B)$  برای حالات ( $M = M_0$  و  $v = 0$ ) یک مقدار ثابت است که در حقیقت به عنوان معادله پایه انقباض عضلانی خوانده می‌شود:

$$(A + Mg)(v + B) = \text{عدد ثابت} \quad (1-11)$$

این معادله مؤید مطلبی است که پیشتر به آن اشاره کردیم و آن این‌که سرعت انقباض عضله با بار اعمال شده رابطه عکس دارد معادله فوق گاهی به عنوان قانون بقای اندازه حرکت نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

$$(\alpha + M)(v + B) = \text{عدد ثابت} \quad (1-12)$$

در اینجا  $\alpha = A/g$  است، یعنی عضله به نحوی کوتاه می‌شود که میزان اندازه حرکت افزایش یافته در سیستم وزنه- ماهیچه‌ای، ثابت باقی بماند.

## ۲-۱ توان ماهیچه‌ای جرم مخصوص

کار انجام شده توسط یک عضله، به ازای واحد جرم آن، کار ماهیچه‌ای جرم مخصوص نامیده می‌شود. میزان کار انجام شده توسط جرم مخصوص عضله، توان ماهیچه‌ای جرم مخصوص خوانده می‌شود. اگر کار انجام شده توسط جرم ویژه عضله  $E_m$  باشد، آنگاه کل کار انجام شده از طریق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$E = m E_m \quad (1-13)$$

در اینجا  $m$  جرم عضله است. در حین حرکت این کار، به انرژی جنبشی کل توده بدن با جرم ( $M$ ) تبدیل می‌شود. بنابراین، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$mE_m = \frac{1}{2}MV^2 \quad (1-14)$$

$$E_m = \frac{1}{2} \frac{M}{m} V^2$$

در اینجا  $V$  میانگین سرعت ثابت جانور است. با شروع از حالت استراحت، اگر حیوان نیازمند به حصول این سرعت در زمان  $t$  باشد، آنگاه توان ماهیچه‌ای جرم مخصوص از فرمول زیر به دست می‌آید: