

Dr. Róka András

A „működés” kémiai háttere

Az atomok, molekulák vagy akár a földkérget alkotó kristályos anyagok (részecske halmazok) mindaddig „halott” struktúrák, míg működésbe nem hozza őket az **energia**. A kvarckristály csak munka árán vet piezoelektromos szikrát, vagy elektromos energia hatására válik ultrahangos adó-vevővé. Energia nélkül nem képződne szőlőcukor, nem lenne tápláléklánc, nem lenne élet a Földön. „**Antennamolekulák**” nélkül viszont hiába van energia. Ha nincs fényelnyelő, nem hasznosul az energia.

A Föld energiakészlete alapvetően két folyamatból származik. A távoli Nap fúziós energiájából, és a geotermikus energiából, ami a Föld belsejében lejátszódó radioaktív bomlás következménye. A Föld felszínén megjelenő és részben hasznosítható energiák, melyeket napjainkban divatosan **alternatív energiáknak** neveznek, lényegében a Naptól származnak. Hiszen a felszíni áramlásokat, a víz körforgását, vagy a szelet a Nap energiája hajtja. A biológiai eredetű „fosszilis” energiahordozók valamikor a tápláléklánc részei voltak. Elhantolódva a geotermikus energia alakította át őket szénné, földgázzá és kőolajjá. Ily módon bennük is a Nap energiája konzerválódott.

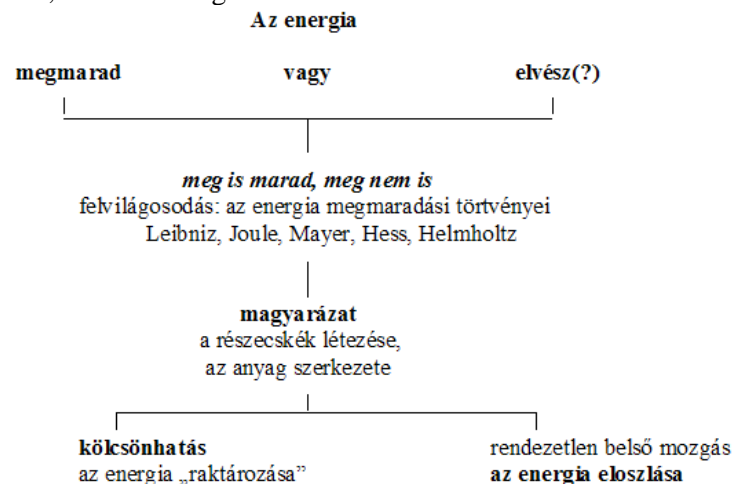
Az anyag átalakítás tudománya a felvilágosodás során kémiává, az ipari forradalom igényei hatására pedig vegyiparrá fejlődött. A kémiai ismeretek alkalmazásának az ókorban és a középkorban lényegében csak az anyagok átalakítása, például a fémek előállítása volt a célja. Az ipari forradalomtól kezdődően azonban egy új igény is jelentkezett: A gépek, motorok működésének biztosítása. Bár az említett szerkezetek mérnöki találmányok, melyek elsősorban a mechanika törvényei alapján működnek, a mellékesnek tűnő energiaellátás nélkül azonban nincs működés. Ez pedig egyértelműen a kémiai reakció, ezen belül is az égés feladata.

Az ókorban az égésből származó hőt kezdetben csak a talált termésmékek megolvasztására használták. A réz, ón, majd a vas faszenes redukcióval történő előállítása során a hő már az amúgy önként lejátszódó reakció aktiválására fordítódott. A gőzgépek, majd a belsőégésű motorok megszületésével azonban **a felszabaduló energiát már munkára fogták**.

Az anyahajóról is felszálló katonai repülőgépek, az űrrakéták vagy a forma 1-es „rakéták” sebességét az égés sebessége biztosítja. A növekvő igények miatt energiaszegényé váló világunkban nem mindegy, hogy a raktározott energiának mekkora hányadát hasznosítjuk. Ezért napjainkban a teljesítmény növelése mellett fontossá vált a hatásfok növelése is.

Az energia története

Ha megkérdeznénk, hogy az energia megmarad vagy elvész, valószínű megoszlanának a vélemények. Az energia sokáig érthetetlen tulajdonsága volt, hogy **meg is marad, meg nem is**. Ma már tudjuk, hogy **„nem vész el, csak átalakul”**. A sokféle átalakulási lehetőség megismerése azonban hosszú időbe telt. Az energia átalakításában a kémia fontos szerepet játszik. Nap mint nap hallunk nap-, szél-, vízi-, atom-sugárzási-, elektromos-, mágneses-, felületi-, termikus-, geotermikus-, kémiai- vagy biológiai energiáról. Vajon valóban ennyiféle van belőle vagy ugyanakkor a valaminek különböző megnyilvánulásaival találkozunk? Egyáltalán, mi is az energia?



A félelmet legyőző ősember még csak a közelébe húzódott. Nem is tudta, de már **átalakította**. Hiszen a kő, vagy a lándzsa elhajításakor a szőlőcukor biológiai oxidációja fedezte az energiaszükségletet. Az első energiát átalakító eszköz az új lehetett. A **megmaradó átalakulást** persze

még csak hasznosították, amikor a megfeszített íjban a célzás időtartamára raktározódó rugalmas energia az ellövés pillanatában a nyílveendőbe költözött. Az energia fontossága hamar tudatosult. Az egyiptomiaknál az istenként tisztelt Nap, az alkímia korában Arisztotelész egyik őseleme a Tűz feleltethető meg az energiának. Leibniz „*eleven erőnek*”, Boyle a Napból érkező „*tűzrészecskének*”, Stahl az égés során távozó „*flogiszonnak*” nevezte. A szántó-vető, a kovács, a bányász praktikusán csak *munkavégző képességnek* tekintette. A „*minden működés alapja*” csak a XIX. századtól válik egységesen energiává, amikor kezdik tulajdonságait felfedezni, megismerni, megérteni.

Az energia megmaradása

Az ókorban a csillagok szabályos vándorlása, a napszakok törvényszerű változása a **megmaradás** élményét erősítette. A középkorban a látszat azt sugallta, hogy a „mozgás” **elvész**, hiszen előbb-utóbb abba marad. Csak a felvilágosodás korában fogalmazzák meg az **átalakulás** lehetőségét. A gőzgéppel pedig megszületik az átalakítás módja is.

A tömegvonzás felfedezése után Leibniz rájön, hogy a kölcsönhatásban rejlik „*valami*”, ami a szabadesés során „*mozgássá*” alakul, és amivé a felhajtott kő „mozgása” a tetőponton visszaalakul. Ezért megkülönbözteti egymástól a „rejtőzködő” **helyzeti energiát** és az érzékelhető **mozgási energiát**. Nemcsak felfedezi átalakulásukat, hanem (talán az inga lengése nyomán) kimondja **az összegük megmaradását, a mechanikai energia megmaradásának törvényét**. E szerint egy magára hagyott test esetében **a helyzeti és a mozgási energia összege állandó**:

$E(\text{mechanikai}) = E(\text{összes}) = E(\text{helyzeti}) + E(\text{mozgási}) = \text{állandó}$

A törvény érdekessége, hogy az egyik energia a másik rovására változhat, átalakulhat, miközben az összegük állandó marad. Ha beavatkozunk, a testet húzzuk, emeljük, gyorsítjuk, akkor munkát végzünk. Az energia megmaradás kiterjesztése értelmében, **a végzett munka (W) a test mechanikai energiájának megváltozására fordítódik**:

$W = \Delta E(\text{mechanikai}) = \Delta E(\text{összes}) = \Delta E(\text{helyzeti}) + \Delta E(\text{mozgási})$

Vagy a helyzeti energiája, vagy a mozgási energiája változik, vagy mindkettő.

Csakhogy, amíg a felhajtott kő visszatér, a földre esve már nem mozdul tovább. Előbb-utóbb az inga is leáll. A mozgási energia tehát többféleképpen is átalakulhat. Megmaradón és elveszni látszóan. A tömegvonzás átalakulóan megőrzi, a súrlódás, a közegellenállás felemészti. Leibniz felismerésének mégis van valóságtartalma. Hiszen a Nap körül keringő bolygókra, vagy az atommag által fogva tartott elektronokra nem hat súrlódás, sem közegellenállás. Hiszen ezekben az esetekben nincs is közeg.

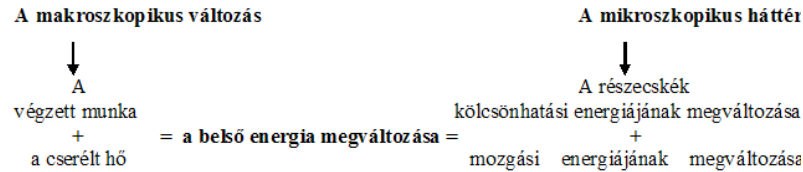
Rumford figyelt fel arra, hogy az ágyúfűrés során a fém felmelegszik. A súrlódás miatt elveszni látszó „mozgás” tehát **hővé alakul**. A mozgási energia nemcsak helyzeti energiává, hanem hővé is alakulhat. Az energia terén ekkor találkozott a kémia a fizikával. Hiszen az égés és a súrlódás ugyanahhoz a jelenséghez, az anyag felmelegedéséhez vezet.

A hőt kezdetben a vízhez hasonló anyagnak, fluidumnak képzelik, ami a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb felé áramlik. Rumford azonban a „*hőanyag*” súlyát mérhetetlennek találta. Ezért a hőt **a részecskék mozgási energiájának tekintette**. A részecskék mozgásában azonban mindaddig kételkedtek, amíg Braun a víz felszínére helyezett pollenek össze-vissza mozgását mikroszkóppal ki nem mutatta. A mozgás ténye mellett rendkívül fontos volt, hogy a hőmozgás a testek mozgásával, vagy a folyadékok áramlásával szemben a tér minden irányában történik. Ezért nevezték el **rendezetlen hőmozgásnak**.

Amíg a tudósok egy része kételkedik az anyag atomos szerkezetében, Helmholtz megkülönbözteti egymástól a testek közötti és a testen belüli történéseket. Az energia átalakulás-átalakítás lényege, hogy ezek sohasem függetlenek egymástól.

Helmholtz a mechanikai energia mintájára bevezeti a **belső energia** fogalmát, ami a halmaz összenergiájaként a részecskék kölcsönhatási energiájának és mozgási energiájának az összege: $U = E(\text{összes}) = E(\text{kölcsönhatási összes}) + E(\text{mozgási összes})$

Helmholtz szintézisbe foglalja az összegyűlt ismereteket. Az energia megmaradás törvényét kiterjeszti az összes ismert energia átalakításra, és ezzel megfogalmazza **a termodinamika I. főtételét**: Egy anyagi halmaz (rendszer) belső energiája kétféleképpen változhat. Munkavégzés által vagy hőcserével. **A belső energia változása egyenlő a munka és a cserélt hő összegével**, ami a részecskék kölcsönhatási energiájának és mozgási energiájának megváltozásában jelentkezik.



$$W + Q = \Delta U = \Delta E(\text{összes}) = \Delta E(\text{kölsönhatási összes}) + \Delta E(\text{mozgási összes})$$

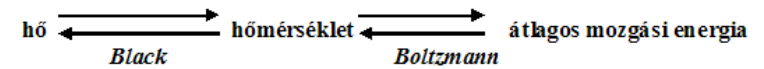
A sűrűdés, közegeellenállás során a testek mechanikai energiája belső energiává alakul, míg a gőzgép munkavégzése során a gőz belső energiáját (a részecskék mozgási energiáját) alakítjuk mechanikai energiává.

A belső energia halmaz szintű fogalom. Azért praktikus, mert egyetlen mennyiséggel kezelhetővé vált a részecske sokaság energiaváltozásának jellemzése. Ugyanakkor, ha a részletekre is kíváncsiak vagyunk, akkor az összeget alkotó energiagagok arányának változását is nyomon követhetjük. Töltsünk meg egy termoszt félig vízzel, helyezzünk bele néhány jégkockát, majd zárjuk le. Jósoljuk meg, majd figyeljük meg, hogy hogyan változik a rendszer hőmérséklete, belső energiája, és hogyan változnak külön-külön az alkotó tagok! A zárt és hőszigetelt termosztban sem az anyagmennyiség, sem az energia nem változhat, és munka sem végezhető. Az **izolált rendszer** belső energiája állandó. A termosztban mégis történik valami. A vízmolekulák mozgási energiájának rovására elolvadnak a jégkockák. A víz lehűl, a „jégkocka felmelegszik” a folyamat végén kialakuló közös hőmérsékletre.

A rendezetlen belső mozgás jellemzése

A mozgás során észlelt veszteségek a mechanikáról a hőre terelik a fizikusok figyelmét. Ekkor alakulnak ki a hőtan termokémia által is alkalmazott alapfogalmai, törvényei. A hőmérő feltalálása után Black bizonyítja be, hogy ugyanannyi hő a különböző anyagok ugyanakkora tömegű mennyiségét különböző hőmérsékletűre melegíti fel. Ezáltal megkülönbözteti egymástól a hőt és a hőmérsékletet. Bevezeti a „hőtároló-képesség”, fajhő, hőkapacitás fogalmát. Az új fogalmak mikroszkopikus hétérték Boltzmann fejté meg. A gázok viselkedésének tanulmányozása során kimutatja, hogy **a hőmérséklet arányos a részecskék átlagos mozgási energiájával**. A részecskék rendezetlen mozgásának energiája a

hőmérsékleten keresztül összekapcsolódik a hővel. A hő megfeleltethető a részecskék mozgási energiája összegének.

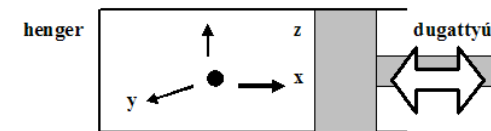


$$\text{átlagos mozgási energia} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT = \text{átlagos termikus energia}$$

Az energia, ezen belül a hő történetében a kémia megkésve, a gőzgépek megjelenésekor lép színre, amikor megkezdődik a fában, szénben „**tárolt napenergia**” hasznosítása. Ez az energia évszázadokon keresztül nem vész el. A részecskék között kialakuló „belső” kölsönhatás nyomán megmaradóan „**raktározódott**”. Ezért szokás a mindennapokban ezeket az anyagokat energiahordozóknak nevezni.

A munkára fogott hő / A rendezetlen mozgás egyirányúsítása

Sok időnek kellett eltelnie ahhoz, hogy a rendezetlen hőmozgás energiája ne csak az égés öfenntartására fordítódjon, hanem hasznos munkát is végezzen. Ehhez fel kellett találni egy nagyon egyszerű szerkezetet, a hengerben mozgó dugattyút. A henger merev, ellenálló fala nem enged más irányú mozgást, mint a dugattyú elmozdítását. A hőmozgás sokféle irányból a szerkezet kényszere csak egyet engedélyez, ezáltal a dugattyú egyirányú (ide-oda) mozgásba jön. Persze ehhez olyan szerkezeti anyagot kellett kifejleszteni, ami bírja a hengerben uralkodó hőmérsékletet. Mert a fejlődő hőtől közben a henger és a dugattyú is felmelegszik. Csakhogy nem ettől a veszteségtől olyan kicsi a gőzgép hatásfoka. Mert bármilyen okosan kitalált ez a szerkezet, a rendezetlen mozgás energiájának legfeljebb harmadát hasznosíthatja. Hiszen a molekulák kétharmada nem a dugattyú mozgásirányába repül.

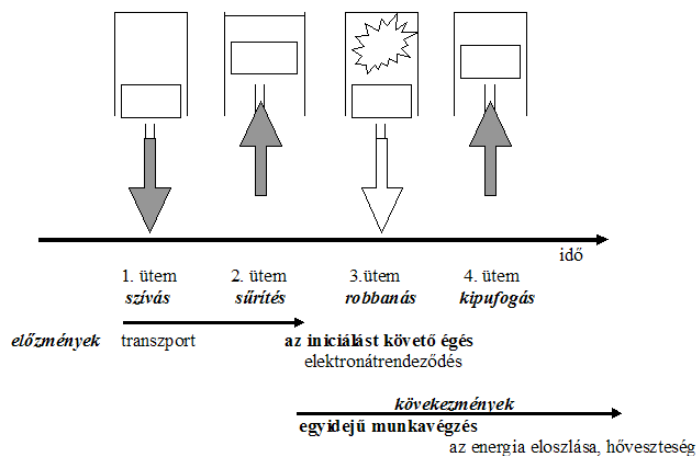


Az első „**hőerőgép**” a gőzgép volt. Kifejlesztése James Watt nevéhez fűződik. Hengerében a táguló gőz mozgatta a dugattyút. Az „A” felületű dugattyúra ható „p” nyomás $F = pA$ erőt fejt ki, ami a henger hosszának megfelelő „s” elmozduláson $W = Fs = pAs = p\Delta V$ munkát végez. A gőzgép hatásfoka azonban még a 30%-ot sem éri el, mert az

energia felszabadításának helye (a tüztér) és hasznosításának helye (a kazán és a munkahenger) távol vannak egymástól. A kisugárzott és a szerkezet által elvezetett hő pedig tovább csökkenti a hatásfokot. Korunk „gőzgépe” a villamos erőművek gőzturbinája. Működése során nem dugattyú jön mozgásba, hanem (egy fúvókán átengedve) magát a gőzt kényszerítik egyirányú mozgásra. A nagy sebességgel áramló gőzt a turbinakerék lapátjaival ütöktetik. Ezáltal nagyobb hatásfokú az energia átadása.

Bár a gőzmozdonyok esetében már 1906-ban sikerül a 157 km/h – as sebességet elérni, a cél szárazföldön, vízen és a levegőben egyaránt a sebesség fokozása volt. A gőzmozdonyal nem lehetett csak úgy elindulni, mint napjaink járműveivel. Előbb fel kellett fűteni. Igazából akkor derül ki, hogy mennyire lassú, ha az út megtételéhez ezt az időt is számításba vesszük. Az utazási sebesség növelésének feltétele a reakciósebesség, vagyis az égési sebesség növelése volt. A technikai találmányok egy része a kívánt reakciósebesség elérését szolgálja, míg a többi a hatásfokot növeli.

Az időben egymást követő elemi lépések az egyhengeres belső égésű motorban



A belső égésű motorok tüzelőanyaga a benzin vagy a gázolaj. A diszperziós erők miatt amúgy is könnyen illanó folyadék elpárologtatása kevesebb energiát von el a reakcióhőből, mint a szén kovalens kötéseinek megbontása. A gázfázisú reakció ráadásul gyorsabb is, mint a szén heterogén fázisú égése. A motortest által elnyelt hő részben hasznosul az üzemanyag elpárologtatása során. Az endoterm folyamat pedig hűti a

motort. A nagy találmány mégis **a reakciótér és a munkatér közötti távolság megszüntetése** volt. Hiszen az üzemanyag égése a hengerben (munkatérben) játszódik le, és a munkát végző közeg maga a végtermék, a füstgáz, ami a szelepek megnyílásakor „kipufog”. Ezáltal a rendezetlen hőmozgás energiája a keletkezés helyén, már a keletkezés pillanatában hasznosul. A munkavégzés (a reakció és a tágulás) sebessége összemérhetővé vált a hővezetés sebességével, ezért az energia átalakítása hatékonyabb lett.

A reakcióelegy „begyújtása” az üzemanyag tulajdonságának megfelelően kétféleképpen történhet. A benzin elágazó láncú, gömbszerű szénhidrogén molekulái jól bírják a nyomás növekedését („kompressziót”), ezért időzített elektromos szikra gyújtja be a reakcióelegyet (benzin üzemű Otto-motorok). A gázolaj egyenes láncú molekulái azonban már a kompresszióból adódó felmelegedéstől „töredeznek”. A képződő gyökök, a láncvégek párosítatlan elektronja miatt már reakcióképesek. Ezért a Diesel által fejlesztett motorokban gázolaj öngyulladását használják ki.

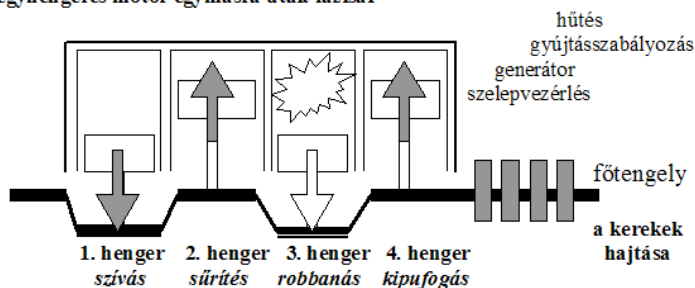
A folyamatok egymásra építése

Az első belső égésű motort Étienne Lenoir 1862-ben építette. Az első eladásra szánt automobil 1885-ben gurult ki Karl Benz műhelyéből. Az elmúlt 150 évnyi idő alatt tízszeresére nőtt a verdák sebessége. Az energia megmaradás törvénye alapján egyszerű végiggondolnunk, hogy a nagyobb sebességgel járó nagyobb mozgási energia eléréséhez ugyanannyi idő alatt több kémia energiát kell átalakítani, és a reakcióhőnek minél nagyobb hányadát hasznosítani. A fejlesztések száma úgy tűnik, még napjainkban is végeláthatatlan.

A teljesítmény növelése érdekében kezdetben a hengerek számát és „úrtartalmát” növelték. A nagyobb térfogatú hengerben a több üzemanyag elégetése nagyobb tolóerőhöz, az áttételeken keresztül nagyobb gyorsító erőhöz vezetett. A hengerek egymásra építésével (soros motor) nemcsak egyenletesebbé vált a motor „járása”, hanem az autó is gyorsabb lett. Hiszen a négy hengeres motor esetében egy henger munkafázisa alatt négy henger dolgozik. Egy „robbanás” helyett négy következik be. A „robbanás” fázisában lévő henger munkája nemcsak a „hajtásra” fordítódik, hanem előkészíti a többi hengert is. A közös tengely kiképzésének köszönhetően a vele azonos irányba mozgó henger beszívja az üzemanyagot („szívás”), míg az ellentétes irányba mozgó hengerek

egyikében komprimálja a robbanóelegyet („sűrítés”) a másiktól pedig kitolja a füstgázokat („kipufogás”).

A négyhengeres motor egymásra utalt fázisai



A belső égésű motorok teljesítményének látványos növelése a második világháború idején, a vadászgépek fejlesztése során vált igényé. A repülőgépeknél alkalmazott találmány hamarosan az autógyártásba is beköltözött. Ennek az a lényege, hogy nem a henger űrtartalmát növelik, hanem nagy nyomással **több robbanóelegyet préselnek a hengerbe**, mint amennyit egyenként beszívna. A préselést egy turbina (a „*turbó feltöltő*”) végzi, amit a füstgázok hajtanak meg. Ily módon a távozó füstgáz mozgási energiája részben hasznosul.

A növekvő energiahiány következtében közben igényé vált a gazdaságosság is. A hatásfok növelése érdekében a tervezők és a gyárak a modern technika szinte összes vívmányát bevetették. A könnyű szerkezeti anyagok alkalmazásával csökkentették a tömeget, az áramvonalas karosszériák tervezésével kisebb lett a légellenállás. A rendezetlen hőmozgás jobb hasznosítása érdekében domborították a dugattyút, és homorították a hengerfejet. A teljesítményhez alkalmazkodóan injektálják az üzemanyagot, a számítógépes vezérléssel optimális pillanatban érkezik a gyújtás. Jobb minőségű kenőanyagok előállításával csökkentik a súrlódást, adalékanyagokkal javítják az üzemanyag égési sebességét. Ígéretes találmány a Felix Wankel által fejlesztett „forgó dugattyús” motor. Ebben a dugattyú nem oda-vissza mozgásra, hanem forgó mozgásra kényszerül. Így a turbinákhoz hasonlóan a munkát végző közeg közvetlenül a tengelyt forgatja meg.

A csúcsteljesítmény, a sugárhajtómű

A belső égésű motorok hamarosan bevonultak a repülés történetébe is. A nagyobb teljesítmény iránti igényt kezdetben itt is a

hengerek számának és űrtartalmának növelésével igyekeztek kielégíteni. A legerősebb motorokkal már a 700 km/h-ás sebességet is elérték. Az ilyen típusú fejlesztésnek azonban határt szabott a tömeg növekedése. Olyan hajtóműre volt szükség, ami a kis tömeg ellenére is képes volt nagy mennyiségű üzemanyag elégetésével a megfelelő tolóerőt biztosítani. A cél tehát változatlanul a reakciósebesség növelése volt. A megoldás a **sugárhajtómű** lett, ami már a rakétaelv alkalmazásával hozza mozgásba a repülő. A lendület-megmaradás törvényének kihasználása már tulajdonképpen a légszavaros repülőgépeknél megjelenik. Ezeknél az üzemanyag kémiai energiája a légszavar forgási energiájává alakul. Amikor a légszavar áramlásba hozza a levegőt, a forgási energia a közeg áramlási energiájává alakul. A lendület megmaradása miatt a levegő elmozdításával ellentétes irányban a repülő is elmozdul.

A propeller nélküli hajtómű az áramlási sebességet növeli. Méghozzá úgy, hogy nem a környező levegőt hozza mozgásba, hanem a nagy sebességgel kiáramló égéstermék tolóerejét használja ki. A nagy mennyiségű üzemanyag gyors elégetéséhez azonban sokkal több levegő szükséges. Ezért a kiáramló „füstgáz” egyúttal két turbinát is meghajt. Az egyiket azért hozza forgásba, hogy a közös tengelyre szerelt másik elegendő levegőt sűrítessen az üzemanyag elégetéséhez. A forgó szerkezet a reakciósebesség látványos növelését szolgálja. A „turbókompresszor” működtetése tulajdonképpen visszacsatolás. Az égést követő lépés (a turbó meghajtása) **mechanikai módon történő visszacsatolás** az égést megelőző-előkészítő eseményekre. A füstgázok által meghajtott **turbina** az égéstér mögött helyezkedik el, míg a közös tengelyre épített **kompresszor** értelemszerűen az égéstér előtt található. A sugárhajtóműre az angol Frank Whittle nyújtott be először szabadalmat 1928-ban. Ha figyelembe vesszük, hogy az égésről abban az időben nem sokkal tudtak többet, mint hogy oxigén kell hozzá, még elismerésre méltóbb a találmánya.

Az utasszállító gépek „turbólégszavaros” hajtóműve abban különbözik a vadászgépek hajtóművétől, hogy a közös tengelyre harmadik „turbinaként” óriás léglapátokat is szerelnek. Így a soklapátos „légszavar” által keltett áramlás is részt vesz az utazó sebesség kialakításában. A modern „turbófan” hajtóművekben a propellerlapátok háromszor annyi levegőt tolnak hátra a hajtómű mellett, mint amennyit a turbókompresszor sűrít a hajtóműbe az üzemanyag elégetéséhez.