مروری بر روشهای مدلسازی و تحلیل سیستمهای اسکلتی - عضلانی

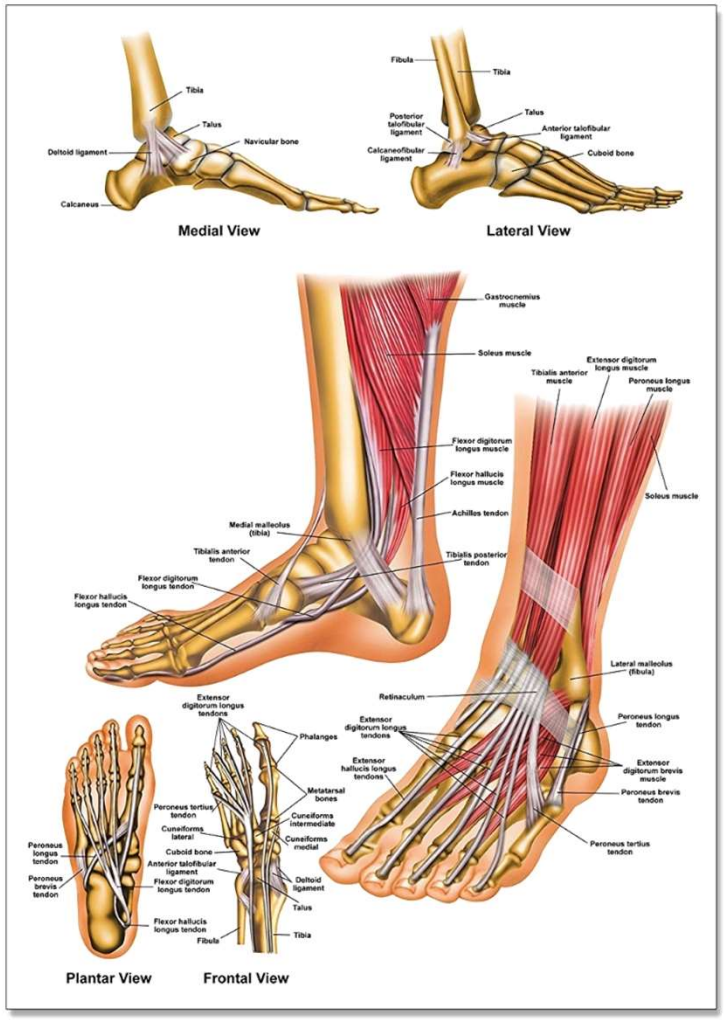
ارائه دهنده: دکتر لاله فتاحی

آذر ۹۸

تعاریف اولیه

بیومکانیک به بررسی سینماتیکی و سینتیکی اندام‌های حیاتی در حالت استاتیکی و دینامیکی می‌پردازد. آشنایی با آناتومی بدن که به مطالعه و تشریح ساختار بدن و نحوه ارتباط قسمتهای مختلف آن می‌پردازد و نیز آنتروپومتری یا اندازه‌گیری ابعاد قسمتهای مختلف بدن، وزن آنها و قدرت عضلات نیز در مدلسازی و تحلیل سیستمهای بیومکانیکی ضروری است.

اعضای سیستم اسکلتی– عضلانی



- استخوان (Bone)
- ماهیچه (Muscle)
- مفصل (Joint)
- غضروف (Cartilage)
- رباط (Ligament)
- تاندون (Tendon)

استخوان

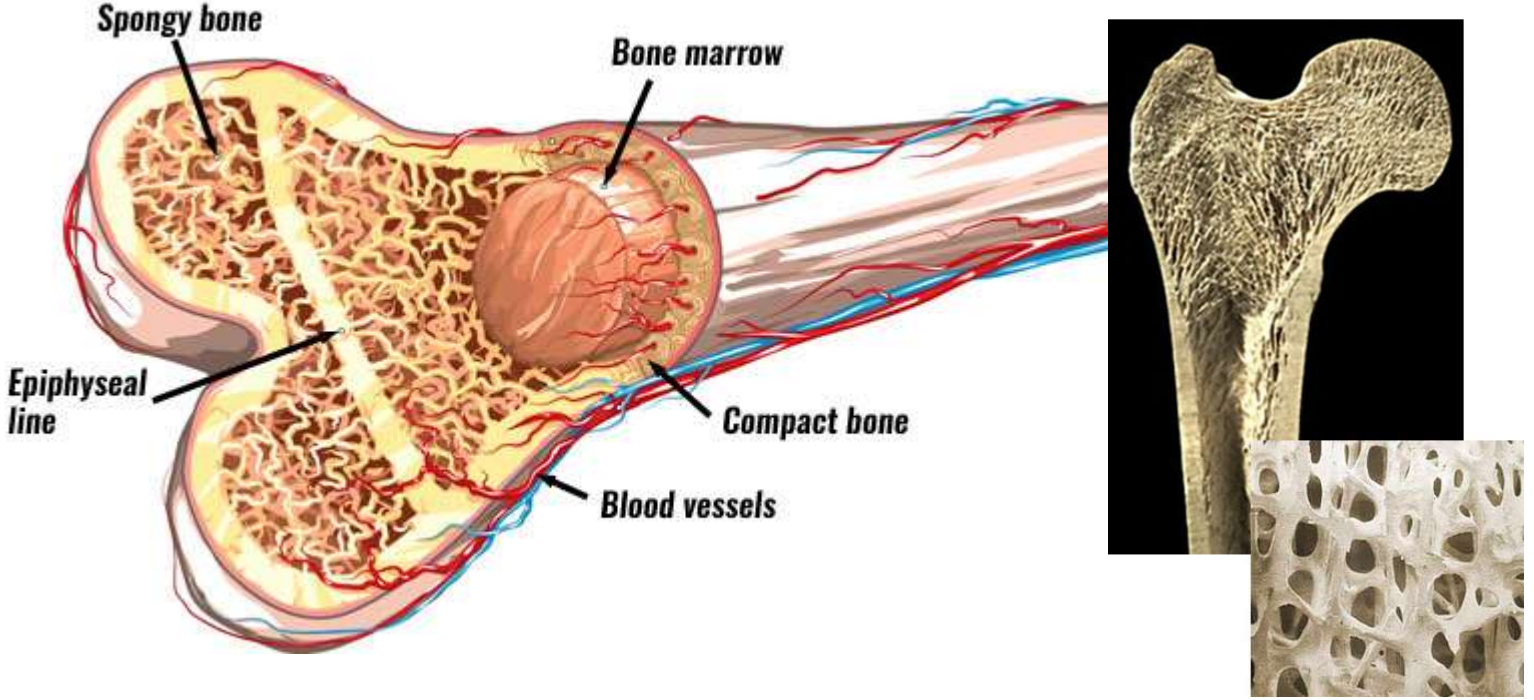
- استخوان ماده زنده و محکمی است که داربست اسکلتی بدن انسان را می‌سازد و به کمک عضلات، تاندونها، رباطها و مفاصل، امکان حرکت را به بدن می‌دهد. در برخی نقاط نیز بافتهای حساس را دربرگرفته و از آنها محافظت می‌کند.
- در زمان تولد ۲۷۰ استخوان در بدن وجود دارد که با افزایش سن، برخی از آنها به یکدیگر چسبیده و در نهایت ۲۰۶ استخوان در یک فرد بالغ وجود دارد.

استخوان

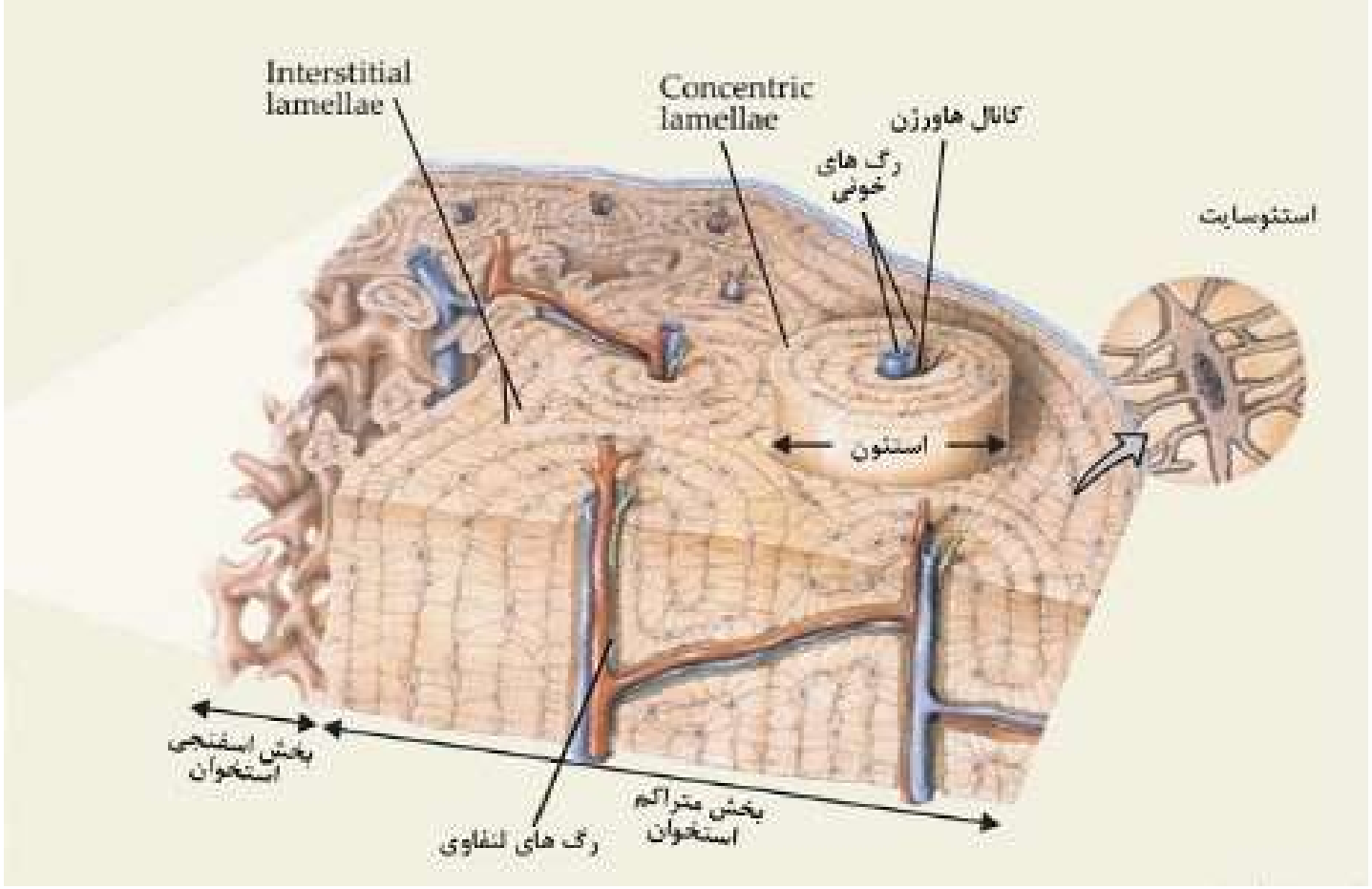
- اصلی‌ترین مواد تشکیل‌دهنده استخوان، کربنات کلسیم، فسفات کلسیم، کلاژن (عامل انعطاف‌پذیری) و آب است. کلاژن در استخوان با بلورهای کلسیم ترکیب شده و ساختار سختی می‌سازد. در واقع، استخوان مانند یک بتون مسلح به نظر می‌رسد که رشته‌های کلاژن آن مانند میل‌گردهای فولادی در بتون برای تحمل کشش، درون سیمانی از بلورهای کلسیم قرار دارند.

ساختار استخوان

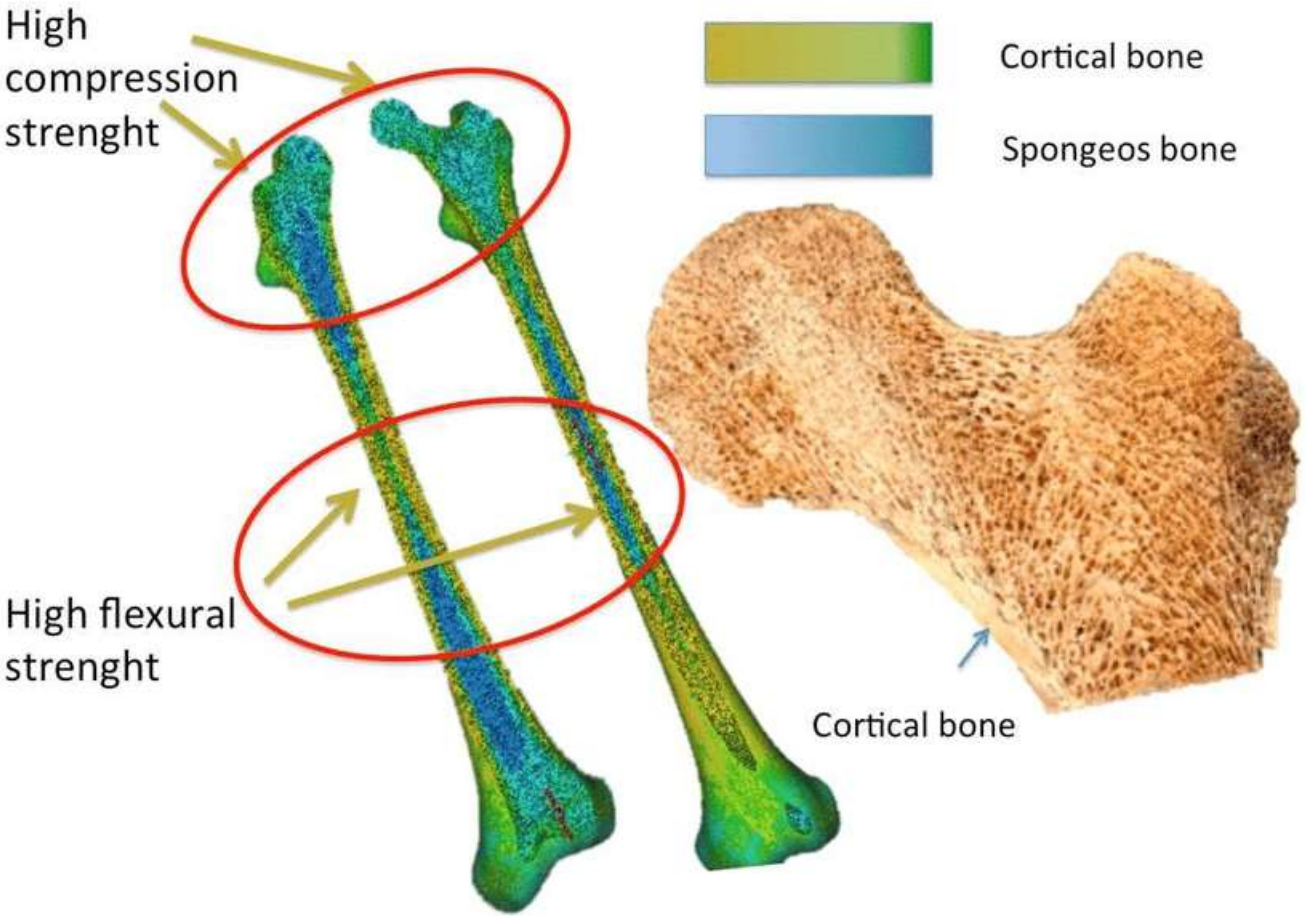
- بافت قشری (Cortical)
- بافت اسفنجی (Spongy) یا سوراخ‌دار (Cancellous) یا میله‌ای (Trabecular)



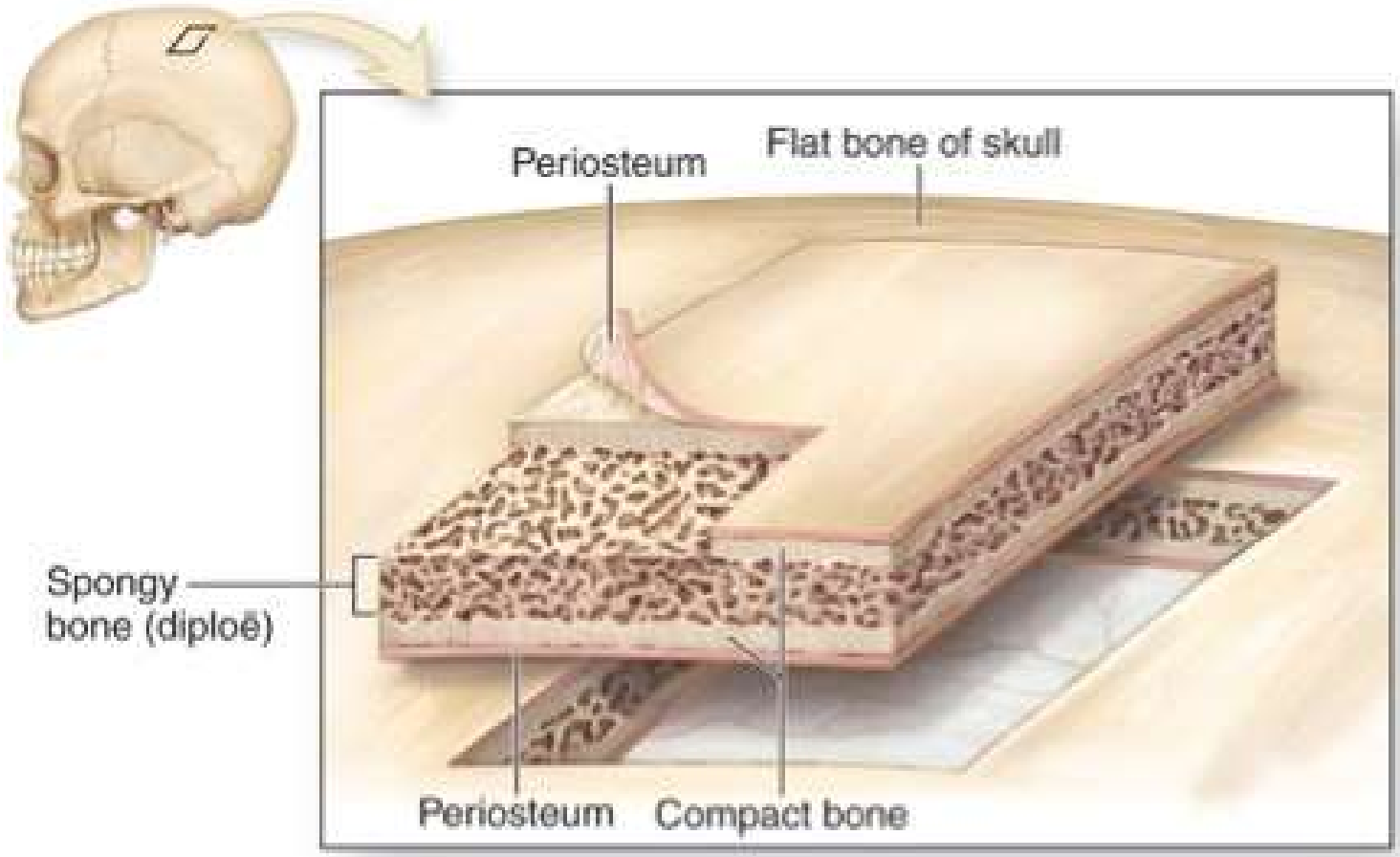
ساختار استخوان



مقایسه بافت قشری و اسفنجی در یک استخوان بلند



ساختار یک استخوان پهن



خواص مکانیکی استخوان

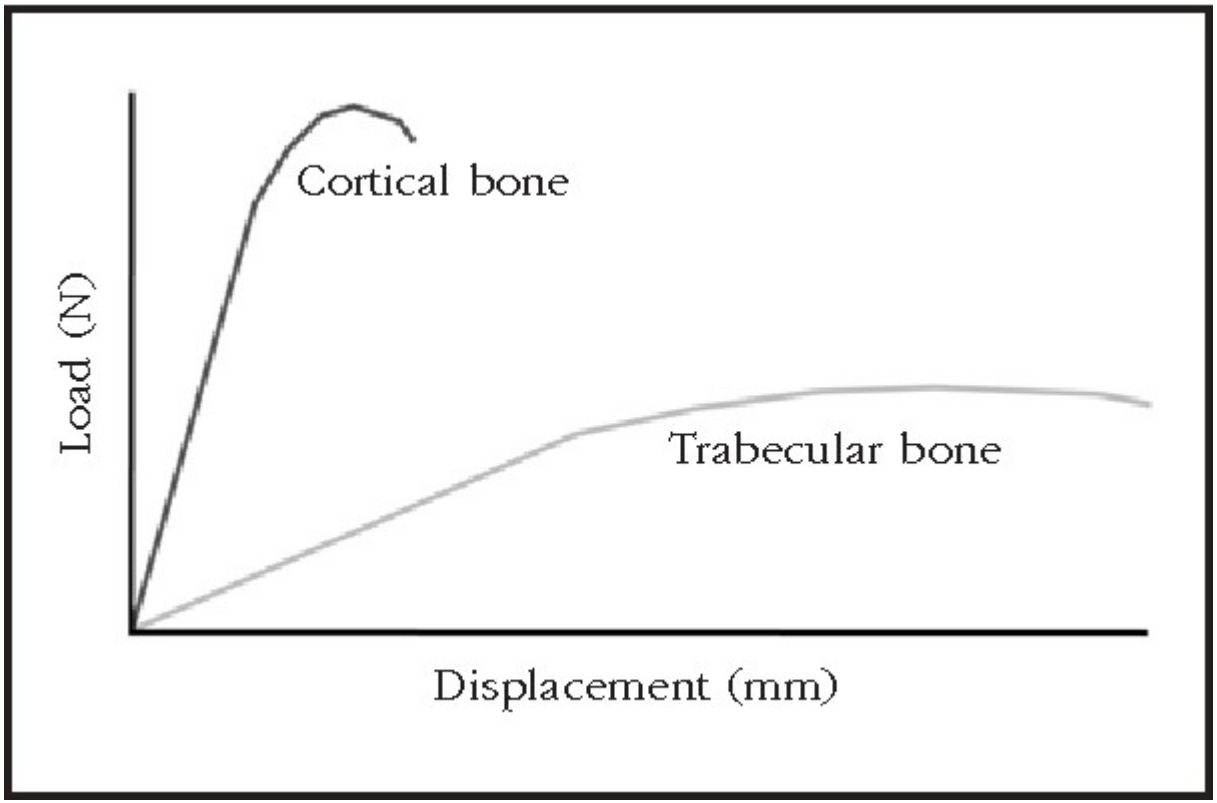
استخوان یک ماده ناهمسانگرد است که خواص فیزیکی آن به جهت بارگذاری بستگی دارد و در جهت محوری بیشترین سختی را دارد. برای مثال حدود ۱۷ گیگاپاسکال در جهت محوری در مقابل ۱۲ گیگاپاسکال در جهت محیطی.

خواص مکانیکی استخوان

مقاومت فشاری استخوان بیشترین مقدار و مقاومت کششی بیش از مقاومت برشی است. برای مثال تنش نهایی استخوان Femur در فشار۱۹۳ مگاپاسکال، در کشش ۱۳۳ مگاپاسکال و در برش ۶۸ مگاپاسکال است. این مشخصات یادآور یک ماده Ductile است.

محتوای کلسیم و میزان تخلخل استخوانهای نواحی مختلف، برروی مدول الاستیک آن تاثیر قابل توجهی دارد.

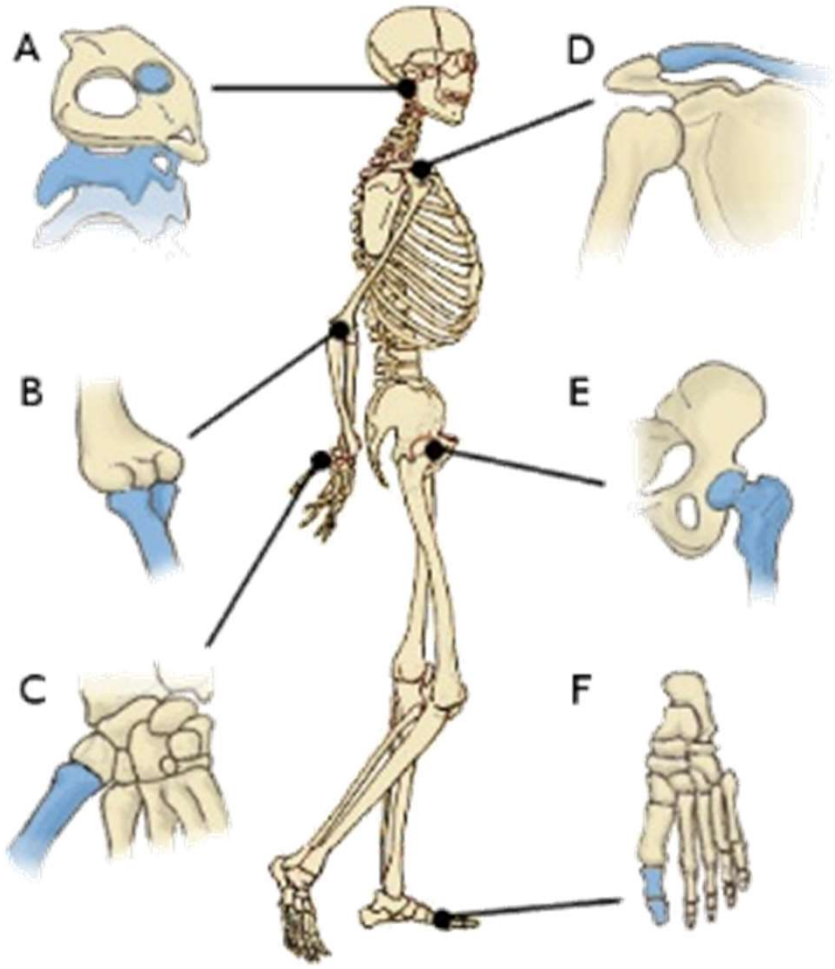
خواص مکانیکی استخوان



مفاصل

- استخوانها توسط مفاصل در کنار یکدیگر قرار گرفته و امکان حرکت و تغییرشکل اسکلت بدن را فراهم می‌سازند. استخوانها عموما در محل مفصل کمی حجیم‌تر هستند تا سطح تماس بیشتری ایجاد شده و حرکت و پایداری بهتری ایجاد شود.

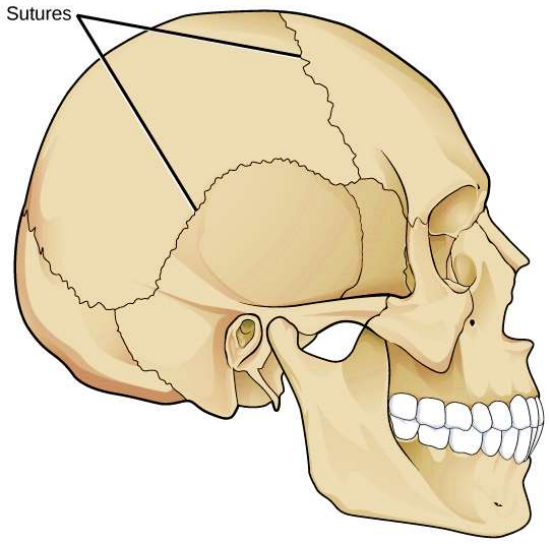
طبقه‌بندی مفاصل بدن برحسب میزان حرکت



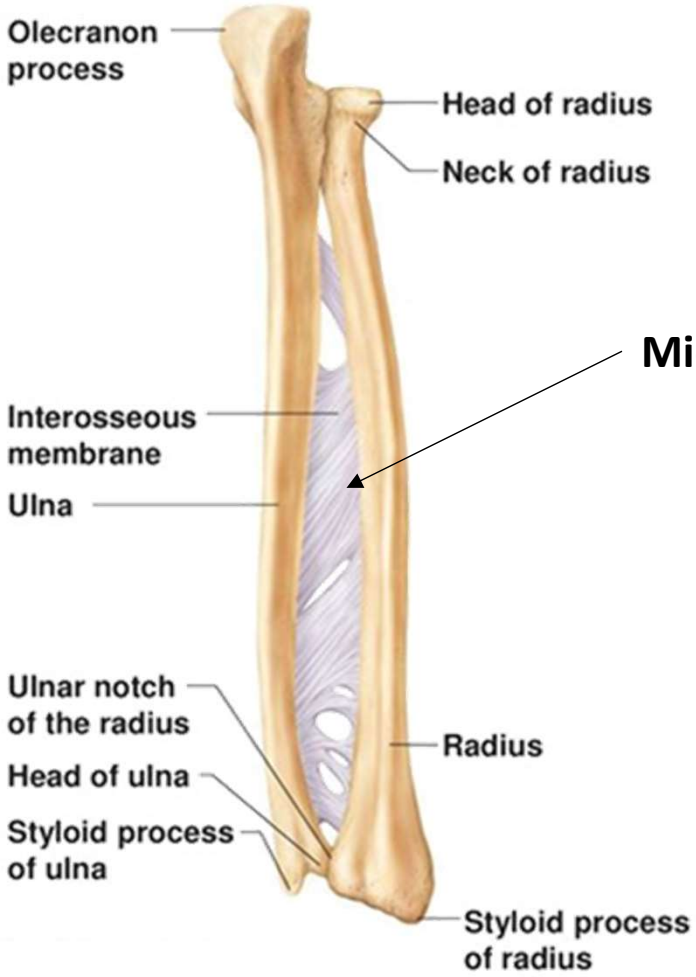
- مفاصل بی‌حرکت
- مفاصل نیمه‌متحرک
- مفاصل متحرک

مفاصل بی‌حرکت

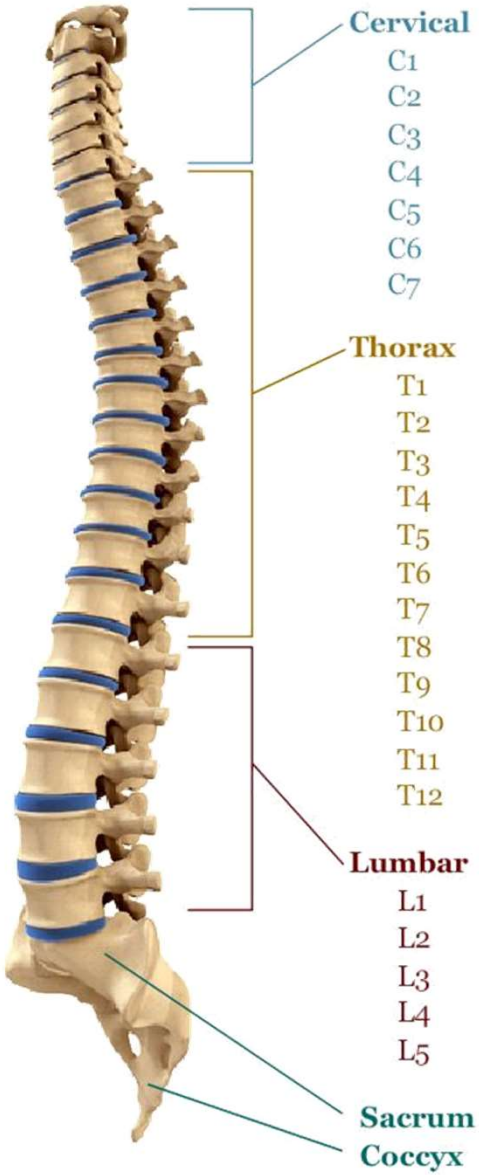
دو سر استخوان توسط غضروف یا رباط بهم متصل شده اما حرکتی بین دو استخوان وجود ندارد مانند مفصل بین استخوانهای جمجمه

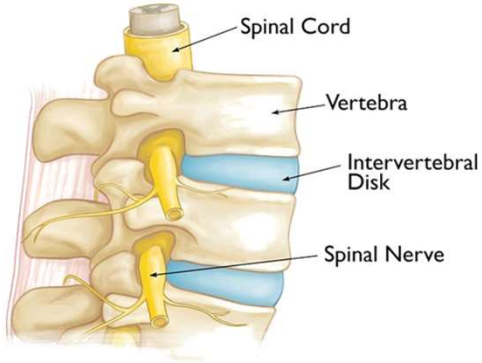


مفاصل بی‌حرکت



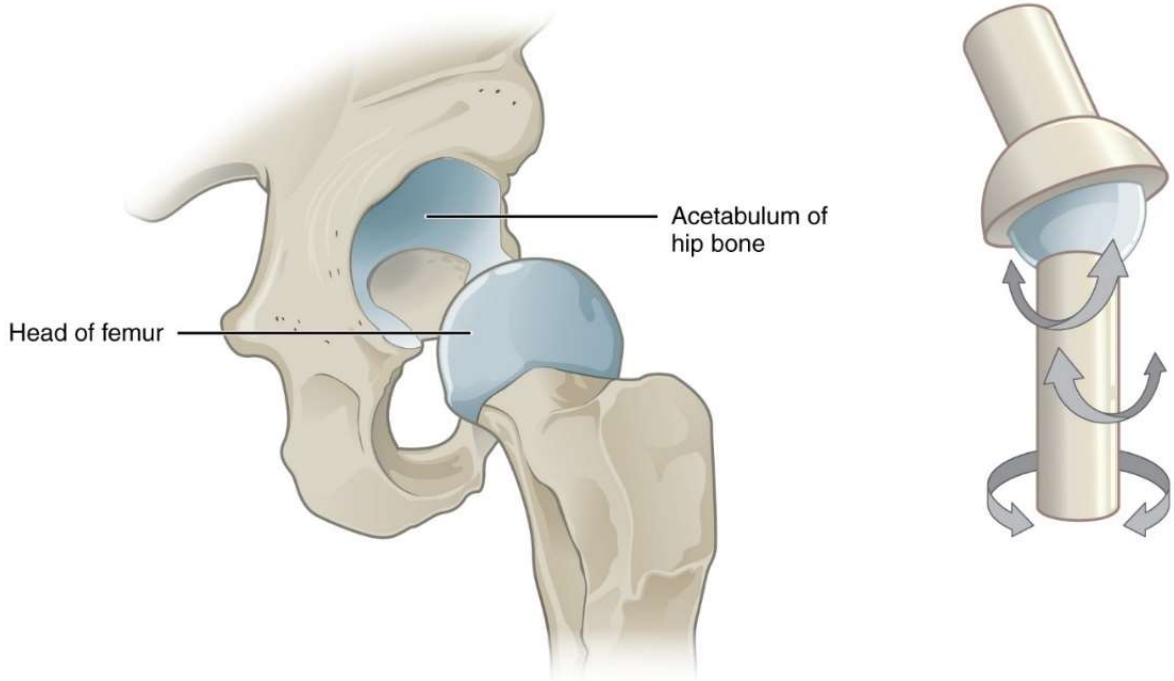
مفاصل نیمه‌متحرک



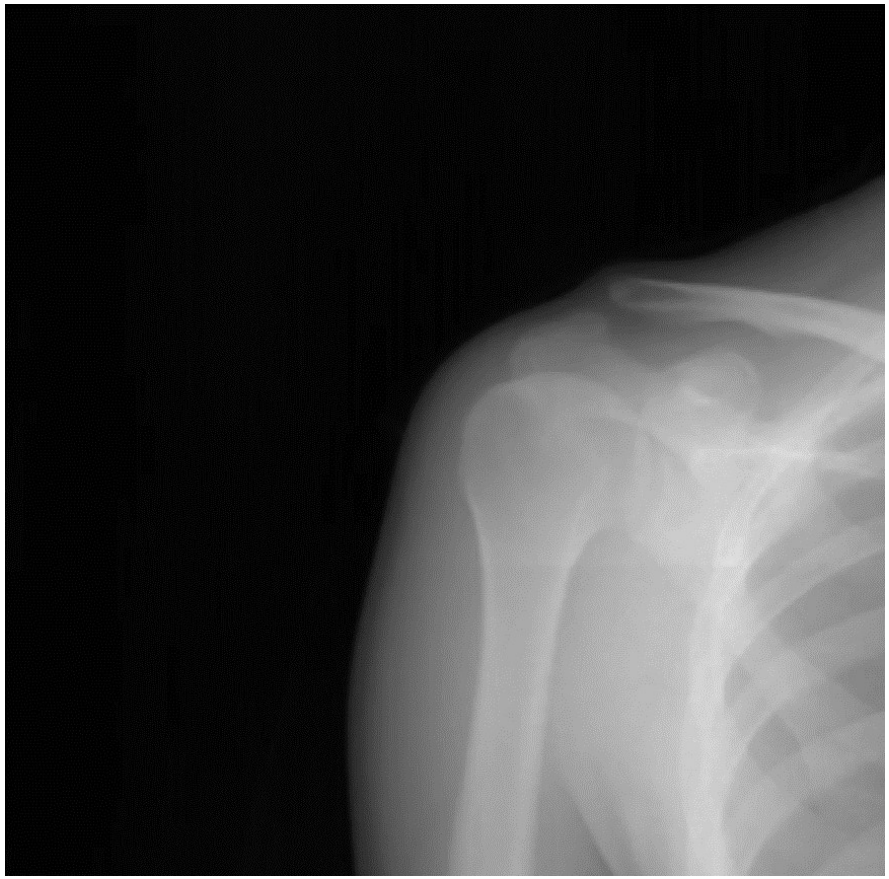


مفاصل متحرک

دو استخوان تشکیل‌دهنده مفصل تقریبا آزادانه در کنار هم حرکت می‌کنند مانند مفصلهای زانو، مچ دست، لگن و آرنج



مفاصل متحرک



طبقه‌بندی مفاصل براساس نوع حرکت

۱- مفصل لغزشی (Gliding)

۲- مفصل لولایی (Hinge)

۳- مفصل پیچشی (Pivot)

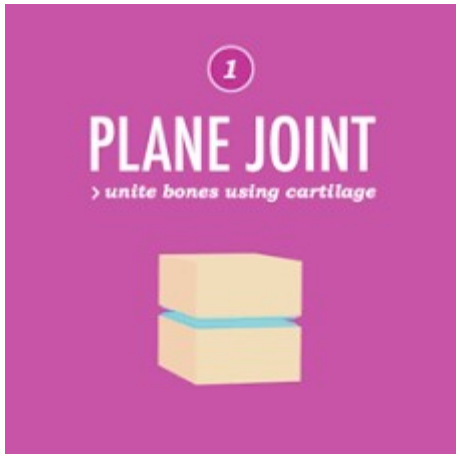
۴- مفصل کندیلار یا تخم‌مرغی (Condylar)

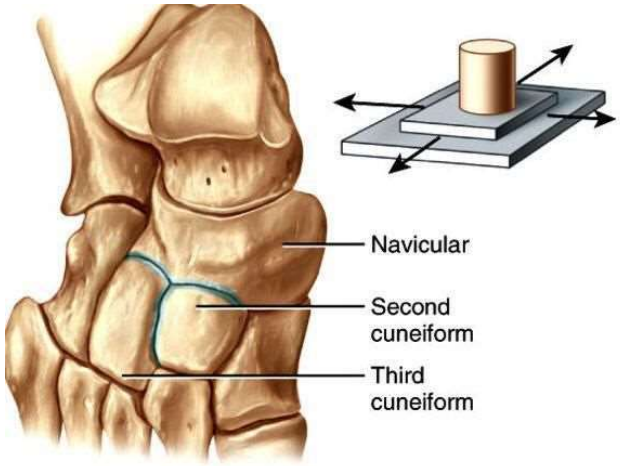
۵- مفصل زینی (Saddle)

۶- مفصل توپ – کاسه‌ای یا کروی (Ball and Socket)

مفصل لغزشی

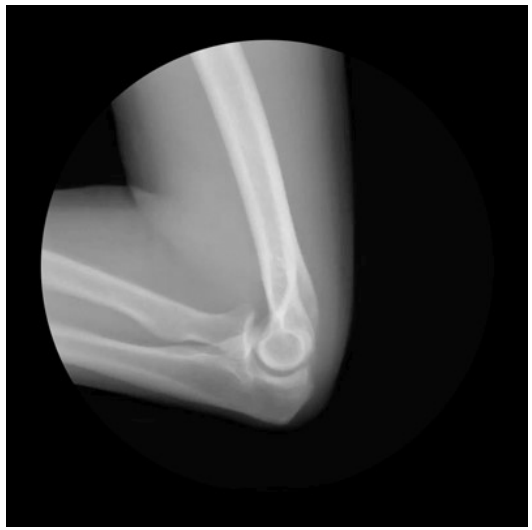
در این مفصل دو استخوان بصورت محدودی نسبت به هم می لغزند و توسط رباط های بسیار قوی بهم متصل شده اند. مانند مفصل ترقوه با کتف و جناغ، مفصل بین استخوانهای کوچک مچ دست یا پا





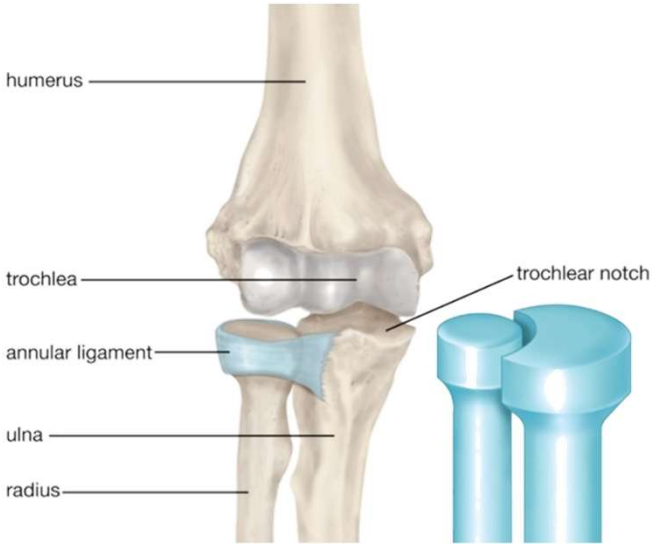
مفصل لولایی

در این مفصل فقط در یک جهت امکان خم و راست شدن دو استخوان نسبت به هم وجود دارد مانند مفصل آرنج، زانو، مچ پا و مفصل بین انگشتان



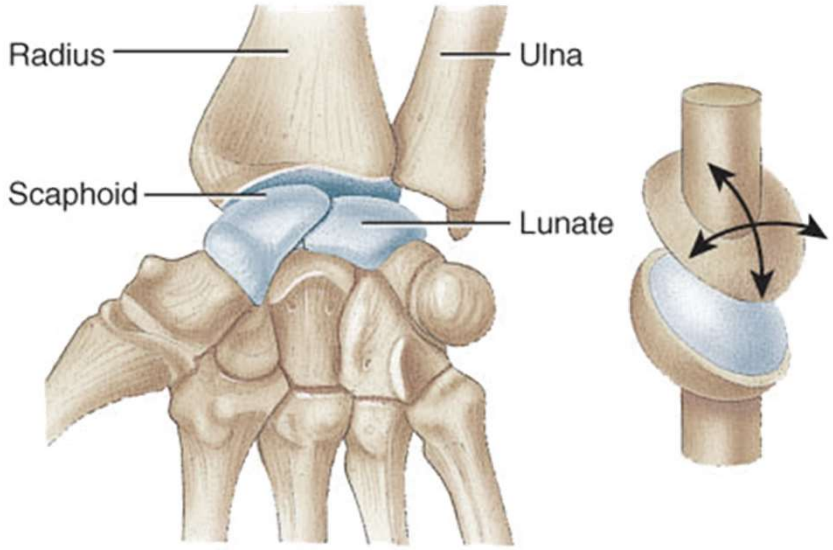
مفصل پیچشی یا محوری

در این مفصل یک استخوان حول محور مرکزی استخوان دیگر می‌چرخد. مانند مفصل بین استخوانهای رادیوس و اولنا در دست و مفصل بین مهره های اول و دوم گردن



مفصل تخم‌مرغی

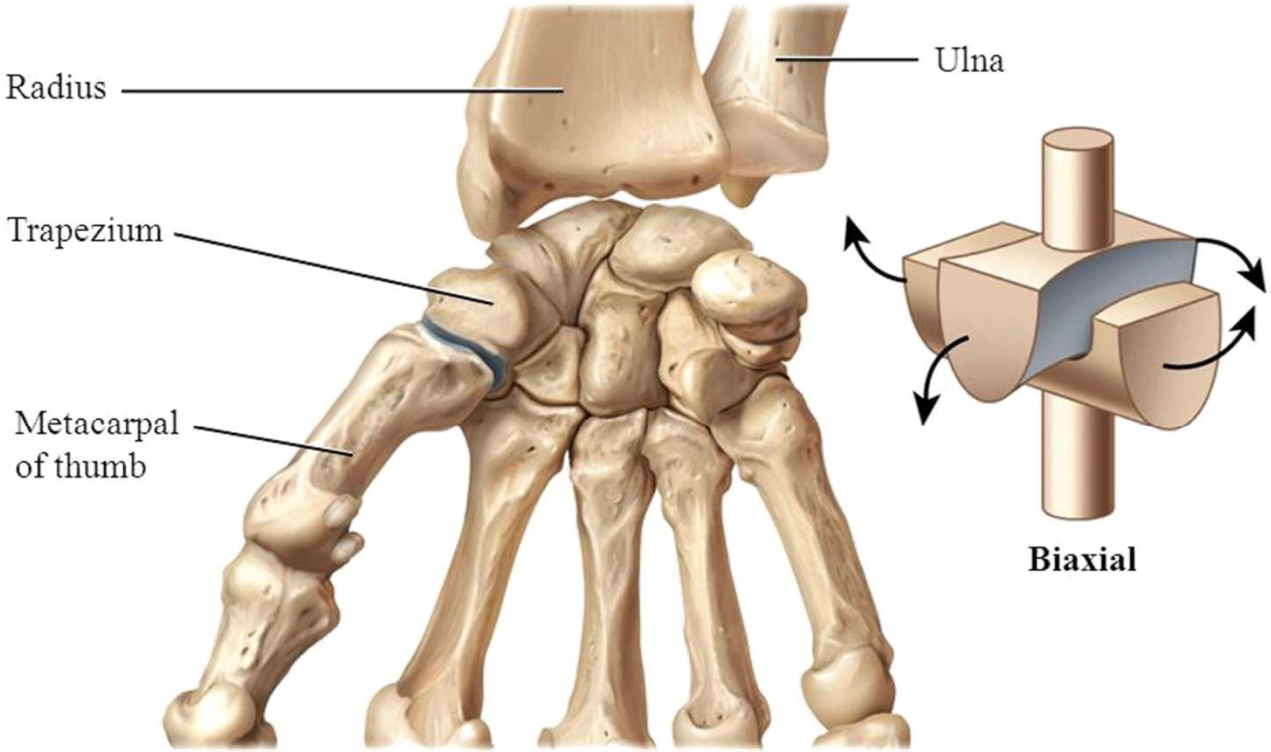
در این مفصل انتهای یک استخوان که به شکل بیضوی (تخم‌مرغی) است در حفره استخوان دیگر می‌چرخد.



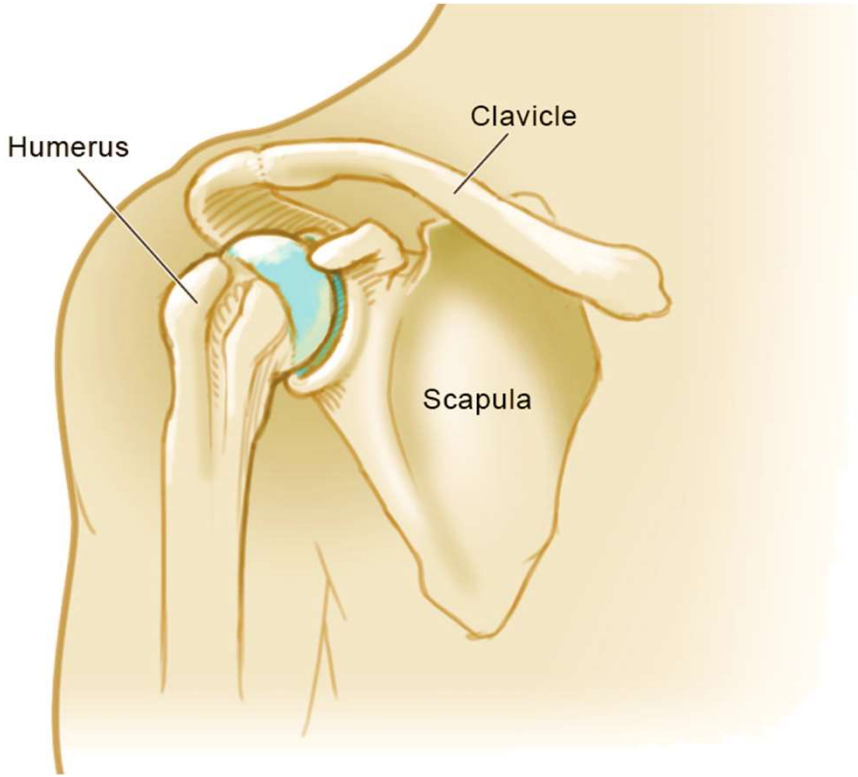
(d) Condyloid joint between radius and scaphoid and lunate bones of the carpus (wrist)

مفصل زینی

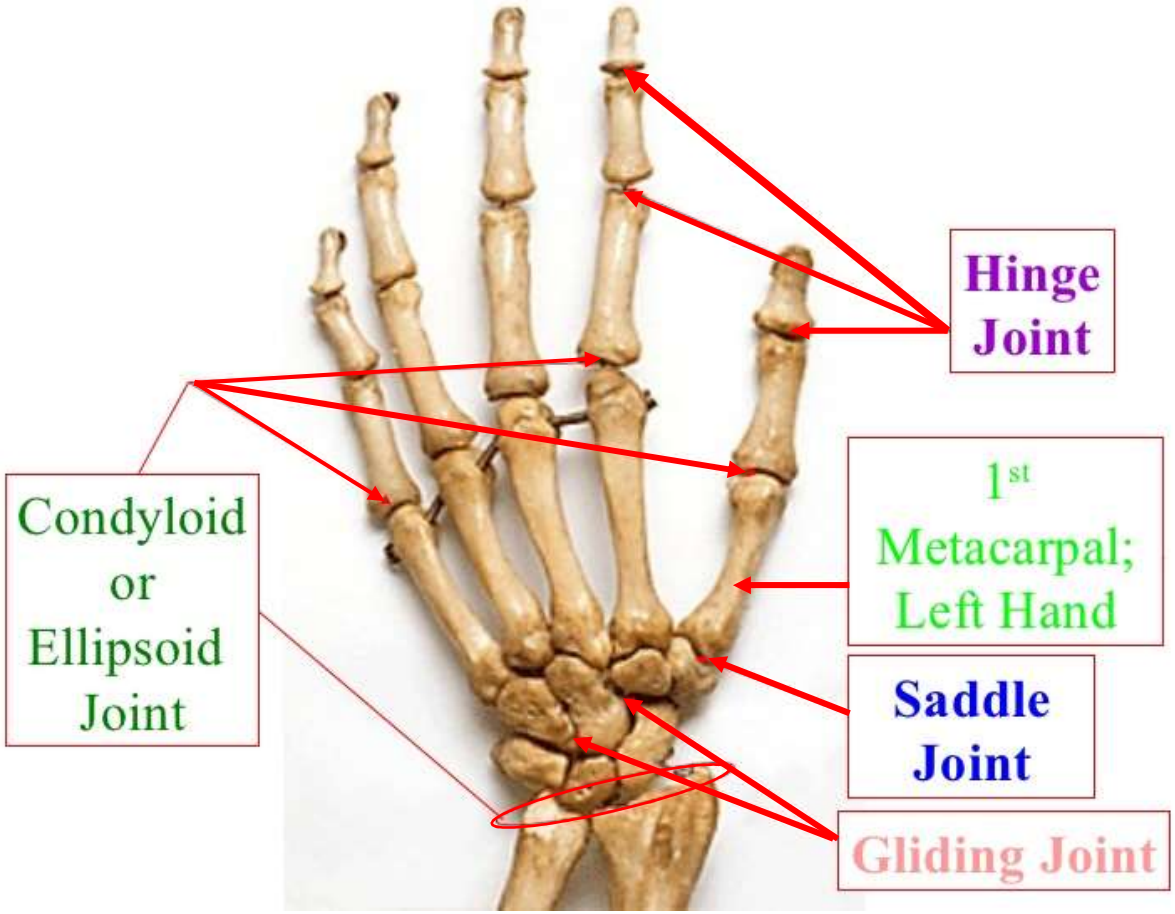
5
SADDLE JOINT
› biaxial movement


Radius
Ulna
Trapezium
Metacarpal
of thumb
Biaxial

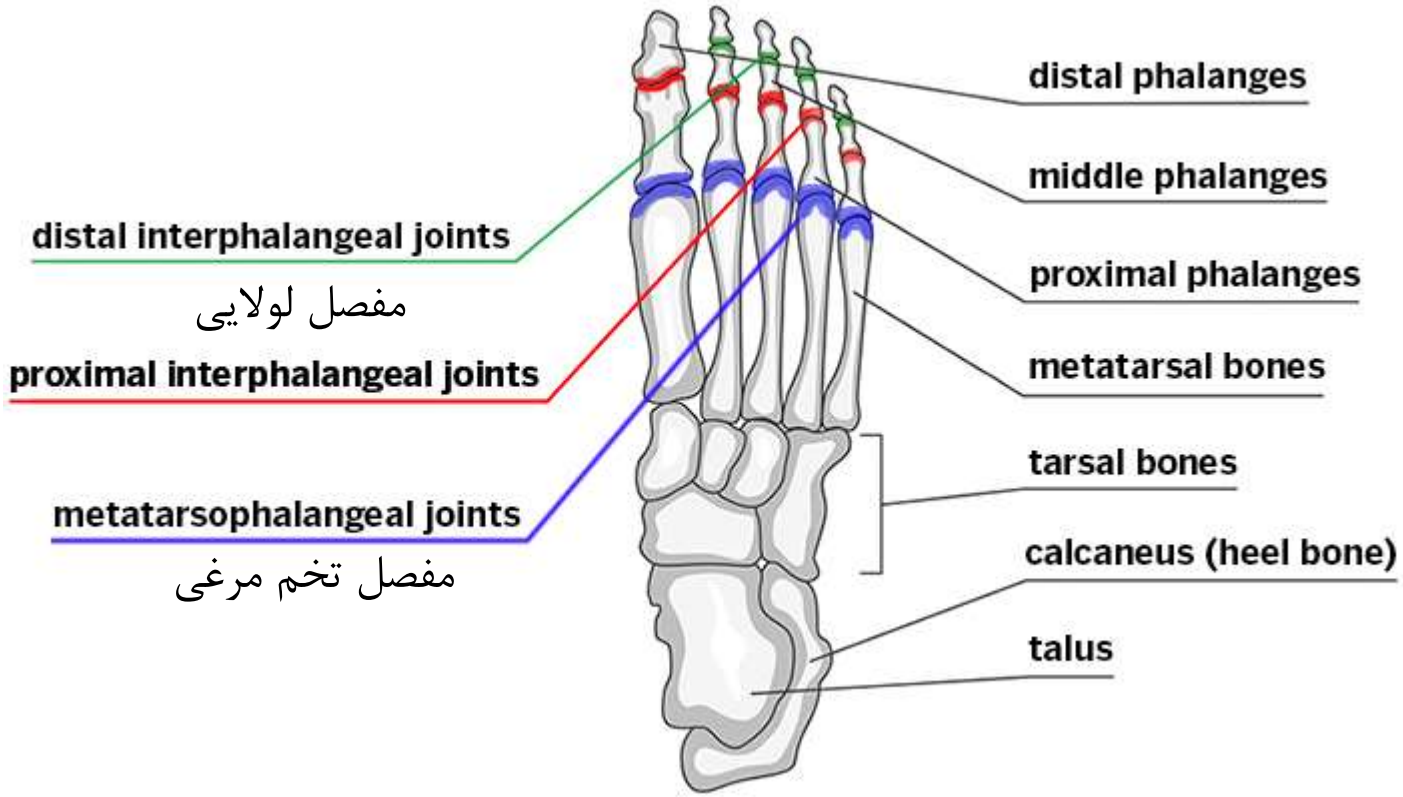
مفصل گوی و کاسه ای



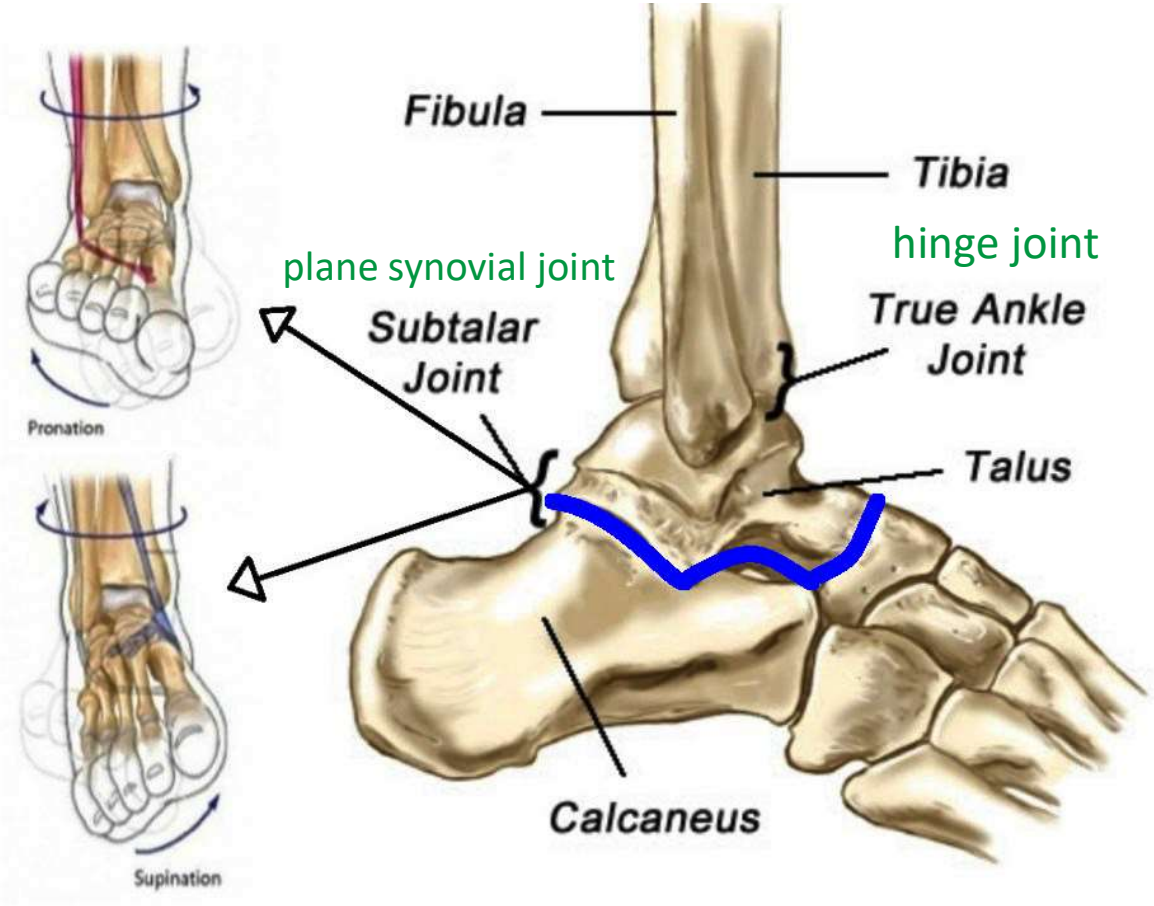
مفاصل دست


Hinge Joint
1st Metacarpal; Left Hand
Saddle Joint
Gliding Joint
Condyloid or Ellipsoid Joint

مفاصل کف پا


distal phalanges
middle phalanges
proximal phalanges
metatarsal bones
tarsal bones
calcaneus (heel bone)
talus
distal interphalangeal joints
مفصل لولایی
proximal interphalangeal joints
metatarsophalangeal joints
مفصل تخم مرغی

نمای جانبی مفاصل پا



انواع غضروف

- غضروف شفاف Hyaline Cartilage

در انتهای استخوانها و مفاصل بدن، غضروف حنجره و غضروفی که در تیغه وسط بینی قرار دارد.

- غضروف ارتجاعی Elastic Cartilage

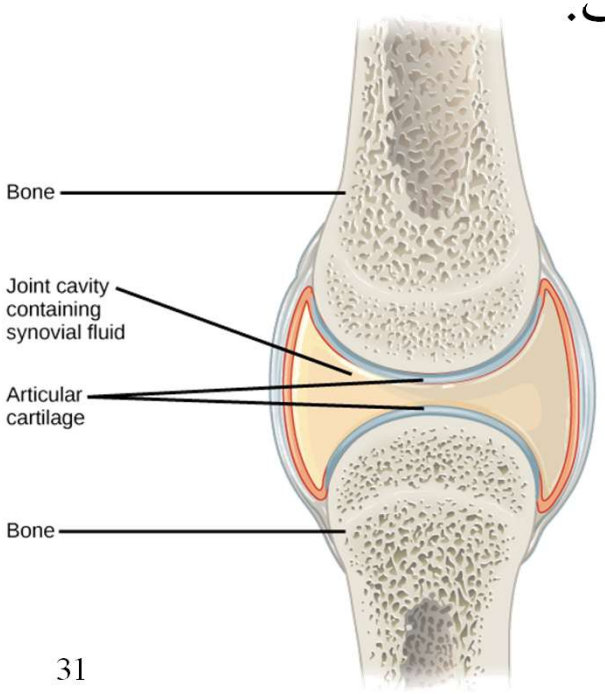
این غضروف خاصیت ارتجاعی بیشتری از غضروف شفاف دارد مانند غضروف لاله گوش

- غضروف فیبری Fiber Cartilage

این غضروف بیشترین خاصیت ارتجاعی را دارد مانند دیسک بین‌مهره‌ای

غضروف مفصلی

لایه‌ای است که انتهای استخوانها را پوشانده و موجب حرکت دو استخوان نسبت به هم و کاهش میزان تنش در نقطه تماس بین استخوانها و روان‌سازی حرکت استخوانهاست.

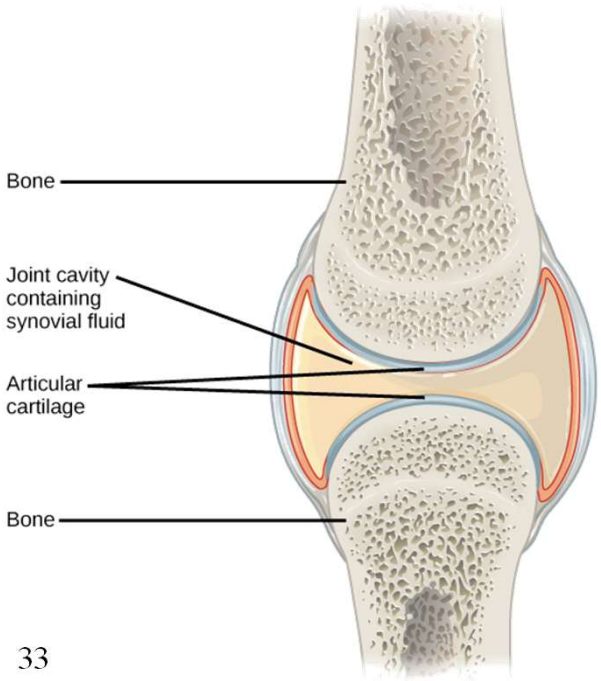


خواص مکانیکی غضروف مفصلی

- غضروف مفصلی یک ماده ناهمگن است که مهمترین عامل این رفتار نوع پراکندگی و جهت‌گیری فیبرهای کلاژن است.
- تحت فشار و کشش رفتارهای متفاوتی در غضروف مفصلی به وجود می‌آید. در کشش بخش عمده‌ای از نیروها توسط فیبرهای کلاژن تحمل می‌شود، درحالی‌که در فشار، این فیبرها نیرویی تحمل نمی‌کنند و نیرو توسط بخش غیرفیبری (مانند سیال سینویال) تحمل می‌شود.
- غضروفهای مفصلی مانند بسیاری از مواد نرم دیگر دارای رفتار ویسکوالاستیک و تغییرات خواص وابسته به نرخ کرنش است.

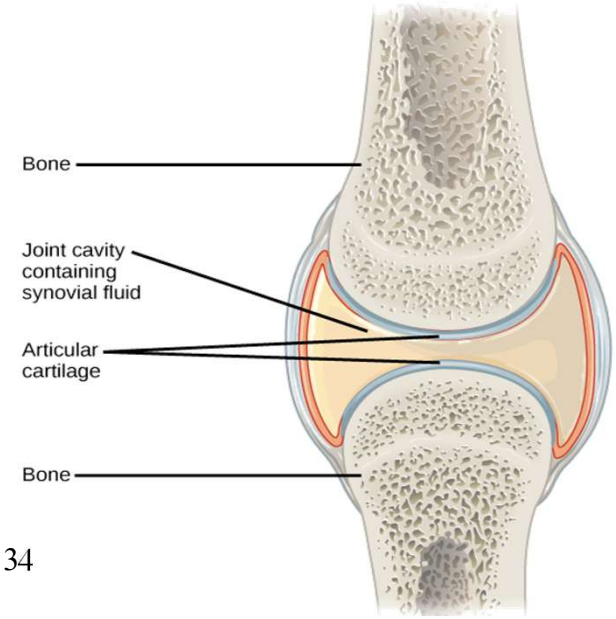
کپسول مفصلی

لایه‌ای است که دور تا دور مفصل را پوشانده و در بالا و پایین در انتهای غضروف محکم به استخوان می‌چسبد و دو سر استخوان در محل مفصل را در کنار هم نگه می‌دارد.

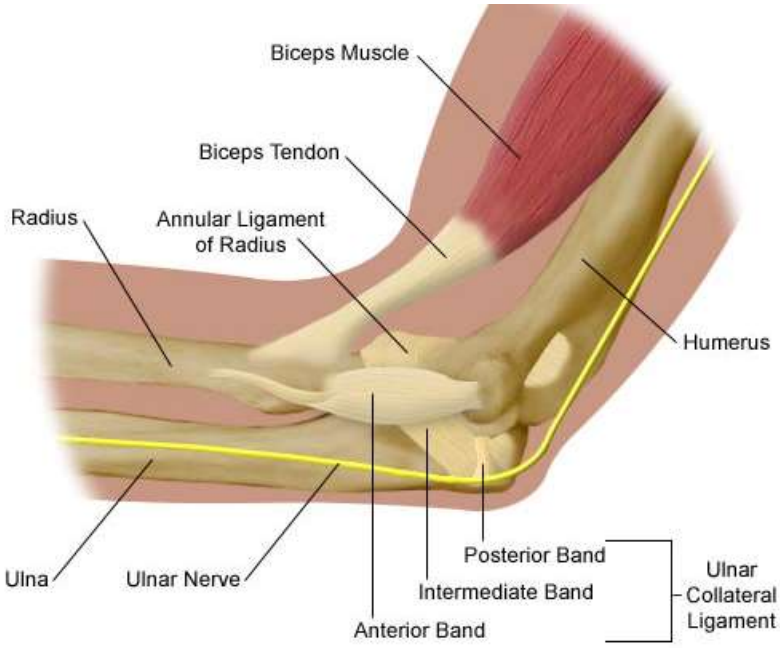


سیال سینوویال

مایع لزجی است که در درون کپسول مفصلی قرار دارد و توسط لایه سینوویال که سطح داخلی کپسول مفصلی را پوشانده، تولید می‌شود. این مایع موجب روان شدن و لغزش غضروف‌ها بر هم می‌شود و تغذیه غضروف را هم برعهده دارد.



رباط و تاندون

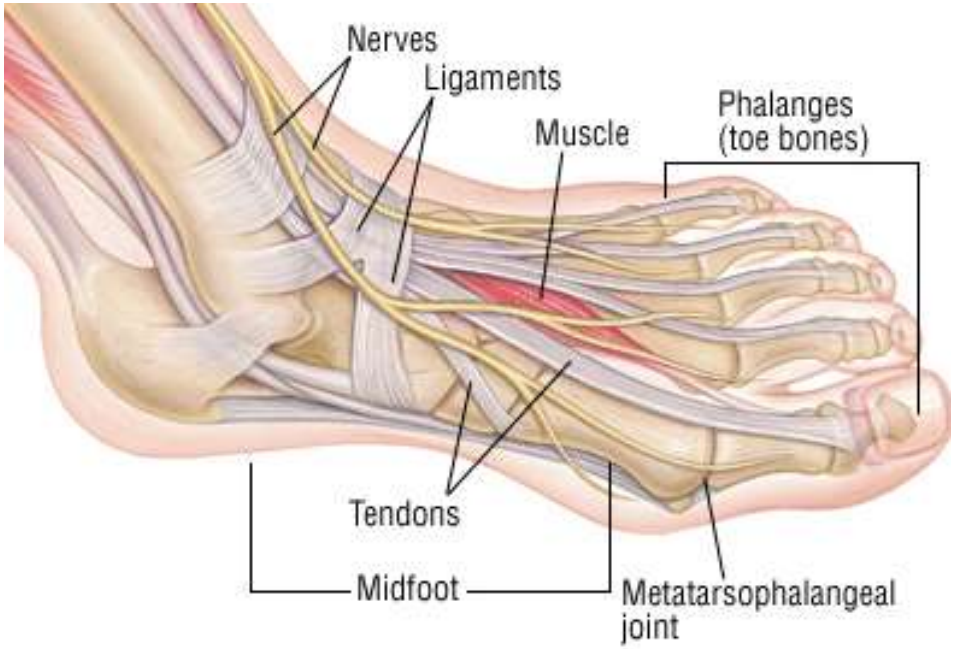


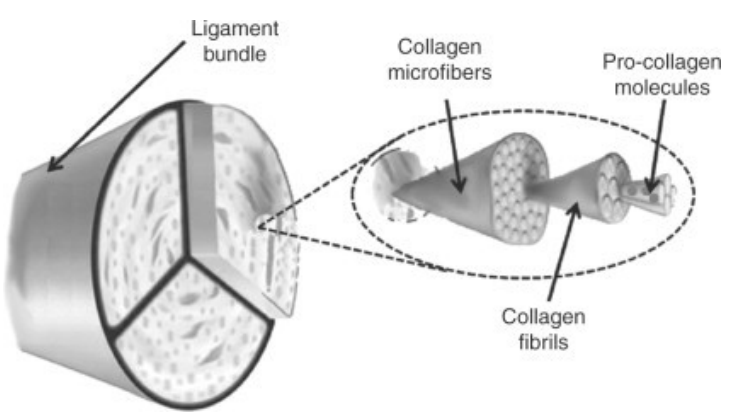
- رباطها رشته های محکمی هستند که استخوانها را در اطراف مفصل بهم وصل کرده و موجب پایداری مفصل می‌شوند.
- تاندونها نوارهایی محکم هستند که ماهیچه و استخوان را بهم وصل کرده و موجب حرکت مفصل می شوند.

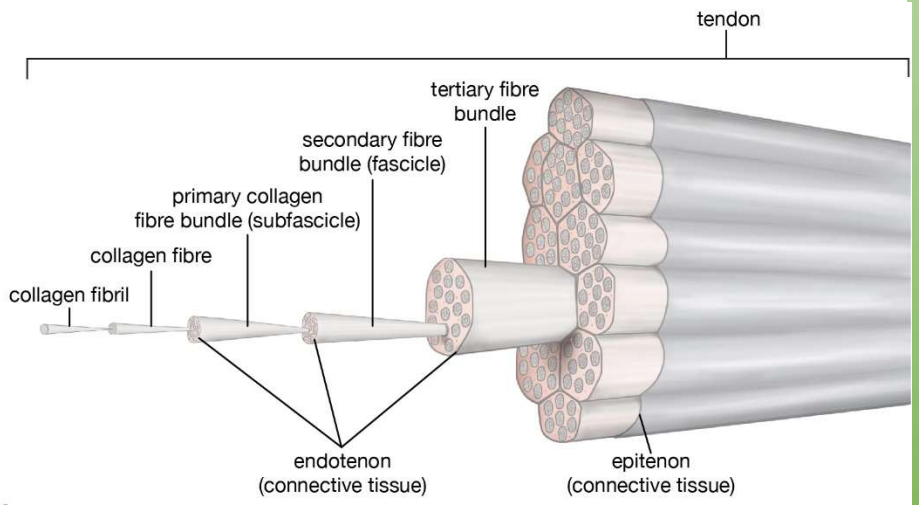
خواص مکانیکی رباط و تاندون

- بیشترین میزان آسیب بافت همبند مربوط به آسیب به رباطها و تاندونها است. این دو بافت از کلاژن ساخته شده‌اند. تفاوت ساختاری آنها به طور عمده به نحوه قرارگیری فیبرهای کلاژن برمی‌گردد. بافتهای کلاژنی، مواد ویسکوالاستیکی هستند که قادر به تحمل و انتقال نیروهای کششی هستند.
- تاندونها و رباطها تا حدود ۴ درصد کرنش را تحمل می‌کنند و در حدود ۸ تا ۱۰ درصد کرنش نیز می‌تواند منجر به پارگی بافت شود. به دلیل ویسکوالاستیک بودن، خصوصیات مکانیکی آنها وابسته به نرخ کرنش می‌باشد.

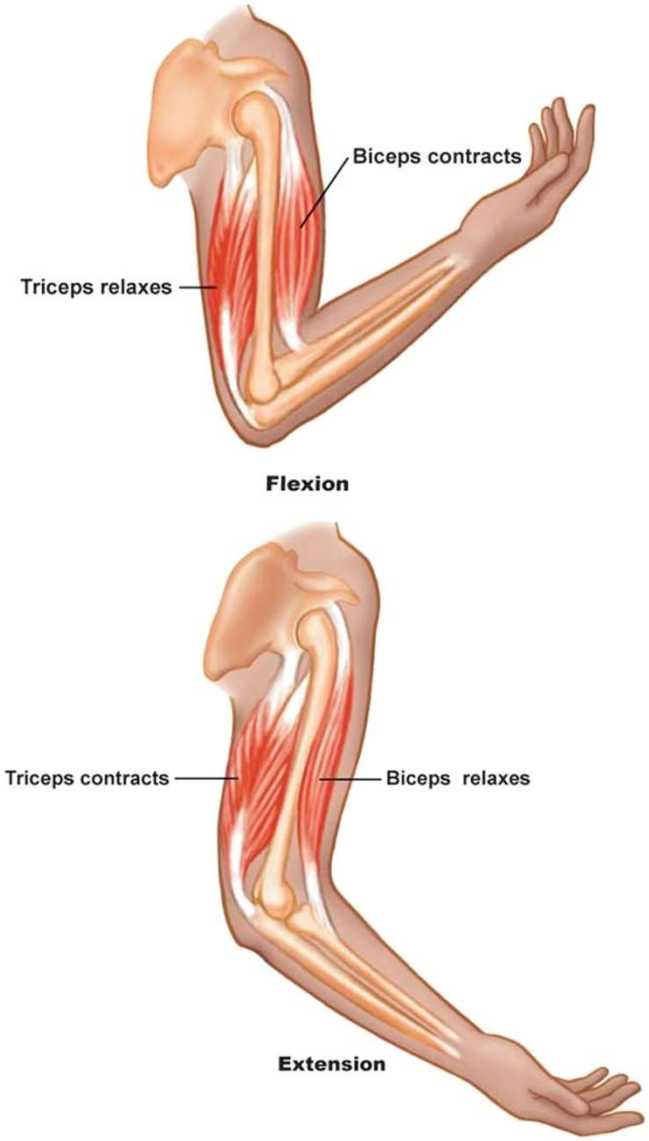
ساختار رباط و تاندون



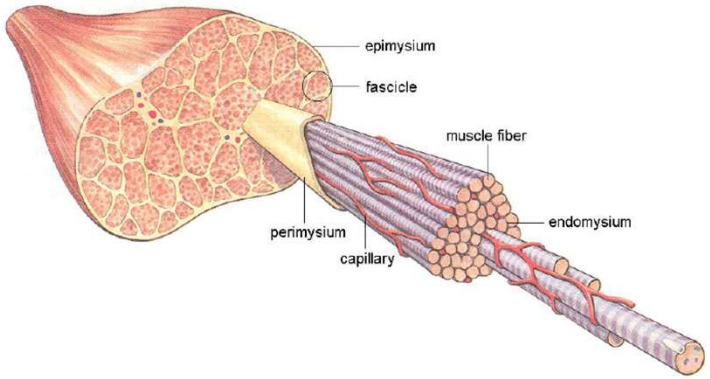




ماهیچه ها



- وظیفه اصلی ماهیچه اعمال نیرو و ایجاد حرکت است. این حرکت در اندامهای داخلی مانند قلب یا دستگاه گوارش و در استخوانها اتفاق می‌افتد.
- ماهیچه قابلیت کشش یا انقباض دارد و می‌تواند به طول اولیه خود برگردد. برای هر حرکت، دست کم دو ماهیچه وجود دارد که عکس هم کار می‌کنند.

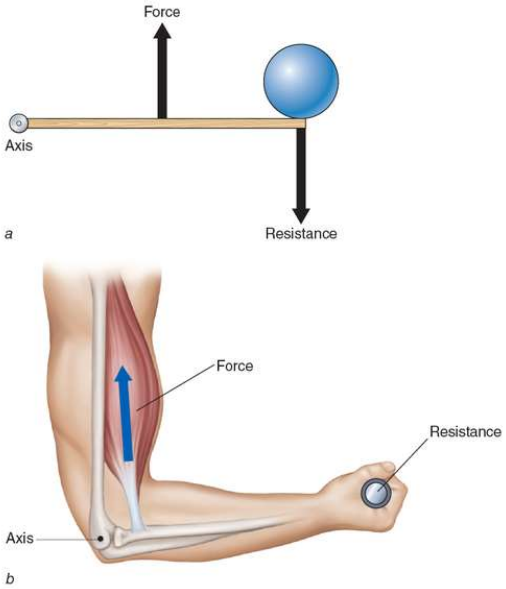


بافت ماهیچه اسکلتی

- این ماهیچه‌ها مسئول ایجاد حرکات ارادی بدن بوده و از تارهای ماهیچه‌ای انقباض‌پذیر که بصورت موازی در کنارهم قرار گرفته و توسط بافت همبند احاطه شده‌اند، تشکیل شده‌اند.

- هنگامی که در یک ماهیچه، کششی ایجاد می‌شود، اندازه نیروی تولید شده، سرعت گسترش نیرو و مدت زمان اعمال نیرو تحت‌تاثیر ویژگیهای فیزیولوژیکی و آناتومیکی قرار دارد و میتوان آن را بصورت یک ماده با خواص ویسکوالاستیک توصیف کرد.

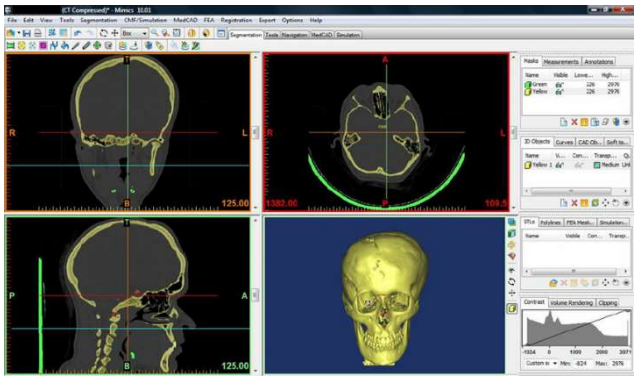
نیروهای مکانیکی وارد بر بدن انسان



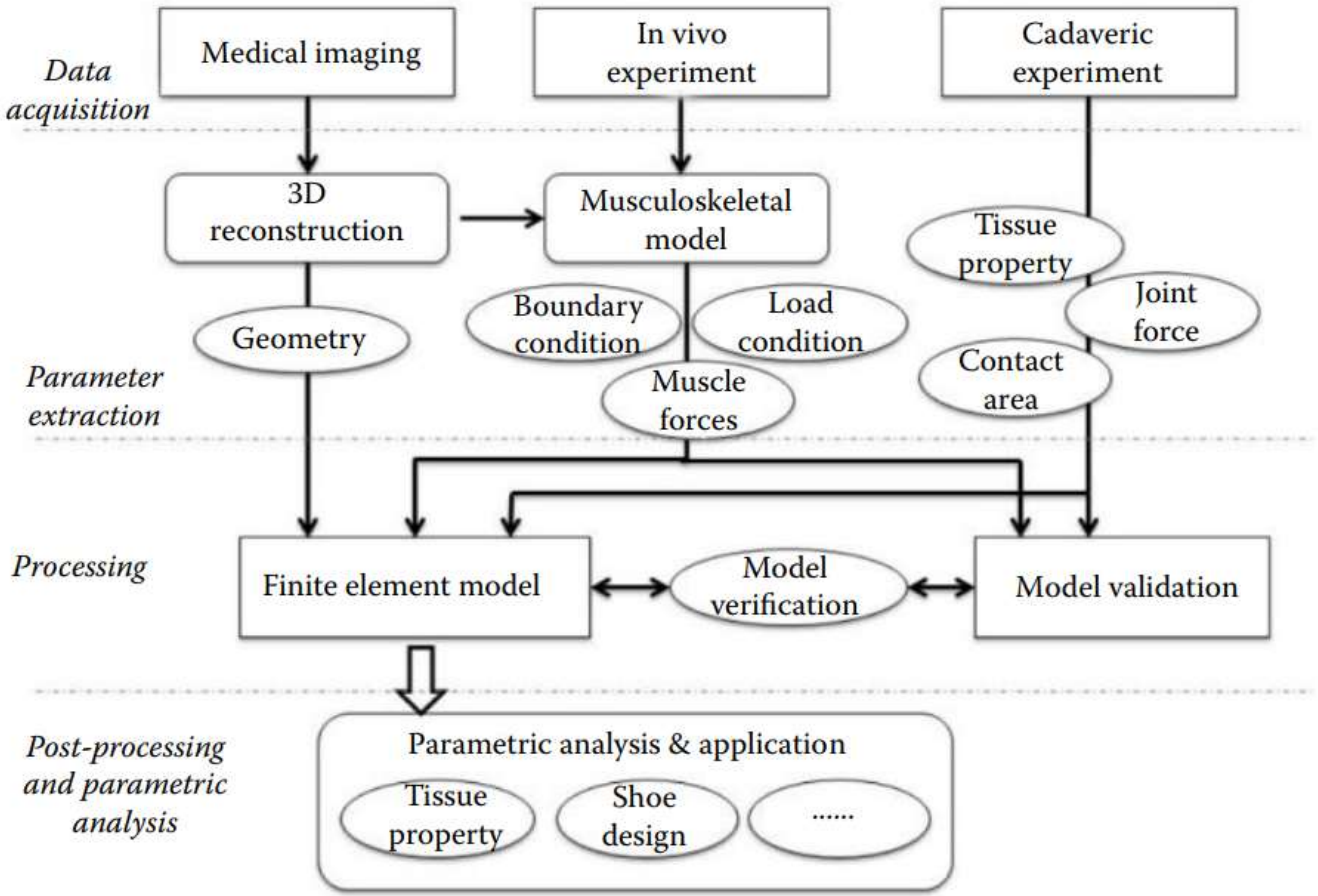
این نیروها ترکیبی از نیروهای فشاری، کششی و برشی می‌باشند. نیروی وزن بدن یک نیروی فشارنده بر روی استخوانها است. درصورتی‌که بارها از حد مجاز فراتر بروند، منجر به شکستگی استخوان و پارگی بافتهای نرم می‌شوند. در این حالت تنش ایجاد شده در اعضا از تنش گسیختگی نهایی فراتر رفته است.

استخراج مدل هندسی از تصاویر رادیولوژی

- با بهره‌گیری از تصاویر حاصل از تصویربرداری به روش CT-scan و MRI از بافتهای سخت و نرم می‌توان به مدل هندسی اندامهای مختلف دست یافت. فرمت تصاویر تولید شده DICOM است. با بهره‌گیری از نرم‌افزارهایی نظیر Materialise Mimics و 3D Slicer می‌توان از این فایلها، ابرنقاط تهیه نمود و آنها را با فرمتهای مناسب جهت فراخوانی در نرم‌افزارهای طراحی مهندسی ذخیره نمود.



فلوچارت مدلسازی و صحت‌سنجی مدل اجزای محدود



موضوعات پژوهشی کاربردی

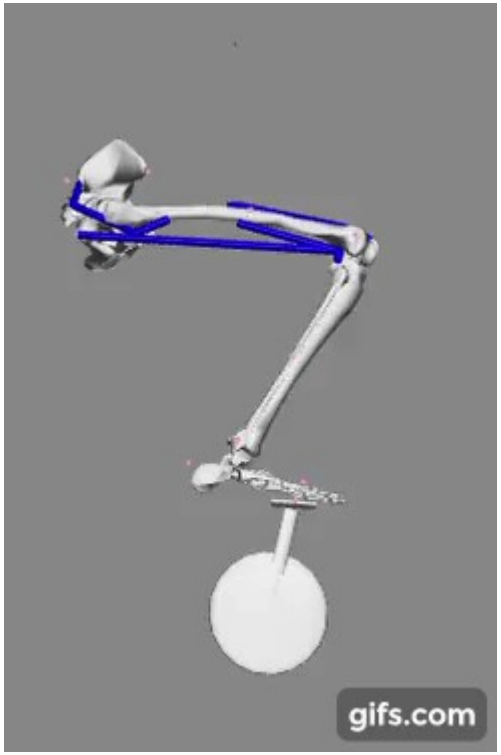
- مدلسازی و بهینه‌سازی پروتزها و ایمپلنتها
- پیش‌بینی آسیب در هنگام فعالیتهای مختلف
- مدلسازی مشکلات جسمی-حرکتی و ارائه راهکار برای درمان
- مدلسازی و تحلیل فعالیتهای ورزشی جهت اصلاح و بهینه‌سازی عملکرد بازیکنان
- شبیه‌سازی جراحی

نرم افزار opensim

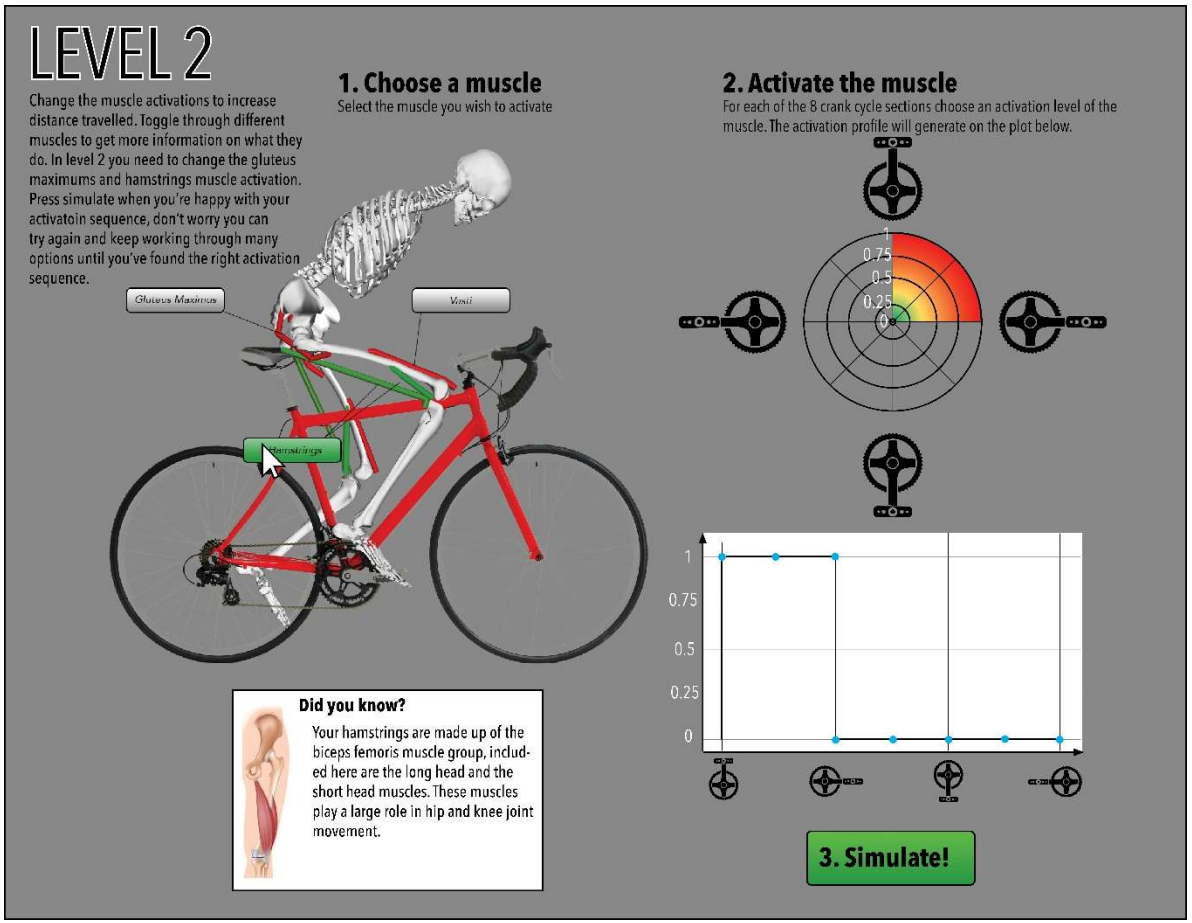
یک نرم‌افزار متن‌باز جهت شبیه‌سازی و آنالیز سینماتیکی و سینتیکی مدلهای بیومکانیکی از جمله شبیه‌سازی ابزارهای کمک‌حرکتی، شبیه‌سازی عملهای جراحی و طراحی ربات است. این نرم‌افزار یکی از کاربردی‌ترین نرم‌افزارهایی است که توسط *NIH در دانشگاه استنفورد ارائه شده است. اولین نسخه این نرم‌افزار در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است.

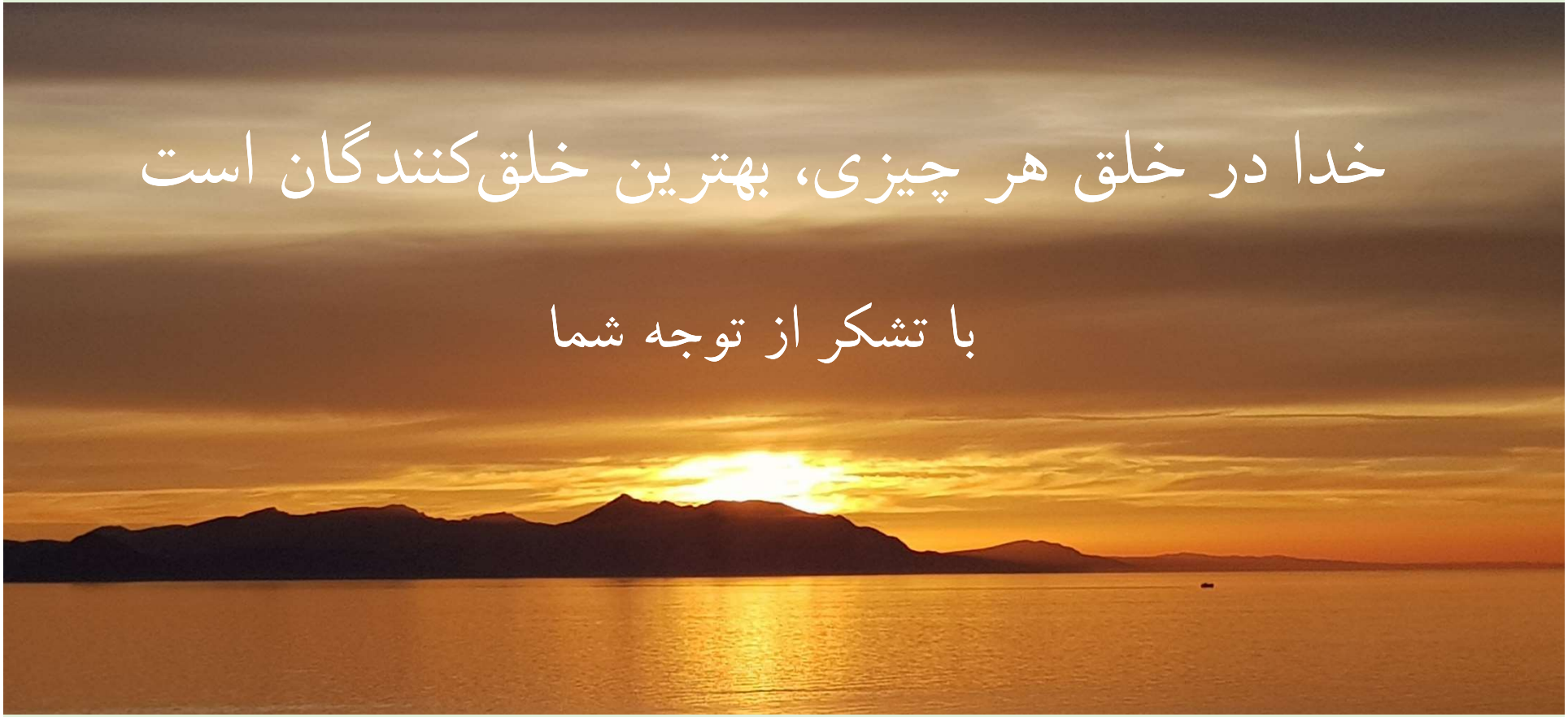
*National Institutes of Health

نمونه هایی از مدلسازی بیومکانیکی در opensim



نمونه هایی از مدلسازی بیومکانیکی در opensim




خدا در خلق هر چیزی، بهترین خلق‌کنندگان است
با تشکر از توجه شما