

Airea beherantz bultzatuta egiten dute hegan hegazkinek. Azalpen horren partez, ordea, asko zabaldu da hegaldiaren sekretua beste fenomeno fisiko bat dela: Bernoulliren printzipioa. Printzipio hori gertatzen da hegazkinen hegoetan hegan egiten ari denean, baina ez da hegaldiaren eragile nagusia. Hala eta guztiz ere, azalpenaren sinplifikazioak protagonista bihurtu du Bernoulli.

Boeing 747 batek, hegaldi transatlantikoak egiten dituen ohiko hegazkinak, 180 tona pisatzen du, gutxi gorabehera, hutsik dagoenean. Hegaldi komertzialetako zamak bikoiztu egin dezake pisua. Airbus 380a are handiagoa da. Zama guztiarekin, 573 tonara irits daiteke. Hegan egiteko, pisu hori guztia konpentsatzen duen indar bat behar da. Hala ere, ingeniari aeronautikoentzat indar hori aurkitzea ez da erronka bat, hegazkin horiei airean eusten dien printzipio fisikoa eta paperezko hegazkin bati eusten diona printzipio bera delako.

Hala esaten du *La Pizarra de Yuri* blogeko Antonio Cantó dibulgatzaile eta hegazkinetan adituak: "Paperezko hegazkinaren hegaldia azaltzen ez duen euste aerodinamikoaren edozein hipotesi

BERNOULLI GABE HEGAN

IRUDIA: GUILLERMO ROA/ELHUYAR FUNDAZIOA



Bernoulli
 $\frac{1}{2} \rho u^2 + P = K$

seguruenik okerra da, eta —hau ziur— osatuga-bea”. Paperezko hegazkinak, Boeing 747ak, helikoptero batek, txori batek eta erle batek, bakoitzak oso diseinu ezberdinarekin, eta bakoitzak bere kondizioekin, airea beherantz bultzatuta egiten dute hegan. Oinarrizko printzipioa hori da. Hortik aurrerako azalpena konplexua da, eta hegalari batetik bestera asko aldatzen da.

Hegazkinei dagokienez, ordea, oinarrizko azalpen horren partez, beste bat zabaldu da; alegia, Bernoulliren printzipioak eusten diela airean. Azalpen horrek bere horretan ez du azaltzen hegaldia, baina kasu berezia da, benetan gertatzen den fenomeno batean oinarrituta dagoelako eta dibulgazioan asko erabili delako. *Chicago Reader* egunkarian *Straigh Dope* zutabea idazten duen Cecil Adams dibulgatzailearen hitzetan, ideia hori “zientziako testu-liburu errespetagarri batzuetan ere argitaratu izan da”. Hala ere, testu teknikoetan ez da horrelakorik agertzen.

BERNOULLIREN ARRAKASTA

Dibulgazioan, ohikoa da ideiak sinplifikatzea, eta Bernoulliren printzipioaren azalpena da horren adibideetako bat. Printzipioa hegan egitearen parte bat da, baina ez da hegan egitearen giltzarria.

Daniel Bernoulli XVIII. mendeko matematikari eta ingeniari neederlandar bat izan zen, eta zientziaren historian ospetsua da fluidoaren dinamikan egin zituen ikerketengatik. Haren printzipio ezagunenaren arabera, fluido batek, zenbat eta abiadura handiagoan mugitu, orduan eta presio gutxiago egiten du gainazal solido baten gainean.

Berez, ez dago erlaziorik hegaldiaren eta Bernoulliren bizitzaren artean. Mende hartan, hegan egiteko modu bakarra globoa zen; Montgolfier anaiek lehen hegaldia Bernoulli hil eta bost hilabetera egin zuten. Eta hegazkinaren kontzeptua ere ez zen existitzen. Baina airea fluido bat da, eta hegazkinaren hegoak bi gainazal solido handi.

Hegoen forma berezia da. Hegazkin gehienetan, hegoak kurbatuak daude goialdetik eta lauak dira azpialdetik, eta hegoaren goialdetik doan aireak bide luzeagoa egiten du eta azkarrago mugitzen da behealdetik doana baino. Gainera, goiko airea lehenago iristen da hegoaren bukarara beheko airea baino. Hor dator Bernoulli: haren printzipioak azaltzen du fluxu horrek presio handiagoa egiten diola hegoari behetik goitik baino. Eta, horren ondorioz, hegazkina airean altxatzen da.

Oro har, hegaldia horrela azaltzen dute. Argudioa zuzena da; hegoen ohiko diseinu horretan, Bernoulliren printzipioagatik, hegazkinak goranzko indar bat jasotzen du. Baina argudio hori ez da nahikoa azken ondoriora iristeko, eta, beraz, ondorio okerra da: indar hori ez da hegazkinari airean eusteko bezain handia.

ZERBAIT FALTA DA

Kalkuluak argiak dira. Bernoulliren efektua handitu egiten da hegazkinaren abiadurarekin, baina hegazkin txiki estandar baten pisuari airean eusteko —Cessna 152 bati, esate baterako—, abiadura 480 km/h baino gehiagokoa izan beharko luke, eta hegazkin txiki horiek nekez iristen dira 100 km/h-ko abiadurara. Eta beste edozein hegazkinekin ere gauza bera gertatzen da; Bernoulliren printzipioak eragindako goranzko indarra hegazkinak behar duenaren % 1era ez dela iristen.

Zenbakiak alde batera utzita ere atzematen da Bernoulliren efektua ez dela hegan egitearen arrazoia. Batetik, akrobaziak egiten dituzten hegazkinen kasua nabarmena da. Hegazkin horiek azpiko gora ere egiten dute hegan, eta une

horietan, hegazkina ez ezik, Bernoulliren efektua ere kontrako aldera zuzenduta dago. Goian aurkeztutako hegoen kasuan, efektuak lurrerantz bultzatzen du hegazkina.

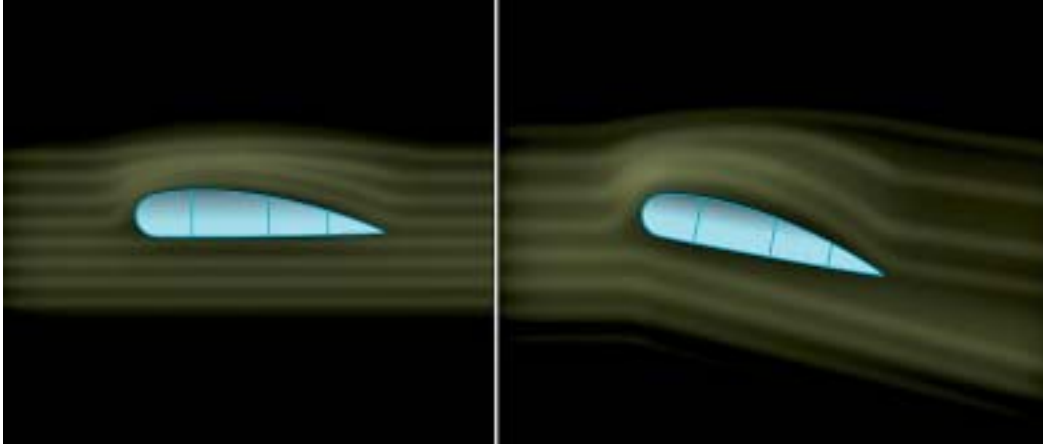
➔ Bernoulliren printzipioak eragindako goranzko indarra hegazkinak behar duenaren % 1era ez da iristen.

Bestalde, hego guztiek ez dute lehen aipatutako diseinu hori. Adibide bat gaur egungo hegazkin komertzialen hegoak dira. Haien diseinua plano aerodinamiko superkritikoan oinarrituta dago. NASAko Richard Whitcomb ingeniariak diseinatu zuen 1960ko hamarkadan, eta ia laua da goialdetik; oso kurbadura txikia du, eta Bernoulliren printzipioaren efektua ere oso txikia da.

Beste adibide argigarri bat historiako lehen hegazkinak dira: 1896ko Samuel Langleyren tripu-

Gaur egungo hegazkin komertzialen hegoak plano aerodinamiko superkritikoan oinarrituta daude. NASAko Richard Whitcomb ingeniariak diseinatu zuen 1960ko hamarkadan, eta ia laua da goialdetik; oso kurbadura txikia du. ARG.: ELHUYAR FUNDAZIOA.






Aire-fluxua (ezkerretik eskuinera) eta eraso-angelua. Ezkerreko irudian, hegoaren sekzioa horizontal dago, eta airea datorren bezala irteten da atzetik. Ondorioz, ez dago goranzko indarririk hegoan. Eskuineko irudian, eraso-angulu txiki bat du hegoaren sekzioak, eta atzetik irteten den airea beherantz bultzatzen du. Ondorioz, hegoek goranzko indarra jasotzen dute.

ARG: GUILLERMO ROA/ELHUYAR FUNDAZIOA.

latu gabeko makinak, Wright anaien Flyer famatuak eta hurrengo urteetan egin ziren hegazkinak kurbatuak zituzten hegoak bi aldeetatik, goitik eta behetik. Haietan, aireak ibilbide bera egiten du bi aldeetatik, eta Bernoulliren efektuak ez du eraginik. Paperezko hegazkinetan eta delta-hegaletan, berdin. Airean eusten dien indarra beste zerbaitek sortzen du.

AIREARI NOLA ERASO

Gakoa Newtonen hirugarren legean datza, akzio-erreakzio printzipioan: hegazkinak airea beherantz bultzatuta, aireak gorantz bultzatzen du hegazkina. Baina nola gertatzen da hori? Erantzuna beste faktore batean dago: eraso-angelua. Hegan egitean, hegoaren sekzioa ez da egoten horizontal, eraso-angulu bat izaten du, eta, angelu horrengatik, hegoaren atzetik irteten den airea beherantz doa.

 Hegan egitean, hegoaren sekzioa ez da egoten horizontal: eraso-angulu bat izaten du, eta horrek eusten dio airean hegazkinari.

Erraz sentitu daitekeen indarra da. Discovery Channelek produzitu zuen *Understanding Flight* dokumentalean, John Travolta aktoreak berak —pilotua da— azaltzen zuen nola: “Autoa gidatzen ari zarenean, 50 km/h-an gutxienez, seguru bada, zabaldu leihoa eta luzatu besoa kanpoaldean”. Besoa biratu eta eskua goranzko angelu batean jarriz gero, goranzko indarra nabaritu du eskuak. “Behatzekin biribiltzen baduzu eskua, efektua areagotu egiten da”, azaltzen du Burt Rutan hegazkinen diseinatzaileak

dokumental berean. Hegaztien lumek ere diseinu kurbatu hori dute.

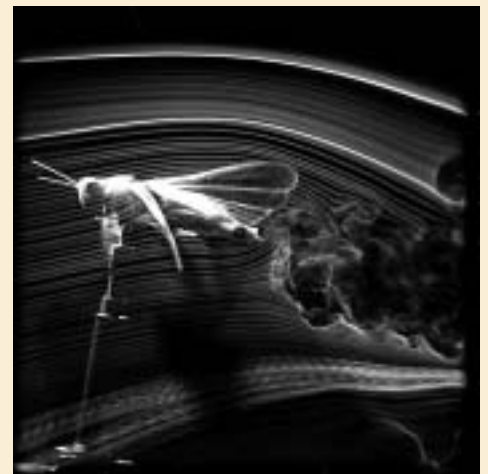
Zenbat eta aire gehiago bultzatu beherantz, orduan eta goranzko indar handiagoa jasotzen du hegazkinak. Eta zenbat eta azkarrago joan, orduan eta aire gehiagori egiten dio hegazkinak bultza beherantz. Hegazkina poliki mugitzen bada, euste-indar bera izateko, eraso-angelua handiagoa izan behar du, baina muga bateraino. Angelua 18-20 gradukoa denean, hegoaren inguruko aireak utzi egiten dio geruzatan mugitzea-



Txoriak, saguzarrak eta intsektuak: animalien hegaldia

Hegaztiek, saguzarrek eta intsektu askok hegan egiten dute. Nola? Bada, bakoitzak badu berezko modu bat hegan egiteko, dituen beharren arabera. Hegazti batzuek planeatzaileak dira; beste batzuek hegoei azkar eragiten diete; saguzarrek deformatu egiten dituzte hegoak, maniobratzeko ahalmena izateko; kolibriak eta intsektuek aire-zurrunbiloak sortzen dituzte airean geldirik egoteko; eta inor ez dago ziur nola egiten zuten hegan pterodaktileok, dinosauroen garaietan.

Hegalari-motaren arabera, hegaldiaren azalpena aldatu egiten da, baina denek badute hegazkinak ez duten ezaugarri bat: bizidunen hegoak ez dira egitura zurrin mugiezinak. Hala eta guztiz ere, animalia hegalaria guztiek antzekotasun bat dute makina hegalariekin: airea beherantz bultzatzen dute hegan egin ahal izateko.



Oti batek hegan egin bitarteko aire-fluxua. Australiako New South Wales Unibertsitatean J. Young biofisikariak egindako esperimentu baten argazkia. ARG: SCIENCE/AAAS ©

ri eta zurrunbiloak sortzen hasten dira. Euste-indarra desagertu egiten da, eta hegazkina erori. Horregatik, hegaldia eraso-angelu txikietan oinarrituta dago; normalean, 10 gradu bitartekoa izaten da. Angelu horrek paperezko hegazkinaren hegaldia ere azaltzen du; hain zuzen, angelu horren inguruan irauten duen bitartean planeatu-ko du hegazkinak.

Eraso-angeluarekin batera, beste faktore askok hartzen dute parte hegazkinaren airea behe-rantz bultzatzeko ahalmenean: hegoen luzera eta azalera, hegazkinaren altueraren arabera aire-dentsitatea, haizea eta abar. Baina eraso-angelua gakoa da, eta horrek erabateko garrantzia du pilotuentzat; neurri handi batean, hegazkin bat pilotatzea eraso-angelua egokitzearen artea da.

➔ *Neurri handi batean, hegazkin bat pilotatzea hegoaren eraso-angelua egokitzearen artea da.*

Angelu-jokoan agertzen da berriz Bernoulliren printzipioa. Angeluan egiten diren aldaketek azkartu eta moteldu egiten dituzte airearen bi fluxuak, alegia hegoaren gainekoa eta azpikoa. Bi fluxuen presioa ezberdina da, eta horregatik sortzen den goranzko bultzadak ere laguntzen du. Bernoulli ez dago erabat baztertuta hegal-diaren azalpenetik.

Ez dago erabat baztertuta, baina ez da hegan egitearen arrazoi nagusia. Hegoaren forma ez da hegazkin bat hegalari bihurtzen duen funtsezko faktorea. Hala ere, badu garrantzia. Bestela, zergatik egiten dituzte hego gehienak forma berekoak? Arrazoi bat baino gehiago dago. Alde batetik, hegoen ohiko itxura oso aerodinamikoa da. Hegazkinaren diseinua ez da bakarrik airean eusten dion indarraren arabera; beste hiru indar garrantzitsu daude: pisua bera, aurreranzko propulzioa eta airearen erresistentzia. Azken indar hori mugimenduaren kontra-ko norabidean doa, eta, horri aurre egiteko, aukera ona da ohiko hegoaren profila erabiltzea.

Bestetik, hegoaren profilararen arabera aldatzen da eraso-angeluaren muga. Gainera kurbatuak diren hegoek lauek baino angelu handiagoetan funtzionatzen dute. Beraz, hegoaren formak, nahiz eta hegan egitearen lehen arrazoia ez



Wright anaien Flyer hegazkinaren kopia bat. Garai hartako hegazkinen hegoak bi aldeetatik ziren kurbatuak, goitik eta behetik. Beraz, Bernoulliren efektua baztergarria zen hego haietan, eta, hala ere, hegan egiten zuten. ARG: 350Z33/CC-BY-SA.

izan, garrantzi handia du, inguruan duen airearen jarioan asko eragiten duelako.

Aireak hegazkinaren inguruan duen jokabidea zoruak alda dezake, hegaldia oso baxua denean. Kasu horretan presio-diferentzia oso handia gertatzen da hegazkinaren gaineko eta azpiko aire-fluxuen artean. Zorua oso gertu dagoenean, hegazkinaren azpiko airea konprimatuta dago, eta presio handiko poltsa bat sortzen da. Sortzen den aldea oso handia da, eta hegazkinak jasotzen duen goranzko indarra handia da. Zoru-efektua deritzo. Hori ere ez da Bernoulliren ekarpena, baina bada presio-diferentziaren ondorioa. Eta berriz ere, airea behe-rantz bultzatzearen ondorioa da. Azken batean, hori da hegan egitearen sekretua. ●