

فیزیولوژی پزشکی گایتون و هال (جلد ۱)

تألیف

دکتر مایکل ای. هال

دانشیار دپارتمان پزشکی، بخش بیماری‌های قلبی - عروقی
نایب رئیس پژوهش در دپارتمان فیزیولوژی و بیوفیزیک
مرکز پزشکی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی جکسن، می‌سی‌سی‌پی

دکتر جان ای. هال

استاد ممتاز و رئیس بخش فیزیولوژی و بیوفیزیک
مرکز پزشکی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی
جکسن می‌سی‌سی‌پی

ترجمه

دکتر پروین بابایی

استاد فیزیولوژی دانشگاه علوم پزشکی گیلان

دکتر عادلہ جعفری

دانشیار گروه فیزیولوژی دانشگاه علوم پزشکی گیلان

دکتر بهروز خاکپور طالقانی

دانشیار گروه فیزیولوژی دانشگاه علوم پزشکی گیلان

دکتر محمد رستم‌پور واجاری

دانشیار گروه فیزیولوژی دانشگاه علوم پزشکی گیلان

دکتر عبدالحسین ستوده‌نیا

دکتر پریشاد قوام

دکتر معصومه گلستان جهرمی

با مقدمه

دکتر پروین بابایی

جلد اول

الکتروکاردیوگرافی..... ۲۱۱	بخش ۱. مقدمه فیزیولوژی: سلول و فیزیولوژی
	عمومی ۱۳
	فصل ۱ سازماندهی عملکردی بدن انسان و تنظیم «محیط داخلی»..... ۱۵
	فصل ۲ سلول و اعمال آن ۲۷
	فصل ۳ کنترل ژنتیکی ساخت پروتئین، عملکرد سلول، و تولیدمثل سلولی ۴۹
	بخش ۲. فیزیولوژی غشا، عصب و عضله ۷۳
	فصل ۴ انتقال مواد از خلال غشاء سلولی..... ۷۵
	فصل ۵ پتانسیل غشا و پتانسیل عمل..... ۹۱
	فصل ۶ انقباض عضله اسکلتی..... ۱۱۱
	فصل ۷ تحریک عضله اسکلتی: انتقال عصبی - عضلانی و جفت شدن تحریک - انقباض..... ۱۳۱
	فصل ۸ تحریک و انقباض عضله صاف..... ۱۴۳
	بخش ۳. قلب ۱۵۵
	فصل ۹ عضله قلبی؛ قلب به عنوان یک پمپ و عملکرد دریچه‌های قلبی..... ۱۵۷
	فصل ۱۰ تحریک ریتمیک قلب ۱۷۵
	فصل ۱۱ اصول الکتروکاردیوگرافی..... ۱۸۳
	فصل ۱۲ تفسیر اختلالات عضله قلبی و جریان خون کرونر به کمک الکتروکاردیوگرافی: تحلیل بُرداری . ۱۹۳
	فصل ۱۳ آریتمی‌های قلبی و تفسیر آنها به کمک
بخش ۴. گردش خون ۲۲۷	
فصل ۱۴ کلیات گردش خون؛ بیوفیزیک فشار، جریان و مقاومت ۲۲۹	
فصل ۱۵ قابلیت اتساع عروق و عملکردهای سیستم‌های شریانی و وریدی ۲۴۳	
فصل ۱۶ گردش خون در عروق کوچک و دستگاه لنفاوی: تبادل مایع در مویرگ‌ها، مایع بین‌سلولی، و جریان لنف ۲۵۷	
فصل ۱۷ کنترل موضعی و هومورال جریان خون بافت‌ها..... ۲۷۳	
فصل ۱۸ تنظیم عصبی گردش خون و تنظیم سریع فشار شریانی..... ۲۸۹	
فصل ۱۹ نقش کلیه‌ها در تنظیم درازمدت فشار شریانی و در فشارخون بالا: نظام یکپارچه برای تنظیم فشار شریانی..... ۳۰۳	
فصل ۲۰ برون‌ده قلبی، بازگشت وریدی و تنظیم آنها.. ۳۲۵	
فصل ۲۱ جریان خون عضلات و برون‌ده قلبی هنگام ورزش؛ گردش خون کرونر و بیماری ایسکمیک قلب ۳۴۳	
فصل ۲۲ نارسایی قلبی..... ۳۵۷	
فصل ۲۳ دریچه‌های قلب و صدهای قلب؛ دینامیک اختلالات مادرزادی و دریچه‌ای قلب ۳۷۱	
فصل ۲۴ شوک گردش خون و درمان آن ۳۸۳	

التهاب ۵۹۱

فصل ۳۵ مقاومت بدن در برابر عفونت: II. ۶۰۵

ایمنی و آلرژی ۶۰۵

فصل ۳۶ گروه‌های خونی؛ انتقال خون؛ پیوند بافت‌ها و اعضاء ۶۲۳

فصل ۳۷ هموستاز و انعقاد خون ۶۳۱

بخش ۷. تنفس ۶۴۹

فصل ۳۸ تهویه ریوی ۶۵۱

فصل ۳۹ گردش خون ریوی، ادم ریوی، و مایع جنب ۶۶۷

فصل ۴۰ اصول جابجایی گاز؛ انتشار اکسیژن و دی‌اکسید کربن از میان غشاء تنفسی ۶۷۷

فصل ۴۱ انتقال اکسیژن و دی‌اکسید کربن در خون و مایعات بافتی ۶۹۱

فصل ۴۲ تنظیم تنفس ۷۰۶

فصل ۴۳ نارسایی تنفسی - پاتوفیزیولوژی، تشخیص، اکسیژن درمانی ۷۲۱

نمایه ۷۳۳

بخش ۵. مایعات بدن و کلیه‌ها ۳۹۵

فصل ۲۵ بخش‌های مایع بدن؛ مایعات خارج سلولی و داخل سلولی؛ ادم ۳۹۷

فصل ۲۶ دستگاه ادراری؛ آناتومی کاربردی و تشکیل ادرار توسط کلیه‌ها ۴۱۹

فصل ۲۷ پالایش گلوامرولی، جریان خون کلیوی و تنظیم آنها ۴۳۳

فصل ۲۸ باز جذب و ترشح در توبول‌های کلیه ۴۴۹

فصل ۲۹ غلیظ و رقیق‌سازی ادرار؛ تنظیم اسمولاریته و غلظت سدیم مایع خارج سلولی ۴۷۹

فصل ۳۰ تنظیم کلیوی پتاسیم، کلسیم، فسفات و منیزیم؛ همکاری مکانیسم‌های کلیوی برای کنترل حجم خون و حجم مایع خارج سلولی ۵۰۲

فصل ۳۱ تنظیم اسید - باز ۵۲۷

فصل ۳۲ بیماری‌های کلیه و دیورتیک‌ها ۵۵۳

بخش ۶. سلول‌های خون، ایمنی، و انعقاد خون .. ۵۷۵

فصل ۳۳ گلبول‌های قرمز خون، کم‌خونی، و پلی‌سیتمی ۵۷۷

فصل ۳۴ مقاومت بدن در برابر عفونت: I. لکوسیت‌ها، گرانولوسیت‌ها، سیستم مونوسیت - ماکروفاژ، و

جلد دوم

فصل ۴۸ حواس پیکری: I. سازماندهی کلی، حس‌های لامسه و موقعیت

فصل ۴۹ حس‌های پیکری: II. حس‌های درد، سردرد و حرارت

بخش ۱۰. سیستم عصبی: حواس خاص

فصل ۵۰ چشم: I. اپتیک بینایی

فصل ۵۱ چشم: II. اعمال گیرنده‌ای و ...

فصل ۵۲ چشم: III. نوروفیزیولوژی مرکزی بینایی

فصل ۵۳ حس شنوایی

فصل ۵۴ حواس شیمیایی - چشایی و بویایی

بخش ۸. فیزیولوژی هوانوردی، فضاوردی و غواصی در اعماق دریا

فصل ۴۴ فیزیولوژی هوانوردی، ارتفاعات و فضاوردی

فصل ۴۵ فیزیولوژی غواصی در اعماق دریا و سایر شرایط پرفشار

بخش ۹. سیستم عصبی: اصول کلی و فیزیولوژی حسی

فصل ۴۶ سازماندهی سیستم عصبی، وظایف اصلی سیناپس‌ها و پیام‌رسان‌های عصبی

فصل ۴۷ گیرنده‌های حسی، مدارهای نورونی برای پردازش اطلاعات

بخش ۱۱. سیستم عصبی: نوروفیزیولوژی حرکتی و انسجمی اعصاب

- فصل ۵۵ اعمال حرکتی طناب نخاعی؛ رفلکس‌های نخاعی
- فصل ۵۶ کنترل عملکرد حرکتی توسط قشر مغز و ساقه مغز
- فصل ۵۷ مشارکت مخچه و هسته‌های قاعده‌ای در کنترل کلی حرکت
- فصل ۵۸ قشر مغز، اعمال فکری مغز، یادگیری و حافظه
- فصل ۵۹ مکانیسم‌های رفتاری و انگیزشی مغز - دستگاه لیمبیک و هیپوتالاموس
- فصل ۶۰ حالات فعالیت مغز، خواب، امواج مغزی، صرع، روان‌پریشی
- فصل ۶۱ دستگاه عصبی خودکار و قسمت مرکزی غده فوق‌کلیه
- فصل ۶۲ جریان خون مغز، مایع مغزی - نخاعی، و متابولیسم مغز

بخش ۱۲. فیزیولوژی دستگاه گوارش

- فصل ۶۳ اصول کلی عملکرد دستگاه گوارش (حرکات، تنظیم عصبی و گردش خون)
- فصل ۶۴ حرکت و مخلوط شدن مواد غذایی در دستگاه گوارش
- فصل ۶۵ وظایف ترشحات دستگاه گوارش
- فصل ۶۶ هضم و جذب در دستگاه گوارش
- فصل ۶۷ فیزیولوژی اختلالات گوارشی

بخش ۱۳. متابولیسم و تنظیم درجه حرارت

- فصل ۶۸ متابولیسم کربوهیدرات‌ها و تولید ATP

فصل ۶۹ متابولیسم چربی‌ها

فصل ۷۰ متابولیسم پروتئین‌ها

فصل ۷۱ کبد

فصل ۷۲ تعادل در رژیم غذایی؛ تنظیم غذاخوردن؛ چاقی و

گرسنگی؛ ویتامین‌ها و مواد معدنی

فصل ۷۳ تولید انرژی و سرعت متابولیسم

فصل ۷۴ تنظیم درجه حرارت بدن و تب

بخش ۱۴. غددشناسی و تولیدمثل

فصل ۷۵ مقدمه‌ای بر غدد درون‌ریز

فصل ۷۶ هورمون‌های هیپوفیز و نقش هیپوتالاموس در

تنظیم آنها

فصل ۷۷ هورمون‌های متابولیک تیروئید

فصل ۷۸ هورمون‌های قشر آدرنال

فصل ۷۹ انسولین، گلوکاکون، و دیابت

فصل ۸۰ هورمون‌های پاراتیروئید، کلسی‌تونین، متابولیسم

کلسیم و فسفات، ویتامین D، استخوان‌ها

و دندان‌ها

فصل ۸۱ دستگاه تناسلی مذکر (و غده صنوبری)

فصل ۸۲ فیزیولوژی زنان پیش از بارداری و هورمون‌های

زنان

فصل ۸۳ بارداری و شیردهی

فصل ۸۴ فیزیولوژی جنین و نوزاد

بخش ۱۵. فیزیولوژی ورزش

فصل ۸۵ فیزیولوژی ورزش

مقدمه

به صورت سیستمی یکپارچه و هماهنگ با الگوی درون‌تنی بنگرد، و از پرداختن به جزئیات سلولی مولکولی پرهیز گردد. همچنین در فصول مختلف کتاب، تلاش شده تا آموزش مفاهیم پایه‌ای فیزیولوژی، با ارائه مثال‌های بالینی برای دانشجویان رشته پزشکی کاربردی تر گردد. از دیگر ویژگی‌های کتاب، روان و ساده بودن نگارش آن می‌باشد تا بتواند با ایجاد شوق و هیجان در دانشجویان، آنان را برای درک چگونگی کارکرد سیستم‌های پیچیده بدن آماده سازد.

در خاتمه ضمن تشکر و سپاس از همکاران و اساتید مجربی که زحمت ترجمه چاپ جدید کتاب را کشیده‌اند، و نیز انتشارات کتاب ارجمنند، به خوانندگان عزیز یادآور می‌شود که ممکن است نقایصی در ترجمه یا نگارش فارسی مشاهده نمایند، که با تذکر و یادآوری اساتید و دانشجویان عزیز قابل رفع و اصلاح می‌باشد.

دکتر پروین بابایی

استاد فیزیولوژی دانشگاه علوم پزشکی گیلان

شناسایی مکانیسم‌ها و چگونگی عملکرد دستگاه‌های بدن در قالب علم فیزیولوژی، اساس و پایه رشته‌های پزشکی، داروسازی، دندانپزشکی، پیراپزشکی و بسیاری از زیرشاخه‌های علوم زیستی است. امروزه با پیشرفت سریع تکنولوژی در علوم سلولی مولکولی، ابعاد جدیدی از ناشناخته‌های عملکردی بدن انسان کشف می‌گردد و به تبع آن علم فیزیولوژی نیز با سرعتی شگرف در حال دگرگونی است. به دلیل ماهیت پیچیده سیستم‌های عملکردی و تنظیم‌کننده بدن، این شاخه از علوم زیستی با برخورداری از نتایج دستاوردهای علمی پژوهش‌های دیگر علوم نوین از جایگاه راهبردی و ویژه‌ای در سلامت انسان برخوردار است.

در میان انبوه کتب و درسنامه‌های فیزیولوژی، کتاب ارزشمند فیزیولوژی پزشکی گایتون سال‌هاست به عنوان منبع اصلی و اثری ارزشمند و جامع مورد استفاده دانشجویان رشته‌های مختلف پزشکی، پیراپزشکی و علوم زیستی داخل و خارج کشور قرار گرفته است. از آنجاکه جهت آموزش مؤثر فیزیولوژی لزوم مطابقت و تناسب کتاب با اهداف آموزشی و طول دوره تحصیلی فراگیران بسیار مهم است، این کتاب به گونه‌ای نگارش شده است که به عملکرد بدن

پیشگفتار

مربوط به عملکرد بدن هستند. پیشرفت در حوزه فیزیولوژی مولکولی و سلولی ما را قادر ساخته که اصول فیزیولوژی را هرچه بیشتر در قالب اصطلاحات مولکولی و علوم فیزیکی بیان کنیم تا صرفاً مجموعه‌ای از پدیده‌های زیستی مجزا و توجیه‌ناپذیر به نظر نرسند. با این حال، رخدادهای مولکولی‌ای که عملکرد سلول‌های بدن را ممکن می‌کنند قادرند صرفاً بخشی از فیزیولوژی انسان را توضیح دهند. کارکرد کلی بدن انسان مستلزم سیستم‌های کنترلی پیچیده‌ای است که با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و کارکردهای مولکولی سلول‌های بدن، بافت‌ها و اعضا را در هنگام سلامت و بیماری هماهنگ می‌کنند.

درسنامه فیزیولوژی پزشکی قصد ندارد مانند مرجع تمامی پیشرفت‌های تازه را در حوزه فیزیولوژی به خوانندگان عرضه کند. بلکه کتابی است که به طور ویژه برای استفاده دانشجویان تهیه شده است. این کتاب بر اصول پایه‌ای فیزیولوژی تمرکز می‌کند که برای آغاز فعالیت در حوزه‌های مختلف سلامت (نظیر پزشکی، دندان پزشکی و پرستاری و همچنین تحصیلات تکمیلی در علوم زیستی و بهداشت) ضرورت دارد. همچنین، می‌تواند برای آن دسته از پزشکان و متخصصان حوزه سلامت که می‌خواهند مروری کلی بر اصول پایه‌ای مورد نیاز برای درک پاتوفیزیولوژی بیماری‌های انسان داشته باشند مفید واقع شود. تلاش کرده‌ایم در این ویرایش جدید نیز سازمان‌دهی یکپارچه کتاب را که در گذشته بسیار برای دانشجویان مفید بوده است حفظ کنیم و

نخستین ویراست درسنامه فیزیولوژی پزشکی تقریباً ۶۵ سال پیش توسط آرتور سی. گایتون نگاشته شد. برخلاف بسیاری از درسنامه‌های حجیم پزشکی که اغلب بیش از ۲۰ مؤلف دارند، هشت ویراست نخست درسنامه فیزیولوژی پزشکی تماماً توسط دکتر گایتون نگاشته شد. دکتر گایتون از این موهبت برخوردار بود که می‌توانست مفاهیم پیچیده فیزیولوژی را منتقل کند و آموختن این مفاهیم را به فعالیتی نشاط‌انگیز تبدیل کند. هدف اصلی او در هر ویراست، کمک به دانشجویان برای یادگیری فیزیولوژی بود، نه تحت تأثیر قرار دادن همکاران حرفه‌ای خود.

دکتر جان هال به مدت ۳۰ سال از نزدیک با دکتر گایتون همکاری داشت و افتخار این را داشت که بخش‌هایی از ویراست‌های نهم و دهم را بنویسد و همچنین مسئولیت تکمیل ویراست‌های بعدی را نیز بر عهده گرفت.

دکتر مایکل هال نیز در آماده‌سازی ویراست چهاردهم درسنامه فیزیولوژی پزشکی همکاری داشته است. او پزشکی است که در حوزه طب داخلی، کاردیولوژی و فیزیولوژی تخصص کسب کرده و با خود بینش عمیقی را به این کتاب آورده است که باعث شده هدف ویراست‌های پیشین در این ویراست نیز محقق شود - یعنی توضیح چگونگی همکاری سلول‌ها، بافت‌ها و اعضای بدن انسان برای حفظ حیات به زبانی قابل فهم برای دانشجویان.

این تکلیف هم دشوار و هم هیجان‌انگیز است، زیرا محققان همواره در حال گشودن رمز و رازهای

آن را چنان کامل کنیم که در آینده نیز مورد استفاده متخصصان حوزه سلامت قرار گیرد.

امید داریم که درسنامه فیزیولوژی پزشکی بتواند عظمت بدن انسان و کارکردهای مختلف آن را به خوانندگان شناساند و دانشجویان را تشویق کند تا در آینده به مطالعه بیشتر در حوزه فیزیولوژی بپردازند. فیزیولوژی میان علوم پایه و پزشکی ارتباط برقرار می‌کند. زیبایی علم فیزیولوژی در آن است که کارکردهای مجزای تک تک سلول‌ها، بافت‌ها و اعضای بدن را ادغام کرده و در قالب کلیتی به نام بدن انسان ارائه می‌دهد. در واقع، بدن انسان چیزی فراتر از مجموع اجزاء آن است و حیات نیز نه به کارکرد اعضای مختلف بدن به طور مجزا، بلکه به کلیت آنها در کنار یکدیگر، وابسته است.

این نکته ما را به پرسشی مهم رهنمون می‌کند: اعضا و سیستم‌های مجزای بدن چگونه با یکدیگر هماهنگ می‌شوند تا عملکرد مناسب بدن را تضمین کنند؟ خوشبختانه بدن ما به شبکه وسیعی از کنترل‌های فیدبک مجهز شده که تعادل لازم را برای آن به ارمغان می‌آورند، تعادلی که بدون آن نمی‌توانستیم به زندگی ادامه دهیم. فیزیولوژیست‌ها به این سطح عالی کنترل داخلی بدن، هومئوستاز (اعتدال حیاتی) می‌گویند. در حالت‌های مرضی، تعادل‌های عملکردی اغلب با اشکالات جدی مواجه شده و هومئوستاز مختل می‌شود. و حتی اگر یک اختلال منفرد به حد معینی برسد، کل بدن دیگر قادر به زندگی نخواهد بود. پس، یکی از اهداف این درسنامه تأکید بر کارایی و زیبایی مکانیسم‌های هومئوستاز بدن و نیز معرفی عملکرد غیر طبیعی در هنگامی بیماری است.

هدف دیگر آن بود که تا حد امکان مطالب کتاب صحیح و دقیق باشند. پیشنهادها و نقدهای بسیاری از فیزیولوژیست‌ها، دانشجویان و بالینگران سرتاسر جهان خوانده شد و برای بررسی صحت مطالب و تطابق با حقیقت و نیز تعادل آنها مورد استفاده قرار گرفت. با این حال، به دلیل احتمال خطا در مرتب کردن هزاران هزار نکته، باز هم از همه خوانندگان تمنا دارم نظرات خود را در باب خطاها و بی‌دقتی‌ها ارسال دارند. فیزیولوژیست‌ها می‌دانند فیدبک تا چه حد برای عملکرد صحیح بدن انسان ضروری است،

بنابراین برای پیشرفت مداوم یک درسنامه فیزیولوژی هم فیدبک اهمیت دارد. از افراد زیادی که قبلاً به ما یاری رسانده‌اند صمیمانه سپاسگزاریم.

توضیح مختصری درباره چندین ویژگی ویراست چهاردهم ضروری است. هرچند بسیاری از فصل‌ها بازنگری شده‌اند تا اصول نوین فیزیولوژی در آنها گنجانده شود، اما به دقت کوشیده‌ایم حجم کتاب محدود بماند تا به‌طور مؤثری برای درس فیزیولوژی دانشجویان پزشکی و رشته‌های بهداشت قابل استفاده باشد. بسیاری از تصاویر هم دوباره طراحی شده‌اند و به‌صورت تمام رنگی درآمده‌اند. منابع بر مبنای کیفیت ارائه اصول فیزیولوژی، مأخذ اصلی، و قابل دسترس بودن انتخاب شده‌اند. بیشتر منابع پیشنهادی برای مطالعه که در پایان فصل‌ها آمده شامل مقاله‌هایی است که عمدتاً از مجلات علمی جدید که به‌طور رایگان از طریق PubMed قابل دسترسی‌اند انتخاب شده‌اند (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) استفاده از این منابع و مأخذ اصلی آنها می‌تواند تقریباً تمامی حیطه فیزیولوژی را به‌طور کامل در اختیار دانشجویان قرار دهد.

تلاش شده است تا حد امکان مطالب با بیانی خلاصه شرح داده شوند. متأسفانه در بسیاری از اصول فیزیولوژی بیش از آنچه میل شخصی خودم ایجاد می‌کرد، مطالب ساده‌تر و کلی‌تر بیان شده‌اند. اما با این وجود کتاب‌شناسی می‌تواند برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد اختلاف نظرها و نیز سؤالاتی که هنوز پاسخ داده نشده‌اند ولی در فهم عملکرد پیچیده بدن انسان در حالت سلامت و بیماری دخیل می‌باشند، مورد استفاده قرار گیرد.

ویژگی دیگر، تایپ متن با دو اندازه قلم است. مطالبی که با قلم بزرگ‌تر تایپ شده‌اند بدنه اصلی اطلاعات فیزیولوژی را تشکیل می‌دهند که برای تمام فعالیت‌ها و مطالعات پزشکی ضروری است. مطالبی که با قلم کوچک تایپ شده‌اند شامل چند دسته گوناگون هستند: نخست اطلاعات آناتومی، شیمی و سایر اطلاعاتی که برای زمینه‌چینی بحث لازم هستند اما اکثر دانشجویان در درس‌های دیگر به‌طور مفصل‌تر خواهند خواند؛ دوم، اطلاعات فیزیولوژی که اهمیت

ویژه‌ای از استفانی لوکاس به خاطر کمک‌هایش و از جیمز پرکینز به خاطر خلق تصایر عالی داریم. همچنین از الیز اوگرادی، جنیفر شراینر، گریس اوندربلیند، ربکا گرولیو و تمامی اعضای تیم Elsevier برای عملکرد عالی‌شان در ویرایش و آماده‌سازی کتاب تشکر می‌کنیم.

در نهایت، از تمامی خوانندگانی که همواره برای بهتر شدن درسنامه فیزیولوژی پزشکی ما را یاری داده‌اند سپاسگزاریم. امیدواریم که این ویراست جدید برای شما مفید واقع شود و از خواندن آن لذت ببرید.

جان ای. هال

مایکل ای. هال

خاصی برای حوزه‌های معینی از طب بالینی دارند؛ و سوم، اطلاعاتی که برای دانشجویان علاقمند به مطالعه عمیق‌تر مکانیسم‌های خاص فیزیولوژی ارزشمند است.

مایلم از افراد زیادی که در آماده‌سازی این کتاب کمک کردند تشکر کنیم؛ همکاران ما در دپارتمان فیزیولوژی و بیوفیزیک مرکز پزشکی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی که پیشنهادهای ارزشمندی به من دادند و اسامی آنها همراه با توضیح مختصری درباره فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی دپارتمان در تارنمای <http://physiology.umc.edu/> آمده است. تشکر



مقدمه فیزیولوژی: سلول و فیزیولوژی عمومی

رئوس مطالب

- ۱ سازماندهی عملکردی بدن انسان و تنظیم «محیط داخلی»
- ۲ سلول و اعمال آن
- ۳ کنترل ژنتیکی ساخت پروتئین، عمل سلول، و تولیدمثل سلول



سازماندهی عملکردی بدن انسان و تنظیم «محیط داخلی»

هدف علم فیزیولوژی، توضیح مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی است که مسؤول پیدایش، تکامل و تداوم حیات می‌باشند. هر نوعی از حیات، از ساده‌ترین ویروس تا بلندترین درخت یا بدن پیچیده انسان، ویژگی‌های عملکردی خاص خود را دارد. لذا فیزیولوژی را می‌توان به حیطه‌های گسترده‌ای از جمله فیزیولوژی ویروس، فیزیولوژی باکتریایی، فیزیولوژی سلولی، فیزیولوژی گیاهی، فیزیولوژی بی‌مهرگان، فیزیولوژی مهره‌داران، فیزیولوژی پستانداران، فیزیولوژی انسانی و بسیاری از زیربخش‌های دیگر تقسیم کرد.

سلول‌ها به عنوان واحدهای زنده بدن

سلول واحد زنده پایه بدن است. هر بافت یا عضو بدن، مجموعه‌ای از تعداد زیادی سلول‌های مختلف است که ساختارهای حمایت‌کننده بین سلولی، آنها را در کنار هم نگه می‌دارند.

هر نوع سلول به گونه‌ای سازگار شده که یک یا چند وظیفه مشخص را انجام دهد. به عنوان مثال، ۲۵ تریلیون گلبول قرمز در بدن انسان، اکسیژن را از ریه‌ها به بافتها حمل می‌کنند. هر چند گلبول قرمز فراوان‌ترین نوع سلول در بدن می‌باشد، حدود تریلیون‌ها از سایر انواع سلول در بدن وجود دارند که اعمال متفاوتی را انجام می‌دهند. به این ترتیب، کل سلول‌های بدن در حدود ۳۵ تا ۴۰ تریلیون عدد است.

گرچه سلول‌های بدن تفاوت‌های عمده‌ای با یکدیگر دارند، ویژگی‌های پایه در همه آنها مشترک است. به عنوان مثال در تمام سلول‌ها، اکسیژن با کربوهیدرات، چربی و پروتئین واکنش می‌دهد تا انرژی موردنیاز برای عملکرد سلول را آزاد کند. به علاوه، مکانیسم‌های شیمیایی کلی برای تبدیل مواد غذایی به انرژی، اساساً در تمام سلول‌ها یکسان است و همه سلول‌ها، فرآورده واکنش‌های شیمیایی خود را به مایعات پیرامون تحویل می‌دهند.

هدف علم فیزیولوژی، توضیح مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی است که مسؤول پیدایش، تکامل و تداوم حیات می‌باشند. هر نوعی از حیات، از ساده‌ترین ویروس تا بلندترین درخت یا بدن پیچیده انسان، ویژگی‌های عملکردی خاص خود را دارد. لذا فیزیولوژی را می‌توان به حیطه‌های گسترده‌ای از جمله فیزیولوژی ویروس، فیزیولوژی باکتریایی، فیزیولوژی سلولی، فیزیولوژی گیاهی، فیزیولوژی بی‌مهرگان، فیزیولوژی مهره‌داران، فیزیولوژی پستانداران، فیزیولوژی انسانی و بسیاری از زیربخش‌های دیگر تقسیم کرد.

فیزیولوژی انسانی. در فیزیولوژی انسانی، محققین تلاش می‌کنند تا آن گروه از ویژگی‌ها و مکانیسم‌های اختصاصی بدن انسان را توضیح دهند که او را زنده نگه می‌دارند. بسیاری از واقعیتهایی که ما را زنده نگه می‌دارد، نتیجه سیستم‌های کنترلی پیچیده است؛ به عنوان مثال، گرسنگی ما را به جستجوی غذا و ترس ما را به فرار وامی‌دارد. وقتی سرما احساس می‌کنیم، به محیط گرم پناه می‌بریم. نیروهای دیگر ما را به دوستیابی و تولیدمثل هدایت می‌کنند. لذا انسان در واقع یک ماشین خودکار است که احساسات، ادراکات و قدرت فراگیری او، بخشی از این توالی خودکار زندگی محسوب می‌شود. همین ویژگی‌ها به انسان اجازه می‌دهد که در شرایط بسیار متنوع که باعث غیرممکن شدن حیات می‌شوند، به حیات ادامه دهد.

فیزیولوژی انسان باعث ارتباط علوم پایه با پزشکی شده و عملکردهای متعدد سلول‌ها، بافت‌ها و اعضا را به عملکردهای مرتبط با انسان زنده، ارتباط می‌دهد. این ارتباط نیازمند تعامل و هماهنگی گسترده سیستم‌های تنظیمی که در هر سطحی عمل می‌کنند می‌باشد - از ژن که سنتز مولکول‌ها را برنامه ریزی می‌کنند تا سیستم‌های پیچیده عصبی و هورمونی که

milieu intérieur نامید.

تا زمانی که غلظت اکسیژن، گلوکز، یون‌های مختلف، اسیدهای آمینه، چربی‌ها و سایر مواد در این محیط داخلی در محدوده مناسبی قرار دارد، سلول‌ها به حیات، رشد و انجام وظایف اختصاصی خود ادامه می‌دهند.

تفاوت‌های بین مایع خارج سلولی و مایع داخل سلولی. مایع خارج سلولی مقدار زیادی یون‌های سدیم، کلر و بیکربنات به همراه مواد غذایی مورد نیاز سلول‌ها نظیر اکسیژن، گلوکز، اسیدهای چرب و اسیدهای آمینه دارد. به علاوه، مایع خارج سلولی حاوی دی‌اکسید کربن است که برای دفع از سلول‌ها به ریه‌ها حمل می‌شود؛ و نیز سایر مواد زائد سلولی در داخل این مایع وجود دارند که برای دفع به کلیه‌ها می‌روند. مایع داخل سلولی نسبت به مایع خارج سلولی تفاوت‌های عمده‌ای دارد. به عنوان مثال مایع داخل سلولی مقدار زیادی یون‌های پتاسیم، منیزیم و فسفات به جای یون‌های سدیم و کلر مایع خارج سلولی دارد. مکانیسم‌های اختصاصی برای انتقال یون‌ها از خلال غشاء سلولی، تفاوت غلظت یون‌ها را بین مایع داخل و خارج سلولی حفظ می‌کنند. این مکانیسم‌ها در فصل ۴ شرح داده می‌شوند.

همچنین اکثر قریب به اتفاق سلول‌ها می‌توانند سلول‌های مشابه خود را بسازند. خوشبختانه هرگاه سلول‌هایی از یک نوع ویژه تخریب شوند، سلول‌های باقی‌مانده هم نوع، سلول‌های جدید را تولید و جایگزین می‌کنند.

میکروارگانیسم‌هایی که در بدن زندگی می‌کنند، خیلی بیشتر از سلول‌های انسان هستند. علاوه بر سلول‌های انسان، تریلیون‌ها میکروب در بدن ساکن هستند که در پوست، دهان، روده و بینی زندگی می‌کنند. به عنوان مثال لوله گوارش در حالت طبیعی حاوی جمعیت پیچیده و دینامیکی مشتمل بر ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ گونه میکروارگانیسم می‌باشد که در سلول‌های انسانی ما ساکن هستند. اجتماع‌های میکروارگانیسم‌ها که در بدن ساکن هستند اغلب میکروبیوتا نامیده می‌شوند و می‌توانند باعث بیماری شوند ولی در اغلب موارد با سازگاری در کنار سلول‌های میزبان انسانی زندگی کرده و عملکردهای حیاتی را که برای بقای میزبان‌شان اساسی هستند انجام می‌دهند. اگرچه اهمیت میکروبیوتای روده در هضم مواد غذایی به طور گسترده‌ای شناخته شده است، ولی نقش‌های اضافی میکروب‌های بدن در اعمال تغذیه‌ای، ایمنی و سایر عملکردها اخیراً در حال شناخت هستند و حیطه مهمی از تحقیقات زیست پزشکی را شامل می‌شود.

هومئوستاز - حفظ یک محیط داخلی تقریباً پایدار

در سال ۱۹۲۹، والتر کانن (۱۹۴۵-۱۸۷۱) یک فیزیولوژیست آمریکایی واژه هومئوستازیس را جهت توصیف حفظ شرایط تقریباً ثابت در محیط داخلی ابداع کرد. الزاماً تمام اندام‌ها و بافت‌های بدن عملکردهایی را انجام می‌دهند که به حفظ این شرایط تقریباً ثابت و پایدار کمک می‌کند. برای مثال، ریه‌ها اکسیژن را برای مایع خارج سلولی فراهم می‌کنند تا اکسیژن مصرف شده توسط سلول‌ها را جایگزین کند، کلیه‌ها غلظت‌های یونی را به صورت ثابت نگه می‌دارند و سیستم گوارش مواد غذایی را فراهم می‌کند در حالی که مواد زائد را از بدن خارج می‌کند.

یون‌های مختلف، مواد غذایی، فرآورده‌های زائد و سایر ترکیبات بدن به‌طور طبیعی در یک محدوده‌ای از اعداد حفظ

مایع خارج سلولی - «محیط داخلی»

حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد بدن انسان بالغ را مایع تشکیل می‌دهد که یک محلول آبی حاوی یون‌ها و سایر مواد می‌باشد. گرچه بخش اعظم این مایع در داخل سلول‌ها قرار دارد و «مایع

داخل سلولی»^۱ نامیده می‌شود، در حدود یک‌سوم آن در فضاها یا خارج سلولی قرار دارد و «مایع خارج سلولی»^۲ نامیده می‌شود. این مایع خارج سلولی در سراسر بدن، پیوسته در حرکت است. مایع خارج سلولی به سرعت به خون در حال گردش انتقال می‌یابد و سپس توسط انتشار از طریق دیواره مویرگ‌ها، بین خون و مایعات بافتی مخلوط می‌گردد.

یون‌ها و مواد غذایی مورد نیاز سلول‌ها برای حفظ حیات آنها در مایع خارج سلولی وجود دارند. لذا تمام سلول‌های بدن، در محیط یکسان - مایع خارج سلولی - زندگی می‌کنند. بر این اساس، کلود برنارد فیزیولوژیست بزرگ فرانسوی قرن نوزدهم (۱۸۱۳-۱۸۷۸)، مایع خارج سلولی را «محیط داخلی» یا

1. intracellular fluid

2. extracellular fluid

ایجاد می‌شوند، ممکن است بیانگر یک بالا و پایین کردن^۱ باشد که برای حفظ عملکردهای حیاتی بدن لازمند ولی در درازمدت ممکن است ناهنجاری‌های دیگری را در عملکردهای بدن ایجاد کنند. نظام پاتوفیزیولوژی به دنبال این است که توضیح دهد چگونه فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی در بیماری‌ها یا آسیب‌ها تغییر می‌کنند.

این فصل به تشریح سیستم‌های عملکردی مختلف بدن و مشارکت آنها در هومئوستاز می‌پردازد. سپس به صورت خلاصه در مورد تئوری پایه سیستم‌های کنترلی بدن بحث خواهیم کرد که اجازه می‌دهند سیستم‌های عملکردی در حمایت از یکدیگر عمل کنند.

سیستم انتقال‌دهنده و مخلوط‌کننده مایع خارج سلولی – سیستم گردش خون

مایع خارج سلولی در دو مرحله در سراسر بدن انتقال می‌یابد. مرحله نخست حرکت خون در عروق خونی سراسر بدن و مرحله دوم حرکت مایع بین مویرگ‌های خونی و فضاهای بین سلولی^۲ است.

شکل ۱-۱ نگاه کلی به گردش خون است. همه خون کل مدار گردش خون را در حالت استراحت یکبار در دقیقه و در حالت فعالیت سنگین شش بار در دقیقه طی می‌کند.

وقتی خون از خلال مویرگ‌ها عبور می‌کند، تبادل پیوسته مایع خارج سلولی بین بخش پلاسمای خون و مایع میان بافتی که فضاهای بین سلولی را پر کرده است، روی می‌دهد. این فرآیند در **شکل ۱-۲** نشان داده شده است. دیواره مویرگ‌ها نسبت به اکثر مولکول‌های موجود در پلازما (به جز پروتئین‌های پلازما که برای عبور از مویرگ‌ها خیلی بزرگ هستند) نفوذپذیر می‌باشد. به این ترتیب، مقدار زیادی مایع و مواد محلول در آن، بین خون و فضاهای بافتی (در هر دو جهت) انتشار می‌یابند (همان‌طور که به وسیله پیکان‌ها نشان داده شده‌اند).

این فرآیند انتشار توسط حرکت جنبشی مولکول‌ها در پلازما و مایع میان بافتی ایجاد می‌کند. مایع و مولکول‌های محلول در آن در تمام جهات در داخل پلازما و مایع موجود در فضای بین سلولی و نیز در منافذ مویرگی پیوسته حرکت می‌کنند. تعداد کمی از سلول‌ها به فاصله بیش از ۵۰ میکرون از یک

می‌شوند نه اینکه یک مقدار ثابت داشته باشند. برای بعضی از ترکیبات بدن، این محدوده بسیار کوچک است. برای مثال، تغییرات در غلظت یون هیدروژن خون، به‌طور طبیعی کمتر از ۵ نانومول در هر لیتر است (۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۵ مول در هر لیتر). غلظت سدیم خون نیز به شدت تنظیم می‌گردد و حتی زمانی که مقدار دریافت سدیم به شدت تغییر یابد، تغییرات آن به‌طور طبیعی فقط چند میلی‌مول در لیتر خواهد بود. اما این تغییرات غلظت سدیم حداقل ۱ میلیون برابر بیشتر از تغییرات یون هیدروژن است.

سیستم‌های کنترلی قدرتمندی وجود دارند که علیرغم تغییرات گسترده محیطی و مقابله با بیماری‌ها و آسیب‌ها، غلظت یون‌های سدیم، هیدروژن، و نیز اکثر یون‌های دیگر، مواد غذایی و مواد را در بدن در سطحی حفظ می‌کنند که به سلول‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها اجازه انجام عملکردهای طبیعی را بدهند.

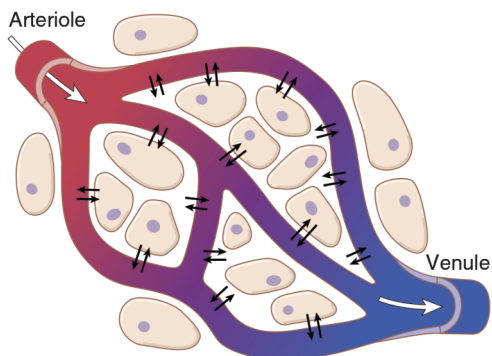
بخش عظیمی از این کتاب به این مسئله می‌پردازد که چگونه هر اندام یا بافتی در هومئوستازیس مشارکت می‌کند. عملکردهای طبیعی بدن نیاز به فعالیت‌های جامع سلول‌ها، بافت‌ها، اندام‌ها و چندین سیستم کنترل موضعی، هورمونی و عصبی دارد که با یکدیگر در حفظ سلامت بدن و هومئوستازیس مشارکت می‌کنند.

جبران‌های هومئوستاتیک در بیماری‌ها

معمولاً به عنوان شرایطی در نظر گرفته می‌شود که هومئوستاز مختل شده است. با این وجود حتی در زمان بروز بیماری مکانیسم‌های هومئوستاتیک به عملکرد خود ادامه می‌دهند و عملکردهای حیاتی را از طریق مکانیسم‌های جبرانی متعدد حفظ می‌کنند. در بعضی موارد، این روندهای جبرانی خودشان ممکن است منجر به انحرافات جدی عملکردهای بدن از محدوده طبیعی شوند و تشخیص علت اولیه (اصلی) بیماری را از پاسخ‌های جبرانی با مشکل روبرو کنند. برای مثال، بیماری‌هایی که توانایی کلیه‌ها را در دفع نمک و آب مختل می‌کنند می‌توانند منجر به افزایش فشارخون شوند که در ابتدا به بازگشت دفع آب و نمک به سطح طبیعی کمک می‌کنند. بنابراین تعادل بین دریافت و دفع کلیوی حفظ می‌گردد. این تعادل برای حفظ حیات ضروری است اما در درازمدت، فشارخون بالا می‌تواند به اندام‌های مختلف از جمله کلیه آسیب وارد کند که این خود می‌تواند باعث افزایش بیشتری در فشارخون شود و آسیب کلیوی را بیشتر کند. بنابراین جبران‌های هومئوستازی که به دنبال آسیب، بیماری یا مقابله با عوامل عمده محیطی در بدن

1. trade-off

2. intercellular space

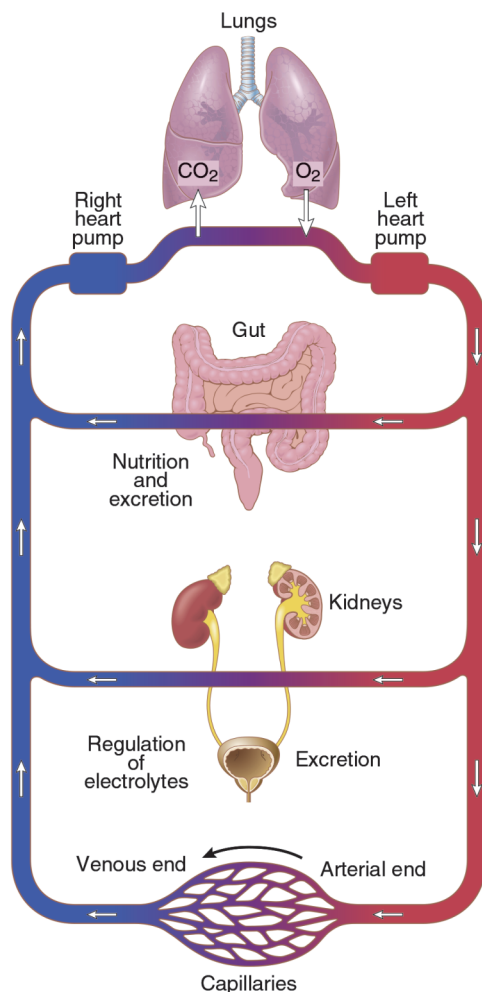


شکل ۱-۲. انتشار مایع و مواد محلول در آن از خلال دیواره مویرگ‌ها و فضاهای بینابینی.

سلول‌ها توسط خون از حبابچه‌ها دریافت می‌شود. ضخامت غشاء بین حبابچه‌ها و مجرای مویرگ‌های ریوی - غشاء حبابچه‌ای^۱ - ۰/۴ تا ۲ میکرون است و اکسیژن به دلیل حرکت مولکولی، به سرعت از خلال این غشا به درون خون انتشار می‌یابد.

سیستم گوارش. بخش قابل توجهی از خون پمپ شده توسط قلب، از دیواره سیستم گوارش عبور می‌کند. در اینجا، مواد غذایی محلول، از جمله کربوهیدرات‌ها، اسیدهای چرب و اسیدهای آمینه، از غذای خورده شده به مایع خارج سلولی خون جذب می‌شوند.

کبد و سایر اعضای که عمدتاً عملکردهای متابولیکی انجام می‌دهند. گروهی از موادی که از دستگاه گوارش جذب می‌شوند، به همان شکل جذب شده توسط سلول‌ها، قابل مصرف نیستند. کبد ترکیب شیمیایی بسیاری از این مواد را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که مصرف آنها راحت‌تر باشد. سایر بافت‌های بدن - سلول‌های چربی، مخاط دستگاه گوارش، کلیه‌ها و غدد درون ریز - به تغییر این مواد کمک کرده یا آنها را تا زمان مورد نیاز ذخیره می‌کنند. همچنین کبد برخی فرآورده‌های زاید تولید شده در بدن و مواد سمی بلعیده شده را دفع می‌کند.



شکل ۱-۱. سازماندهی کلی دستگاه گردش خون.

مویرگ قرار دارند و این واقعیت، انتشار تمام مواد را از مویرگ به سلول در عرض چند ثانیه تضمین می‌کند. لذا مایع خارج سلولی در هر قسمتی از بدن (هم در پلاسما و هم در مایع میان‌بافتی) پیوسته در حال مخلوط شدن است و به این ترتیب همگنی مایع خارج سلولی سراسر بدن حفظ می‌شود.

منشأ مواد غذایی در مایع خارج سلولی

سیستم تنفس. براساس شکل ۱-۱، هر بار که خون از بدن عبور می‌کند، درون ریه‌ها نیز جریان می‌یابد. اکسیژن مورد نیاز

1. alveolar membrane

حذف می‌شوند.

تنظیم اعمال بدن

سیستم عصبی. سیستم عصبی شامل سه بخش اصلی می‌باشد: بخش ورودی حسی، سیستم عصبی مرکزی (یا بخش یکپارچه‌کننده^۱)، و بخش خروجی حرکتی. گیرنده‌های حسی وضعیت بدن و وضعیت محیط اطراف را حس می‌کنند. به عنوان مثال، گیرنده‌های پوست، انسان را از تماس شیئی با هر نقطه از پوست آگاه می‌کنند. چشم‌ها اعضا حسی هستند که تصویری از محیط را در اختیار می‌گذارند. گوش‌ها نیز اعضا حسی هستند. سیستم عصبی مرکزی شامل مغز و نخاع می‌باشد. ذخیره‌سازی اطلاعات، تولید فکر، تمایلات و آرزوها، و واکنش‌هایی که بدن در مواجهه با احساسات بروز می‌دهد، از وظایف مغز است. سپس سیگنال‌های مناسب از بخش حرکتی دستگاه عصبی ارسال می‌شوند تا تمایلات انسان عملی شوند.

سیستم اتونوم^۲ بخش مهمی از دستگاه عصبی می‌باشد. عملکرد آن ناخودآگاه است. دستگاه اتونوم بسیاری از عملکردهای اعضا داخلی، از جمله سطح فعالیت پمپ قلب، حرکات دستگاه گوارش، و ترشح بسیاری از غدد بدن را کنترل می‌کند.

سیستم هورمونی. غدد درون‌ریز و چندین ارگان و بافت در بدن قرار دارند که مواد شیمیایی موسوم به هورمون را ترشح می‌کنند. هورمون‌ها در مایع خارج سلولی به بخش‌های دیگر بدن منتقل می‌شوند تا به تنظیم عملکرد سلول‌ها کمک کنند. به عنوان مثال، هورمون تیروئید سرعت اکثر واکنش‌های شیمیایی را در تمام سلول‌های بدن افزایش می‌دهد و به تنظیم سرعت فعالیت‌های بدن کمک می‌کند. انسولین متابولیسم گلوکز را تنظیم می‌کند. هورمون‌های قشر آدرنال متابولیسم یون‌های سدیم، پتاسیم و پروتئین‌ها را تنظیم می‌کنند. هورمون پاراتیروئید کلسیم و فسفات استخوان را تنظیم می‌کند. لذا هورمون‌ها یک سیستم تنظیم‌کننده هستند که مکمل سیستم عصبی هستند. سیستم عصبی بسیاری از فعالیت‌های عضلانی و ترشحات بدن را تنظیم می‌کند، در حالی که سیستم هورمونی بسیاری از عملکردهای متابولیکی را کنترل می‌کند. سیستم‌های هورمونی و عصبی به‌طور طبیعی در یک الگوی هماهنگ با یکدیگر عمل می‌کنند تا

سیستم عضلانی - اسکلتی. به نظر شما سیستم عضلانی - اسکلتی چگونه در هم‌مستاز شرکت می‌کند؟ پاسخ واضح و ساده است: اگر عضلات وجود نداشتند، بدن نمی‌توانست حرکت کند تا غذای مورد نیاز برای تغذیه خود را به دست آورد. به علاوه، دستگاه عضلانی - اسکلتی حرکاتی را ایجاد می‌کند تا از بدن در برابر عوامل نامساعد محیطی حفاظت کند، که قطعاً بدون وجود آن، کل بدن (همراه با مکانیسم‌های هم‌مستاتیک آن) از بین می‌رفت.

حذف محصولات نهایی متابولیسم

حذف دی‌اکسیدکربن توسط ریه‌ها. هم‌زمان با ورود اکسیژن از ریه‌ها به خون، دی‌اکسید کربن از خون وارد جابجچه‌های ریوی می‌شود؛ بازدم دی‌اکسید کربن را به جو منتقل می‌کند. دی‌اکسید کربن فراوان‌ترین ماده حاصل از متابولیسم است.

کلیه‌ها. عبور خون از کلیه‌ها، غیر از دی‌اکسید کربن اکثر مواد دیگری که مورد نیاز سلول‌ها نیستند، از پلاسما حذف می‌کند. این مواد عبارتند از فرآورده‌های مختلف متابولیسم سلولی نظیر اوره و اسید اوریک؛ به علاوه، آب و یون‌های اضافی که ممکن است در مایع خارج سلولی تجمع پیدا کرده باشند نیز دفع می‌گردند.

عملکرد کلیه‌ها به این شکل است که ابتدا حجم زیادی از پلاسما را از طریق مویرگ‌های گلوبروولی به درون توپول‌ها پالایش می‌کنند؛ سپس مواد مورد نیاز بدن (از جمله گلوکز، اسیدهای آمینه، میزان مناسب آب، و بسیاری از یون‌ها) را بازجذب می‌کنند. اکثر مواد دیگر که مورد نیاز بدن نیستند (به ویژه فرآورده‌های زائد متابولیسم نظیر اوره و کراتینین)، به میزان ناچیزی بازجذب می‌شوند و پس از عبور از توپول‌های کلیوی به درون ادرار می‌ریزند.

دستگاه گوارش. مواد هضم نشده‌ای که وارد دستگاه گوارش می‌شوند و برخی فرآورده‌های زائد متابولیسم از طریق مدفوع حذف می‌شوند.

کبد. یکی از وظایف کبد، سم‌زدایی یا حذف بسیاری از داروها و مواد شیمیایی بلعیده شده است. کبد بسیاری از این فرآورده‌های زائد را به درون صفرا ترشح می‌کند که در نهایت، از راه مدفوع

1. integrative portion

2. autonomic system

تمام سیستم‌های ارگانی بدن را کنترل کنند.

محافظت از بدن

عمل می‌کنند تا عملکردهای تک‌تک قسمت‌های یک عضو را کنترل کنند؛ بقیه در کل بدن عمل می‌کنند تا روابط متقابل بین اعضاء مختلف را کنترل کنند. به عنوان مثال، دستگاه تنفس - به همراه دستگاه عصبی - غلظت دی‌اکسید کربن را در مایع خارج سلولی تنظیم می‌کند. کبد و پانکراس غلظت گلوکز را در مایع خارج سلولی تنظیم می‌کنند. کلیه‌ها غلظت هیدروژن، سدیم، پتاسیم، فسفات و سایر یون‌ها را در مایع خارج سلولی تنظیم می‌کنند.

نمونه‌هایی از مکانیسم‌های کنترلی

تنظیم غلظت اکسیژن و دی‌اکسید کربن در مایع خارج سلولی. از آن جایی که اکسیژن یکی از مواد اصلی مورد نیاز در واکنش‌های شیمیایی سلول‌ها است، بدن برای حفظ غلظت اکسیژن مایع خارج سلولی در یک سطح ثابت و دقیق، یک مکانیسم کنترلی ویژه دارد. این مکانیسم به ویژگی‌های شیمیایی هموگلوبین وابسته است که در تمام گلبول‌های قرمز خون وجود دارد. وقتی خون از درون ریه‌ها عبور می‌کند، هموگلوبین با اکسیژن ترکیب می‌شود. سپس وقتی خون از درون مویرگ‌های بافتی عبور می‌کند، در صورتی که اکسیژن زیادی در بافت وجود داشته باشد، هموگلوبین به دلیل میل ترکیبی زیاد با اکسیژن، اکسیژن را به مایع بافتی تحویل نمی‌دهد. اگر غلظت اکسیژن در مایع بافتی پایین باشد، اکسیژن کافی آزاد می‌شود تا غلظت مناسب را برقرار کند. لذا تنظیم غلظت اکسیژن در بافت‌ها، به ویژگی‌های شیمیایی خود هموگلوبین بستگی دارد. این نوع تنظیم «عملکرد بافری‌کننده هموگلوبین برای اکسیژن^۱» نامیده می‌شود.

روش‌های مختلفی برای تنظیم غلظت دی‌اکسید کربن در مایع خارج سلولی وجود دارد. دی‌اکسید کربن یک محصول نهایی اصلی واکنش‌های اکسیداتیو در سلول‌ها می‌باشد. اگر کل دی‌اکسید کربن پس از تولید در سلول‌ها، در مایع بافتی تجمع یابد، تمام واکنش‌های انرژی‌زای سلول‌ها خیلی زود متوقف می‌شوند. خوشبختانه وقتی غلظت دی‌اکسید کربن خون از حد طبیعی فراتر رود، مرکز تنفس را تحریک و انسان سریع‌تر و عمیق‌تر تنفس می‌کند. در نتیجه، دفع دی‌اکسید کربن در هوای بازدم افزایش می‌یابد و دی‌اکسید کربن اضافی از خون و مایعات بافتی حذف می‌شود. این فرآیند تا رسیدن غلظت به سطح

سیستم ایمنی. سیستم ایمنی مشتمل است بر گلبول‌های سفید خون، سلول‌های بافتی مشتق از گلبول‌های سفید خون، تیموس، عقده‌های لنفاوی، و عروق لنفاوی که بدن را در برابر عوامل بیماری‌زا نظیر باکتری‌ها، ویروس‌ها، انگل‌ها، و قارچ‌ها محافظت می‌کنند. دستگاه ایمنی مکانیسمی را برای بدن تأمین می‌کند تا (۱) سلول‌های خودی را از سلول‌ها و مواد بیگانه تشخیص دهد، و (۲) عامل مهاجم را به وسیله فاگوسیتوز یا تولید لئوسیت‌های حساس شده یا پروتئین‌های اختصاصی (نظیر آنتی‌بادی‌ها) که عامل مهاجم را خواه نابود یا خنثی می‌کنند، از بین ببرد.

سیستم پوششی. پوست و ضمایم مختلف آن (شامل مو، ناخن، غدد، و ساختارهای دیگر) بافت‌های عمقی و اعضای بدن را می‌پوشانند و محافظت می‌کنند و مرزی را بین محیط داخلی بدن و جهان خارج تشکیل می‌دهند. به علاوه، سیستم پوششی در تنظیم درجه حرارت و دفع مواد زاید اهمیت دارد و یک سطح تماس حسی را بین بدن و محیط خارج فراهم می‌کند. پوست حدود ۱۵-۱۲ درصد از وزن بدن را به خود اختصاص می‌دهد.

تولید مثل

تولید مثل ممکن است به عنوان یک عملکرد همئوستاتیک در نظر گرفته نشود. با این حال، تولید مثل با ایجاد یک نسل جدید به جای نسل در حال مرگ، به حفظ همئوستاز کمک می‌کند. این ممکن است استدلالی باشد برای استفاده مجاز از واژه همئوستاز در این مورد، اما نشان می‌دهد که در تحلیل نهایی، الزاماً کل ساختارهای بدن به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به حفظ و تداوم حیات کمک کنند.

سیستم‌های کنترلی بدن

بدن انسان هزاران سیستم کنترل‌کننده در خود دارد. مهم‌ترین آنها سیستم‌های کنترل ژنتیکی هستند که در تمام سلول‌ها عمل می‌کنند تا به کنترل عملکردهای داخل سلولی و خارج سلولی کمک کنند. نقش آنها در فصل ۳ شرح داده می‌شود.

بسیاری از دستگاه‌های کنترل‌کننده دیگر در داخل اعضاء

1. oxygen-buffering function of hemoglobin

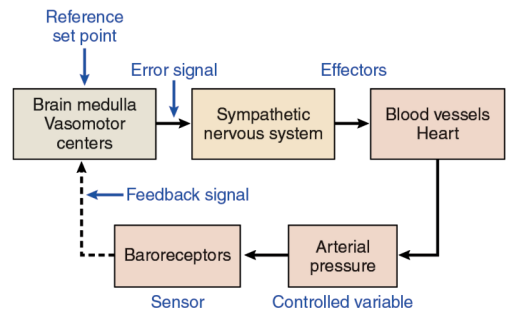
عصبی سمپاتیک به قلب و عروق خونی انتقال می‌یابد. کاهش این ایمپالس‌ها، فعالیت پمپی قلب را کاهش می‌دهد و عروق خونی محیطی را گشاد می‌کند تا جریان خون در عروق افزایش یابد. هر دو اثر فوق، فشار شریانی را کاهش داده و به سطح طبیعی باز می‌گردانند.

در مقابل، هرگاه فشار شریانی به کمتر از سطح طبیعی برسد، گیرنده‌های کششی شل می‌شوند و مرکز وازوموتور فعال‌تر از حالت معمول می‌شود. در نتیجه، عروق منقبض می‌شوند و فعالیت پمپ قلبی افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش اولیه در فشار شریانی باعث آغاز مکانیسم‌های فیدبکی منفی شده تا فشار شریانی را افزایش داده و به سطح طبیعی برگرداند.

محدوده‌های طبیعی و ویژگی‌های فیزیکی اجزاء مهم مایع خارج سلولی

جدول ۱-۱ ویژگی‌های فیزیکی مایع خارج سلولی، اجزاء مهم این مایع و مقادیر طبیعی آنها، دامنه طبیعی و محدوده‌های حداکثر و حداقل بدون ایجاد مرگ را نشان می‌دهد. به طیف باریک دامنه طبیعی هر یک از این مقادیر توجه کنید. ارقام خارج از این محدوده معمولاً به وسیله بیماری، آسیب یا مقابله با عوامل محیطی عمده ایجاد می‌شوند.

مهمترین موارد محدوده‌هایی است که تجاوز از آنها، به مرگ بیمار می‌انجامد. به عنوان مثال، افزایش درجه حرارت بدن تنها به میزان ۱۱ درجه فارنهایت (۷ درجه سانتیگراد) بیش از مقدار طبیعی، یک حلقه معیوب افزایش متابولیسم سلولی ایجاد می‌کند که به ناپودی سلول‌ها منجر می‌گردد. توجه کنید که دامنه طبیعی تعادل اسید-باز در بدن بسیار محدود است؛ pH طبیعی می‌باشد. غلظت یون پتاسیم یک پارامتر مهم دیگر است، زیرا هرگاه به کمتر از یک سوم مقدار طبیعی برسد، بیمار به دلیل ناتوانی در ارسال سیگنال‌های عصبی فلج می‌شود. اگر غلظت پتاسیم به دو برابر یا بیشتر مقدار طبیعی برسد، عضله قلبی به شدت سرکوب می‌شود. همچنین هرگاه غلظت یون کلسیم به کمتر از نصف مقدار طبیعی برسد، بیمار به دلیل تولید خودبخودی ایمپالس‌های عصبی بیش از اندازه، در اعصاب محیطی به انقباضات کزازی کل عضلات بدن دچار می‌شود. وقتی غلظت گلوکز به کمتر از نصف مقدار طبیعی برسد، بیمار



شکل ۳-۱. کنترل پس‌نورد منفی فشار شریانی توسط بارورسپتورهای شریانی (گیرنده‌های فشار در شریان‌ها). پیام از حسگرها (بارورسپتورها) به بصل‌النخاع در مغز فرستاده می‌شود. در این مکان این پیام‌ها با نقطه تنظیم شده مرجع مقایسه می‌شوند. هنگامی که فشار شریانی به بالاتر از سطح طبیعی افزایش پیدا کند، این افزایش فشار غیرطبیعی، پیام‌های عصبی که از بارورسپتورها به بصل‌النخاع فرستاده می‌شوند را افزایش می‌دهد. در بصل‌النخاع سیگنال‌های ورودی با نقطه تنظیمی مرجع مقایسه می‌شوند و یک سیگنال خطا تولید می‌شود که منجر به کاهش فعالیت سیستم عصبی سمپاتیک می‌گردد. کاهش فعالیت سمپاتیک باعث گشادی عروق خونی و کاهش فعالیت پمپی قلب می‌گردد که فشار شریانی را به سطح طبیعی برمی‌گرداند.

طبیعی ادامه می‌یابد.

تنظیم فشار خون شریانی. دستگاه‌های مختلفی در تنظیم فشارخون شریانی نقش دارند. یکی از اینها سیستم بارورسپتور یا گیرنده فشاری است که یک نمونه ساده و عالی از مکانیسم‌های تنظیم‌کننده با سرعت عمل زیاد می‌باشد (شکل ۳-۱). در دیواره محل دوشاخه شدن شریان‌های کاروتید در گردن و نیز در قوس آئورت در قفسه‌سینه، تعداد زیادی گیرنده عصبی موسوم به گیرنده‌های فشار^۱ وجود دارند که در اثر کشش دیواره شریان تحریک می‌شوند. هرگاه فشار شریانی به نحو قابل‌توجهی افزایش یابد، گیرنده‌های فشاری ایمپالس‌های عصبی را به بصل‌النخاع در مغز می‌فرستند. این ایمپالس‌ها در اینجا مرکز وازوموتور را مهار می‌کنند که در نتیجه، سبب کاهش تعداد ایمپالس‌هایی می‌شود که از مرکز وازوموتور از طریق دستگاه

1. baroreceptor

جدول ۱-۱. اجزاء مهم و ویژگی‌های فیزیکی مایع خارج سلولی

واحد	مقدار طبیعی	دامنه طبیعی	کوتاه‌مدت	محدوده تقریبی غیرمربگار در
اکسیژن (وریدی)	۴۰	۲۵-۴۰	۱۰-۱۰۰۰	mmHg
دی‌اکسید کربن (وریدی)	۴۵	۴۱-۵۱	۵-۸۰	mmHg
یون سدیم	۱۴۲	۱۳۵-۱۴۵	۱۱۵-۱۷۵	mmol/L
یون پتاسیم	۴/۲	۳/۵-۵/۳	۱/۵-۹	mmol/L
یون کلسیم	۱/۲	۱-۱/۴	۰/۵-۲	mmol/L
یون کلر	۱۰۶	۹۸-۱۰۸	۷۰-۱۳۰	mmol/L
یون بیکربنات	۲۴	۲۲-۲۹	۸-۴۵	mmol/L
گلوکز	۹۰	۷۰-۱۱۵	۲۰-۱۵۰۰	mg/dL
درجه حرارت بدن	۹۸/۴(۳۷)	۹۸-۹۸/۸(۳۷)	۶۵-۱۱۰ (۱۸/۳-۴۳/۳)	(درجه سانتیگراد) درجه فارنهایت
اسید - باز (وریدی)	۷/۴	۷/۳-۷/۵	۶/۹-۸	pH

را آغاز می‌کند که به کاهش غلظت آن به طرف مقدار طبیعی می‌انجامد و این نسبت به محرک اولیه در جهت منفی می‌باشد. در مقابل، اگر غلظت دی‌اکسید کربن خیلی کاهش یابد، پس‌نورد به طرف افزایش غلظت حرکت می‌کند. این پاسخ هم نسبت به محرک اولیه در جهت منفی می‌باشد.

در مکانیسم‌های تنظیم‌کننده فشار شریانی، هرگاه فشار افزایش یابد، مجموعه‌ای از واکنش‌ها را برمی‌انگیزد که فشار را پایین می‌آورند. افت فشار مجموعه‌ای از واکنش‌ها را برمی‌انگیزد که فشار را افزایش می‌دهند. در هر دو مورد، این اثرات نسبت به محرک اولیه در جهت منفی هستند.

به این ترتیب، هرگاه یکی از پارامترها افزایش یا کاهش یابد، یک دستگاه کنترل‌کننده، پس‌نورد منفی را آغاز می‌کند که بر اثر آن، مجموعه‌ای از تغییرات، آن عامل را به طرف مقدار مطلوب (میانگین خاص برای آن عامل) باز می‌گردانند و در نتیجه، هومئوستاز حفظ می‌شود.

بهره یک سیستم کنترلی. منظور از بهره^۲ پس‌نورد منفی، مقدار کارایی یک دستگاه تنظیم‌کننده در جهت حفظ شرایط مطلوب است. به عنوان مثال، فرض کنید مقدار زیادی خون به فردی تجویز شده که گیرنده‌های فشار وی عمل نمی‌کنند و فشار

اغلب به تحریک‌پذیری ذهنی شدید و گاه حتی تشنج دچار می‌شود.

با توجه به نمونه‌های فوق می‌توان دریافت که دستگاه‌های تنظیم‌کننده تا چه حد برای حفظ سلامت بدن ضروری هستند. اگر یکی از این دستگاه‌ها مختل شود، اختلال عملکرد جدی یا مرگ ممکن است حاصل شود.

ویژگی‌های سیستم‌های کنترلی

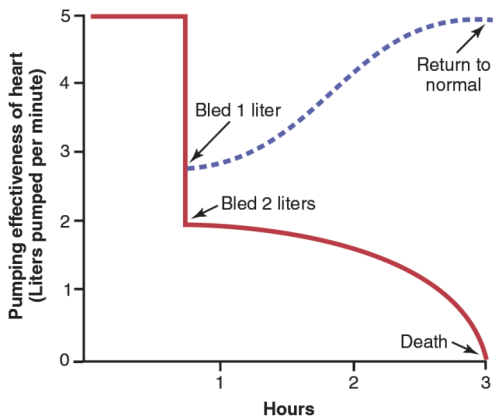
نمونه‌های فوق‌الذکر تنها چند نمونه از هزاران مکانیسم کنترل هومئوستاز در بدن هستند که تمام آنها برخی ویژگی‌های مشترک دارند. این ویژگی‌ها در ادامه شرح داده می‌شوند.

ماهیت پس‌نورد منفی^۱ اکثر سیستم‌های کنترلی

اکثر سیستم‌های کنترلی بدن از طریق پس‌نورد منفی عمل می‌کنند، که با مرور برخی از سیستم‌های کنترلی هومئوستاتیک ذکر شده قبلی به بهترین وجه می‌تواند توضیح داده شود. در تنظیم غلظت دی‌اکسید کربن، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در مایع خارج سلولی، تهویه ریوی را افزایش می‌دهد. در نتیجه، غلظت دی‌اکسید کربن مایع خارج سلولی کاهش می‌یابد، زیرا ریه‌ها دی‌اکسید کربن بیشتری را از راه بازدم به خارج از بدن می‌فرستند. به بیان دیگر، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن وقایعی

1. negative feedback

2. gain



شکل ۴-۱. اگر خونریزی به میزان ۱ لیتر باشد، پس‌نورد منفی عملکرد پمپ قلبی را بهبود می‌بخشد. اگر حجم خون به میزان ۲ لیتر کاهش یابد، پس‌نورد مثبت به مرگ می‌انجامد.

می‌کند، و به تضعیف بیشتر قلب می‌انجامد؛ این حلقه معیوب بارها تکرار می‌شود تا زمانی که بیمار فوت کند. توجه کنید که هر حلقه در این پس‌نورد، به تضعیف بیشتر قلب می‌انجامد. به بیان دیگر، محرک آغازین، موجب تشدید خودش می‌شود که همین پس‌نورد مثبت^۱ است.

پس‌نورد مثبت را بهتر است که «حلقه معیوب» بدانیم اما باید آگاهی داشت که یک مکانیسم پس‌نوردمنفی ممکن است بر درجات خفیف پس‌نورد مثبت غلبه کند و جلوی ایجاد حلقه معیوب را بگیرد. به‌عنوان مثال، اگر فرد ۱ لیتر (نه ۲ لیتر) خونریزی کند، مکانیسم‌های طبیعی پس‌نورد منفی، برون‌ده قلبی و فشار شریانی را تنظیم می‌کنند و با غلبه بر پس‌نورد مثبت، بیمار بهبود می‌یابد (خط چین در شکل ۴-۱).

پس‌نورد مثبت در برخی موارد مفید است. بدن در برخی موارد از پس‌نورد مثبت بهره می‌برد. انعقاد خون نمونه‌ای از یک پس‌نورد مثبت با ارزش است. وقتی یکی از عروق خونی پاره می‌شود و تشکیل لخته آغاز می‌گردد، آنزیم‌های متعدد موسوم به «فاکتورهای انعقادی» در داخل لخته فعال می‌شوند. برخی از این آنزیم‌ها بر سایر آنزیم‌های فعال نشده در خون مجاور اثر می‌کنند تا لخته بیشتری تشکیل شود. این فرآیند تا زمانی ادامه

شریانی از سطح طبیعی 100 mmHg به 175 mmHg افزایش یافته است. اگر گیرنده‌های فشار سالم باشند و همین مقدار خون به همین فرد تجویز شود، فشار شریانی فقط 25 mmHg افزایش می‌یابد. لذا سیستم کنترل پس‌نورد فشار را به میزان 50 mmHg - «اصلاح» کرده است (یعنی از 175 mmHg به 125 mmHg). می‌بینیم که دستگاه تنظیم‌کننده نتوانسته به میزان 10% از تغییر فشار پیشگیری کند و افزایش به میزان 25 mmHg باقی مانده است که «خطا» نامیده می‌شود. بهره سیستم را براساس فرمول زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$\text{اصلاح} = \frac{\text{اصلاح}}{\text{خطا}} = \text{بهره}$$

در مثال فوق، میزان اصلاح 50 mmHg - و میزان خطا 25 mmHg است. بنابراین بهره گیرنده فشار در این فرد در جهت تنظیم فشار شریانی $\frac{-50}{+25}$ یا -2 است. به بیان دیگر، فشار شریانی به اندازه یک‌سوم زمانی افزایش یافته که چنین دستگاه کنترل‌کننده‌ای وجود نمی‌داشت.

مطالعات نشان می‌دهد که بهره برخی از دستگاه‌های کنترل‌کننده دیگر، بسیار بیشتر از بهره سیستم گیرنده فشار (بارورسپتور) می‌باشد. به‌عنوان مثال، بهره دستگاه کنترل‌کننده درجه حرارت داخلی بدن، وقتی فرد در محیط سرد قرار می‌گیرد، حدود $33-$ است. لذا می‌توان دریافت که دستگاه کنترل‌کننده درجه حرارت بسیار کارآمدتر از دستگاه کنترل فشار می‌باشد.

پس‌نورد مثبت در برخی موارد، به ایجاد حلقه معیوب و مرگ منجر می‌گردد

این سؤال مطرح می‌شود که چرا تمام دستگاه‌های تنظیم‌کننده بدن به شکل پس‌نورد منفی عمل می‌کنند، نه پس‌نورد مثبت؟ اگر به ماهیت پس‌نورد مثبت توجه کنیم، درمی‌یابیم که پس‌نورد مثبت به جای ثبات، به بی‌ثباتی و اغلب مرگ می‌انجامد.

شکل ۴-۱ مثالی را نشان می‌دهد که در آن، پس‌نورد مثبت به مرگ می‌انجامد. براساس این شکل که کارایی پمپ قلبی را نشان می‌دهد، قلب یک انسان سالم در حدود ۵ لیتر خون در هر دقیقه پمپ می‌کند. اگر انسان ناگهان ۲ لیتر خون از دست بدهد، مقدار خون در بدن چنان کاهش می‌یابد که خون کافی برای فعالیت مناسب پمپ قلبی در دسترس نمی‌باشد. در نتیجه، فشار شریانی پایین می‌افتد و خون به میزان مورد نیاز از طریق عروق کرونر به میوکارد نمی‌رسد. لذا قلب تضعیف می‌شود، فعالیت پمپ کاهش می‌یابد، جریان خون کرونر افت بیشتری پیدا

1. positive feedback

می‌یابیم که این دستگاه، تعداد زیادی مکانیسم کنترل‌کننده مرتبط با هم دارد. برخی از آنها به شکل دستگاه‌های پس‌نورد ساده هستند که قبلاً شرح داده شدند. بسیاری از آنها چنین نیستند. به عنوان مثال، برخی حرکات بدن چنان سریع رخ می‌دهد که فرصت کافی برای سیگنال‌های عصبی وجود ندارد تا از قسمت‌های محیطی بدن به مغز بروند و سپس بار دیگر به محیط بازگردند و حرکت را تنظیم کنند. بنابراین مغز از مکانیسمی موسوم به «کنترل پیش‌گستر»^۱ برای ایجاد انقباضات عضلانی مناسب استفاده می‌کند. سیگنال‌های حسی که از قسمت‌های حرکتی به مغز می‌رسند، مغز را نسبت به انجام صحیح حرکت آگاه می‌کنند. اگر حرکت صحیح نباشد، مغز سیگنال‌های پیش‌گستر را که به عضلات می‌فرستد، در دفعه بعد اصلاح می‌کند. اگر هنوز اصلاح بیشتر لازم باشد، این کار در حرکات بعدی تکرار می‌شود. این فرآیند را «کنترل سازگار شونده»^۲ می‌نامند. این یک پس‌نورد منفی تأخیری است. لذا می‌توان دریافت که مکانیسم‌های تنظیم‌کننده تا چه حد ممکن است پیچیده باشند. حیات انسان به عملکرد صحیح تمام این مکانیسم‌ها بستگی دارد. بنابراین، بخش عمده‌ای از این کتاب به بحث درباره این مکانیسم‌های حیات‌بخش اختصاص یافته است.

تفاوت‌های فیزیولوژیک

اگر چه برخی از متغیرهای فیزیولوژیک مثل غلظت پلاسمایی یون‌های پتاسیم، کلسیم و هیدروژن به طور دقیقی تنظیم می‌شوند، سایر موارد مثل وزن بدن و چربی بدن در بین افراد مختلف، مقادیر متنوعی را دارند و حتی در یک فرد در دوره‌های مختلف زندگی نیز متفاوت هستند. فشارخون، پمپاژ قلبی، سرعت متابولیسم، فعالیت سیستم عصبی، هورمون‌ها و سایر متغیرهای فیزیولوژیک در طی روز هنگامی که ما حرکت می‌کنیم و فعالیت‌های معمول روزانه را انجام می‌دهیم تغییر می‌کنند. بنابراین زمانی که ما در مورد مقادیر «طبیعی» صحبت می‌کنیم این مطلب را قبول داریم که سیستم‌های کنترلی بدن به صورت پایدار به تغییرات واکنش نشان می‌دهند و این تفاوت‌ها ممکن است در بین افراد مختلف بسته به وزن و قد بدن، رژیم غذایی، سن، جنس، محیط، ژنتیک و سایر عوامل متنوع باشد.

می‌یابد که شکاف رگ پر و خونریزی متوقف شود. گاه این مکانیسم از مسیر طبیعی خود خارج می‌شود و به تشکیل لخته‌های ناخواسته منجر می‌گردد. چنین واقعه‌ای اکثر حملات حاد قلبی را آغاز می‌کند؛ تشکیل لخته در سطح داخلی یک شریان کرونر بر روی یک پلاک آترواسکلروز آغاز می‌شود و رشد آن تا انسداد کامل شریان ادامه می‌یابد.

زایمان نمونه دیگری از یک پس‌نورد مثبت با ارزش می‌باشد. وقتی انقباضات رحمی تا آن حد قوی می‌شود که برای شروع جلو راندن سر نوزاد از خلال گردن رحم کافی باشد، کشش گردن رحم سیگنال‌هایی را از طریق عضله رحمی به طرف جسم رحم ارسال می‌کند تا قدرت انقباضات افزایش یابد. انقباضات رحمی گردن را می‌کشند و کشش گردن انقباضات قویتری ایجاد می‌کند. وقتی این فرآیند به اندازه کافی قوی شود، نوزاد متولد می‌شود. اگر قدرت انقباضات کافی نباشد، آنها معمولاً از بین می‌روند و چند روز بعد، بار دیگر ظاهر خواهند شد.

یکی دیگر از کاربردهای مفید پس‌نورد مثبت، تولید سیگنال‌های عصبی است. وقتی غشا یک سلول عصبی تحریک می‌شود، مقدار کمی یون‌های سدیم از خلال کانال‌های سدیم به داخل سلول نشت می‌کند. یون‌های سدیمی که وارد سلول می‌شوند، پتانسیل غشاء را تغییر می‌دهند و در نتیجه، کانال‌های بیشتری باز می‌شوند؛ پتانسیل بیشتر تغییر می‌کند، باز هم کانال‌های بیشتری باز می‌شوند و این فرآیند ادامه می‌یابد. می‌بینیم که یک نشت اندک، به هجوم یون‌های سدیم به داخل سلول و ظهور پتانسیل عمل عصبی می‌انجامد. این پتانسیل عمل یک جریان الکتریکی را در طول قسمت داخلی و خارجی عصب می‌فرستد و پتانسیل‌های عمل بیشتری را ایجاد می‌کند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که سیگنال عصبی کل مسیر را تا انتهای سلول طی کند.

باید بدانیم که هر پس‌نورد مثبت مفید، در واقع بخشی از یک فرآیند کلی پس‌نورد منفی می‌باشد. به عنوان مثال، فرآیند پس‌نورد مثبت انعقاد، یک فرآیند پس‌نورد منفی برای حفظ حجم خون می‌باشد. همچنین پس‌نورد مثبتی که سیگنال‌های عصبی را ایجاد می‌کند، به اعصاب اجازه می‌دهد تا در هزاران پس‌نورد منفی دستگاه عصبی شرکت کنند.

انواع پیچیده‌تر سیستم‌های کنترل‌کننده —

کنترل پیش‌گستر و کنترل سازگار شونده

در ادامه مطالب همین کتاب، در بحث پیرامون دستگاه عصبی در

1. feed-forward control

2. adaptive control