

# A biológiai mozgás molekuláris mechanizmusai

Mártonfalvi Zsolt

1

## A biológiai mozgások

Molekuláris mozgás



Axoplazma

Celluláris mozgás



Keratocita mozgása felületen

Szervezet mozgása



2

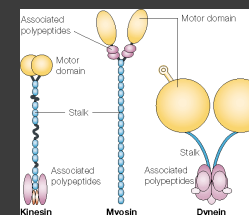
## Motorfehérjék

*Olyan mechanoenzimek, amelyek kémiai energiát alakítanak át mechanikai munkává.*

1. Specifikusan kapcsolódnak valamilyen citoskeletális filamentumhoz vagy biopolimerhez (pl. DNS).
2. A filamentum mentén elmozdulnak, illetve erőt fejtenek ki.
3. Eközben ATP-t hidrolizálnak.

3

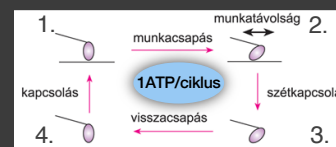
## Motorfehérjék közös tulajdonságai



### I. Szerkezeti homológia

N-terminális globuláris fej: ez a **motor domén** (ATPáz), ami specifikusan köt a megfelelő citoskeletális polimerhez.

C-terminális kötőhely: a mozgott képlethez kapcsolódik.

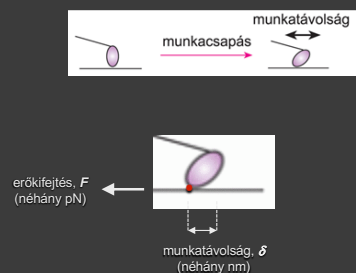


### II. Ciklusos működés

1. Kapcsolódás
2. Munkacsapás (húzás)
3. Szétkapcsolás
4. Visszacsapás

4

## Motorfehérjék erő kifejtése



Egyetlen motorfehérje által végzett munka,  $W$

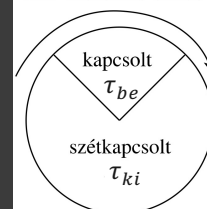
$$W = F \cdot \delta$$

nagyságrend:  $10^{-20}$  J (zeptojoule =  $10^{-21}$  J)

5

## Motorfehérjék munkaciklusa

ATP-hidrolízis-ciklus



Munkaciklus arány ( $r$ ):

$$r = \frac{\tau_{be}}{\tau_{be} + \tau_{ki}} = \frac{\tau_{be}}{\tau_{teljes}}$$

**Processzív motor:  $r \sim 1$**

Pl. kinezin, DNS-, RNS-polimeráz.  
Munkaciklus nagy részében kapcsolt állapotban van.  
Egymaga képes a terhet továbbítani.

**Nem processzív motor:  $r \sim 0$**

Pl. konvencionális miozin (vázizom: miozin II.) Munkaciklus nagy részében szétkapcsolt állapotban. Sokaság működik együtt.

$$v_{csapás} = \frac{\delta}{\tau_{be}}$$

$$\tau_{be} = \frac{\delta}{v_{csapás}}$$

$$\tau_{teljes} = \frac{1}{k_{ATPáz}}$$

$$r = \frac{\delta k_{ATPáz}}{v_{csapás}}$$

$\delta$  = munkatávolság  
 $v_{csapás}$  = csapássebesség  
 $k_{ATPáz}$  = ATPáz sebesség

6

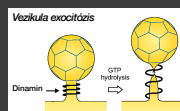
## Motorfehérjék típusai

### 1. Aktin alapú

- **Miozinok:** Az aktin filamentum mentén a plusz vég irányába mozognak. (lamellipodium formálás, izomkontrakció)

### 2. Mikrotubulus alapú

- **Dineinek:** Ciliáris (flagelláris) és citoplazmáris dineinek. A mikrotubulus mentén a mínusz vég irányába mozognak. (axonális retrográd transzport)
- **Kinezinok:** A mikrotubulus mentén a plusz vég irányába mozognak. (axonális anterográd transzport)
- **Dinaminok:** Mikrotubulus-függő GTPáz aktivitás.



### 3. DNS alapú mechanoenzimek

- A DNS fonal mentén haladnak és fejtenek ki erőt (DNS- és RNS-polimerázok, vírus kapszid csomagoló motor)

### 4. Rotációs motorok

- Membránba ágyazva működnek, a membrán két oldalán kialakult proton grádiens a hajtóerejük. F1Fo-ATP szintetáz, bakteriális flagelláris motor

### 5. Mechanoenzim komplexek

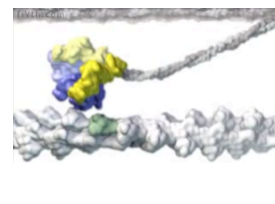
- Riboszóma

7

## Citoszkeleton alapú motorok

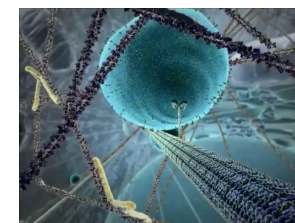
### Nem processzív motor

Vázizom miozin II.  
Aktin filamentum mentén mozog.



### Processzív motor

Kinezin  
Mikrotubulus mentén mozog.



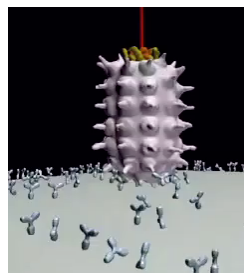
8

## Nukleinsav alapú motorok

**Riboszóma**  
mechanoenzim komplex



**Virális portális motor**  
DNS „pakolás”

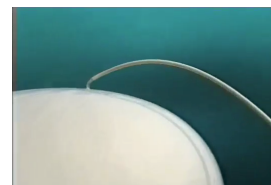
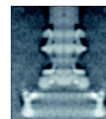


9

## Rotációs motorok

hajtóerő: proton grádiens

**Flagelláris motor**  
bakteriális mozgás



**$F_1F_0$  ATP szintetáz**  
reverzibilis működés



10

## Az izomműködés biofizikája

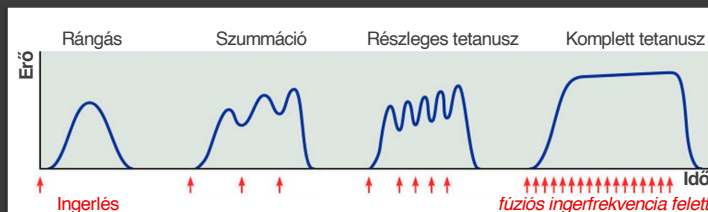


Mozgásra, mozgatásra  
specializálódott sejt illetve szövet.

Csak húzni képes, tolni nem!

11

## Az izomműködés alapjelenségei I.



Egyszeri ingerlés egy összehúzóási választ – egy **rángást** – vált ki (összehúzás – elernyedés).

Egy ingersorozat fokozza az összehúzóási erőt, mert a következő inger még részlegesen kontrahált állapotban éri az izmot, így a rángások összeadódnak – **szummáció**.

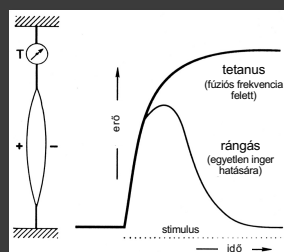
Fúziós frekvencia feletti ingersűrűség esetén a relaxáció gátolt, így az izom állandó tónusba kerül – **tetanusz**.

12

## Az izomműködés alapjelenségei II.

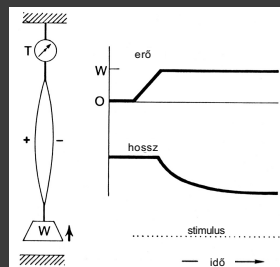
### 1. Izometriás kontrakció

Az izom nem rövidül (vagy nem képes rövidülni), de a kifejlett erő növekszik



### 2. Izotóniás kontrakció

A kifejlett erő állandó, miközben az izom rövidül.



A kettő keveréke: auxotóniás kontrakció (rövidülés és erőfejlesztés egyszerre)

13

## Az izomműködés alapjelenségei III.

### 1. Munka és Teljesítmény

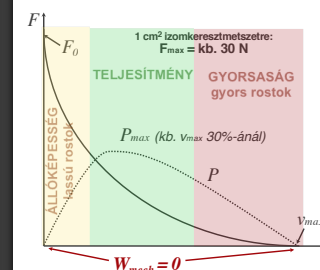
$$W = F \cdot s$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v$$

Ha a rövidülési sebesség nulla, akkor az erő maximális értékű: maximális izometriás erő ( $F_0$ )

Ha  $v = \text{maximum}$ , akkor  $F = 0$

### 2. Erő - sebesség összefüggés



Hill egyenlet:

$$(F + a)(v + b) = (F_0 + a)b$$

$F$ : erő,  $v$ : rövidülési sebesség

$a$  és  $b$ : konstansok,

$F_0$ : maximális izometriás erő

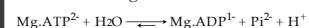
$$v_{\max} = \frac{bF_0}{a}$$

14

## Az izomműködés energetikája

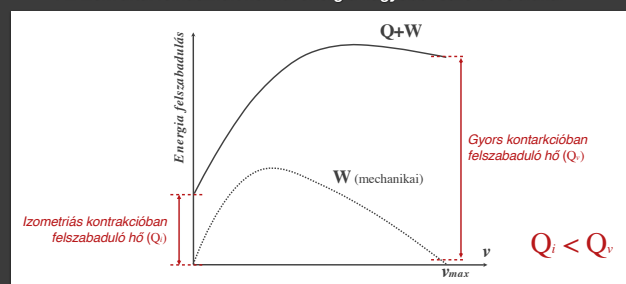
ATP hidrolízis, hőfelszabadulás

Energia forrása:



Fenn-féle effektus: A hőfelszabadulás megnő ha az izom rövidülés közben végez munkát. A hőfelszabadulás mértéke nő a kontrakció sebességének növekedésével.

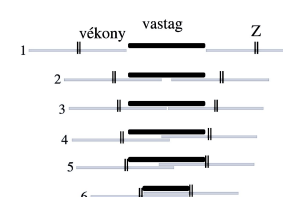
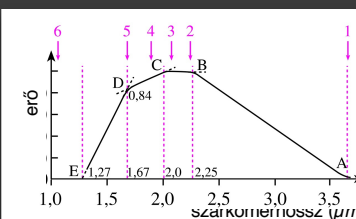
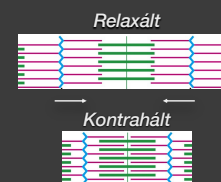
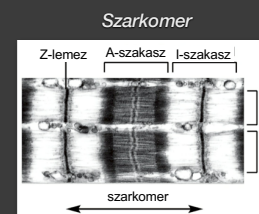
Az izom által felhasznált kémiai energia nagyobb része hővé alakul



15

## Az izomösszehúzódnak mechanizmusa

Fenomenológiai mechanizmus: csúszófilamentum modell

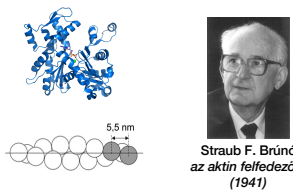


16



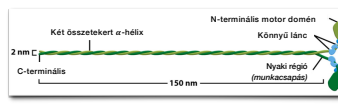
## Kontraktilis apparátus tagjai

**Globuláris aktin (G-aktin)**  
Az aktin filamentumot felépítő monomer egység





Straub F. Brúnó  
az aktin felfedezője  
(1941)

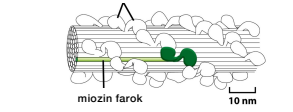
**Miozin II**  
Nem-processzív, aktin alapú motorfehérje



**Aktin filamentum (F-aktin)**  
Citoszkeletális szemiflexibilis polimerlánc

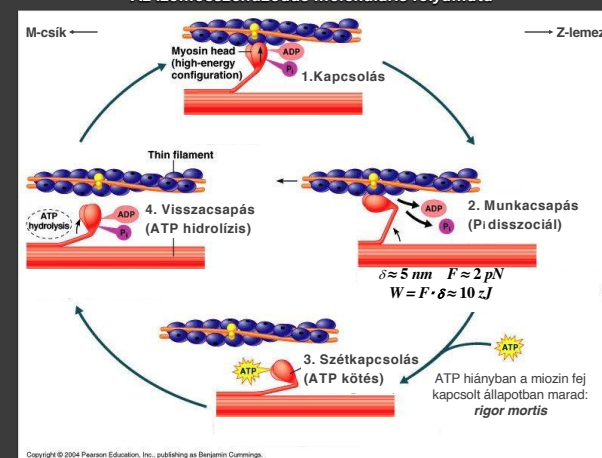
**Vastag filamentum**  
miozin fejek (motor domének)



17

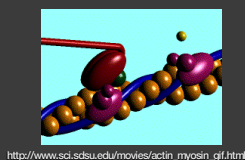
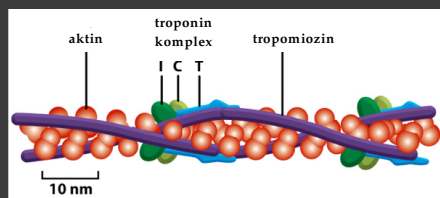
## A miozin II motorfehérje munkaciklusa

Az izomösszehúzódás molekuláris folyamata



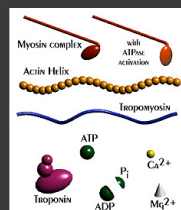
18

## Az izomösszehúzódás szabályozása



**Tropomiozin:** Blokkolja a miozin-kötő helyeket az aktin filamentumon.

**Troponin komplex:** 3 alegység, (C, T, I)  
Troponin C szabad  $\text{Ca}^{2+}$ -ot köt, majd a tropomiozin konformációs változását okozza, így a miozin-kötő helyek felszabadulnak.



19