

# VÁLTOZÓ KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT ÜZEMELŐ GÉPEK TERHELÉS ANALÍZISE

MICHELBERGER Pál, SVÁB János\*, KERESZTES Albert

Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar  
Mechanika Tanszék

## Bevezetés

A gépszerkezetek szilárdsági méretezése az elmúlt évtizedekben jelentősen fejlődött. A végeselem módszer elterjedése számos mérnöki feladat kielégítő pontosságú megoldását tette lehetővé. A külső terhelés-analizálása, valamint a szerkezet „válaszának” analizálása azonban ezzel a fejlődéssel nem tartott lépést. Az előbbi a szerkezet üzemelésének vizsgálatát igényli, az utóbbi pedig a fémfizika területére esik. Nyilvánvaló, hogy a terhelés analízis, a szerkezet analízis és a szerkezet válaszának elemzése összefüggő láncot képez, és szilárdsági méretezés megbízhatóságának fokozásához nem elegendő e lánc egyetlen elemének kifejlesztése.

Jelen előadásunkban csak a terhelés-analízis néhány kérdésével foglalkozunk, a szerkezet válaszának elemzése — bár legalább ilyen fontosságú — kívül esik vizsgálataink körén.

## A szerkezetek külső terhelésének osztályozása

A szerkezetek külső terhelésének felvételében — bizonyos önkényességgel — jelenleg három irányzat található [1]:

— a szerkezetek egy részére (pl. híd, hajó stb.) — a szerkezet analízisét végző személyektől független — intézmények „jogi” előírásokba rögzítik a figyelembe veendő terheket.

Az előírásokat kidolgozó intézmények rendszeresen gyűjtik a már megvalósított szerkezeteken nyert tapasztalatokat, és természetesen szisztematikus kutató munkát is végeznek, melynek eredményeként ezek az előírások egyre pontosabban tükrözik a tényleges terheket. Az előírások azonban csak a korábbiakkal megegyező üzemi körülményekre és a korábbiakhoz „hasonlító” szerkezetekre fogadhatók el.

— A szerkezetek más részére (pl. tömegcikkék, személygépkocsik stb.), nem létezik „jogi” előírás a mértékadó terhek felvételére. E szerkezetek azonban nagy darabszámban készülnek, mely lehetővé teszi nagy példányszámra

\* Építő és Anyagmozgató Gépek Tanszék

végzett, megbízható kísérletek végrehajtását, és így a teher felvételben elkövetett hibák a kísérletek során kideríthetők. Az e csoportba tartozó újonnan tervezett termékek általában kis mértékben különböznek a korábbi termékektől, ezért a korábbiakon nyert üzemeltetési és méretezési tapasztalatok teljes mértékben hasznosíthatók. E két körülmény — kísérleti megalapozottság és a korábbi tapasztalatok felhasználása — viszonylag biztonságos szilárdsági méretezést tesz lehetővé.

— Végül a szerkezetek harmadik csoportjában sem jogi előírások, sem a korábbi tapasztalatok és gondos kísérletek nem állnak rendelkezésre (ilyenek pl.: egyedi gépek, haszonjárművek, speciális szállító és rakodó gépek stb.). Ilyenkor a tervező mérnök egyéni felelőssége alapján választja meg a mértékadó külső terheléseket. Nyilvánvaló, hogy az egyéni felelősségvállalás következtében ezek a szerkezetek általában feleslegesen túlméretezettek, de természetesen az ellenkező eset is előfordulhat.

A terhelés-analízis jelentősége tehát az utóbbi csoportban a legnagyobb, bár szisztematikus kidolgozása az előző esetekben is kívánatos.

Sajnos ismereteink jelen szintjén egységes, a kérdéskör minden részletére kiterjedő módszer nem áll még rendelkezésünkre, ezért vizsgálatainkat célszerű géptípusonként (szerkezeti típusonként) külön-külön végezni. Idővel ezeknek a részanalíziseknek közös vonásaiból lehetséges egységes terhelés-analízis kidolgozása.

Mielőtt néhány gyakorlati példán (haszonjárművek, daruk) a vizsgálat egy lehetséges módját bemutatnánk, kiemeljük a már jelenleg is felismerhető közös vonásokat, terhelés osztályozási szempontokat.

Bármely gépszerkezet terhelése felosztható egyrészt időben állandó, statikus és időben változó, dinamikus terhelésre, másrészt mindkét fajta terhelés lehet determinisztikus (ezek viszonylag egyszerű számítással kezelhetők), illetve véletlenszerű (ezek jellemző paramétereinek meghatározása általában lényegesen bonyolultabb, és semmiképpen nem nélkülözhetik kiterjedt mérésekkel történő megalapozásukat).

Az egyes terhelésfajták természetesen nem választhatók el egymástól élesen. Így például az időben lassan változó terhelés statikus teherként, és számos véletlenszerű terhelés kvázi-determinisztikusan kezelhető. Néhány jellegzetes esetet az 1. ábra tüntet fel.

Terhelés	Statikus	Dinamikus
Determinisztikus	Szerkezet önsúlya	Stabil, állandó terhelésű erőgép üzemi terhelése
Véletlenszerű	Előfeszítés Hasznos teher	Járművek útgerjesztése Járművek, daruk változó üzeme

1. ábra

Az egyes terhelésfajták számítása is eltérő módszereket igényel. Az előző felosztás szerint például az alábbi megoldások képzelhetők el (2. ábra).

Terhelés	Statikus	Dinamikus
Determinisztikus	várható érték számítása	idő függvény ismerete (differenciál egyenlet megoldás)
Véletlenszerű	eloszlás függvény, vagy momentumok számítása	stacionárius ergodikum esetben teljesítménysűrűség spektrum ismerete kellő számú realizáció időfüggvényes megoldása

2. ábra

Az egyes esetek számítási módszere — és így a tulajdonképpeni terhelésanalízis — nem választható el magától a szerkezet leírásától. Lineáris szerkezet esetében például ugyanis a differenciál egyenlet periodikus gerjesztés esetén algebrai feladatra vezet, nem lineáris szerkezetről ezzel szemben lépésenkénti integrálás szükséges az időfüggvényes megoldáshoz. Mindez megkívánja — de ezzel jelen előadásunkban nem foglalkozunk — a szerkezet modellezésének alapos előzetes vizsgálatát is.

### A terhelés modellezés mechanikai problémái

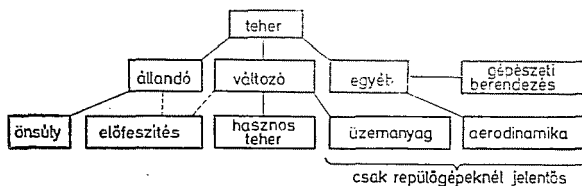
#### *A terhelés modellezés hasznójárművek esetén*

A terhelés osztályozását hasznójárművekre a 3. ábra mutatja. Ennek alapján a vázszerkezet egy adott s-koordinátájú pontjában a statikus igénybevételt — mint valószínűségi változót — az alábbi befolyásoló tényezők határozzák meg [2]:

$$M_{\text{stat}}(s) = F_1\{\mathbf{M}(t), \mathbf{S}(t, \mathbf{M}), \varepsilon(t), \alpha(t)\} \quad (1)$$

A dinamikus igénybevétel a vázszerkezet egy adott pontjában ugyancsak véletlen valószínűségi, amely döntően az alábbi befolyásoló tényezőktől függ:

$$M_{\text{din}}(s) = F_2\{\mathbf{M}(t), V(\mathbf{M}, k, u, z), x(l), \mathbf{S}(t, \mathbf{M}), \mathbf{K}(t, \mathbf{M}), d\} \quad (2)$$



3. ábra

Az összefüggésekben:

$\mathbf{M}(t)$  — a saját tömegből és a hasznos teher tömegéből felépített matrix,

$\mathbf{S}(t, \mathbf{M})$  — a vázszerkezet és a szállított áru merevségi adatait tartalmazó merevségi matrix,

$\varepsilon(t)$  — a gyártási és szerelési eljárásból származó igénybevételek,

$\alpha(t)$  — azon kinematikai terhelések hatása, amely a jármű megállása, huzamosabb idejű várakozása esetén az útfelület egyenetlenségeiből adódik (pl.: a vázszerkezet elcsavarodása),

$x(l)$  — az út kijelölt  $l$ -helyén észlelhető útegyenlőtlenység,

$\mathbf{K}(t, \mathbf{M})$  — a járműre jellemző csillapítási matrix, amely a terhelésnek és időnek is függvénye,

$d$  — a menetdinamikai hatásokból (gyorsítás, fékezés, ívmenet) adódó járulékos igénybevétel.

Az összes befolyásoló tényező figyelembevétele a gyakorlati számítások során a feladat nagysága miatt nem lehetséges. A könnyebb számíthatóság érdekében korábbi munkáinkban egyszerűsítő feltételezéseket tettünk [3]. Ezen feltételezések figyelembevételével meghatároztuk a szerkezet egy kiválasztott  $s$ -koordinátájú pontjában az igénybevétel kétméretű eloszlásfüggvényét az

$$H(x,y) = \sum_{(0 \leq y < y)} M_j \int_{-\infty}^x \sum_{i,k,l} \frac{m_l \cdot P_{il} \cdot r_k}{\sqrt{2\pi} \cdot D_{ijk}} \exp\left[-\frac{\xi^2}{2D_{ijk}^2}\right] d\xi \quad (3)$$

összefüggés segítségével, ahol

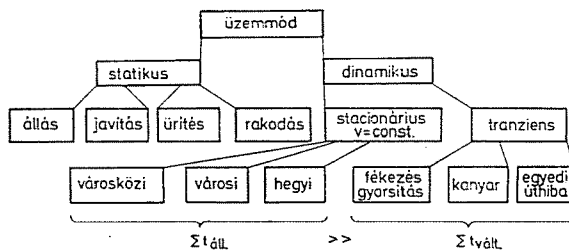
$M_j$  — a  $j$ -edik teherállapot relatív gyakorisága.

$m_l$  — az  $l$ -edik üzemmódban tartózkodás relatív gyakorisága. (Haszonjárműveknél az üzemmódban tartózkodás osztályozását a 4. ábra mutatja. Ebből eddigi munkáinkban csak a városközi, városi, hegyi üzemmóddal foglalkoztunk, mivel a jármű üzemelési idejének döntő hányadát ezekben az üzemmódokban tölti el.)

$P_{il}$  — az  $l$ -edik üzemmódban a sebesség relatív gyakorisága.

$r_k$  — a  $k$ -edik útkategóriára kerülés relatív gyakorisága.

$D_{ijk}$  — az  $i$ -edik sebességosztályban a  $j$ -edik terhelési állapotban a  $k$ -edik útkategórián a dinamikus igénybevétel szórása.



4. ábra

A különböző károsodás elméletek (melyek vizsgálatával jelen dolgozatunkban nem foglalkozunk) a különböző feszültségszintek átmetszési számait használják fel — a számunkra fontos — a várható élettartam meghatározásához.

Rice [4] munkájából kiindulva meghatároztuk változó üzemmód esetén az útegységre jutó „ $u$ ” feszültség szint átmetszési számok várható értékét [5] az

$$N(u) = \sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^H q_{l,k} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} N_{l,k}^u(x, y) f_v^{l,k}(x) f_z^{l,k}(y) dx dy \quad (4)$$

összefüggés segítségével, ahol

$q_{l,k}$  — rögzített „ $l$ ” üzemmód és „ $k$ ” útkategórián eltöltött útszakaszok relatív gyakorisága.

$N_{l,k}^u(x, y)$  — rögzített „ $l$ ” üzemmód „ $k$ ” útkategória „ $x$ ” sebesség és „ $y$ ” terhelés mellett az útegységre jutó  $u$ -feszültség színátmetszés számának várható értéke.

$f_v^{l,k}(x)$  — rögzített  $(l, k)$  értékpár mellett a sebesség sűrűségfüggvénye.

$f_z^{l,k}(y)$  — rögzített  $(l, k)$  értékpár mellett a terhelési állapot sűrűségfüggvénye.

#### *A terhelés modellezés daruk esetén*

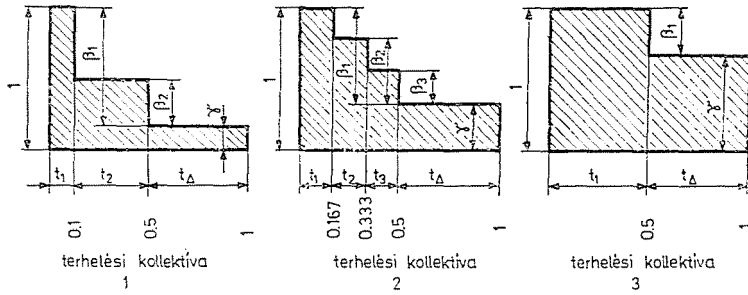
A daruk méretezésére vonatkozó hazai és nemzetközi előírások részletesen foglalkoznak a terhelések meghatározásával. A daruk terhelését szemléletesen egy kikötői portáldarun vizsgálhatjuk. Ez sínpályán halad, az oszlop a gémmel együtt függőlegesen tengely körül forog, a billenő gém elemei vízszintes tengely körüli forgómozgást, a teher pedig függőlegesen irányú mozgást végez. E mozgások kombinációja, pl. a felemelt teherrel forgás és közben a gém billentése, a teher lengését is figyelembe véve bonyolult mozgásállapotot és a tömegerők bonyolult kombinációját eredményezi. Ezek egyaránt hatnak az acélszerkezeti és a gépészeti elemekre.

Az acélszerkezeti és a gépészeti elemek statikus terhelését jelen esetben is (1) összefüggésben szereplő befolyásoló tényezők határozzák meg.

Az  $M(t)$  tömeg matrix meghatározása a járműveknél lényegesen bonyolultabb. A portál egy elemének igénybevételét ugyanis az alábbi tényezők befolyásolják:

- az emelt teher tömege;
- a gém síkjának a pálya irányával bezárt szöge;
- a gém billentése miatt a gémcúcsnak a forgástengelytől mért távolsága;
- a sínek egyes pontjainak véletlenszerű magassági eltérése a vízszintes síktól.

A felsorolt befolyásoló tényezők közül jó közelítéssel csak az emelt teher statisztikai jellemzőit ismerjük. A DIN 15018 az emelt teher négy jellemző eloszlásfüggvényével számol (5. ábra).



5. ábra

A gém síkjának a pálya irányával bezárt szöge és a gémcsúcs távolsága a támaszerőket befolyásolja. Ezek statisztikai jellemzőit még nem ismerjük.

Az  $S(t, \mathbf{M})$  merevségi matrix viselkedése is hasonló a gépjárművekéhez. Régi daruknál a Tanszék mérései szerint a lazulások olyan mértékűek lehetnek, hogy a linearitás már durva közelítésnek sem tekinthető.

Az  $e(t)$ , a gyártásból és a szerelésből adódó igénybevételek a daruknál nagyon jelentősek. Az igénybevételek meglétére utal a mérések során az a jelenség, hogy a szerkezet bizonyos pontjaiban plasztikus alakváltozásra utaló nyúlásváltozást mérünk ott, ahol a számítások szerint még az arányos zónában kellene lenni.

Az  $\alpha(t)$ , a pályahibákból adódó többletigénybevétel a négytámaszú portáldaruknál nem elhanyagolható értékű. Ha a pályahiba miatt az egyik támaszpont a síktól kiemelkedik, a portálban járulékos többletigénybevétel ébred. Ez a támaszerők antimetrikus változását eredményezi, ami a megemelkedett és az átlósan szemben levő támasz erejét megnöveli, a másik kettőét ugyanannyival csökkenti. Ez a többleterő a pálya hosszának függvényében véletlenszerűen, tehát sztochasztikusan változik és függ a portál  $S(t, \mathbf{M})$  rugalmassági matrixától.

A dinamikus igénybevételek meghatározása daruknál is a (2) összefüggés alapján történhet, az egyes tényezők súlya azonban a járműveketől lényegesen eltér.

Az  $\mathbf{M}(t)$  tömegmatrixban állandó változást jelent a kötélen függő teher lengése. Ennek frekvenciája függ a teher tömegétől és a függesztés magasságától, ami újabb véletlenszerű hatást jelent.

Az  $x(l)$  út, esetünkben pályaeigenlőtleniségek, és a  $\mathbf{K}(t, \mathbf{M})$  csillapítási matrix hatása megegyezik a járművekével. A „ $d$ ” a menetdinamikai hatásokból adódó járulékos igénybevétel. Ennek hatása lényegesen nagyobb a járművekénél, mert a rakodási üzemet (emelés, forgatás, gémbillentés) állandó indítás és fékezés jellemzi.

A méréseink szerint a dinamikus hatások, vagyis a lengő igénybevételek amplitúdója az átmeneti üzemállapotokban a teher azonos gyorsulással indítá-

sánál a daru acélszerkezetében, a vizsgált elem helyének függvényében kisebbek, de lényegesen nagyobb is, mint a szabvány szerinti állandó dinamikus tényezővel számított érték.

Nem elhanyagolhatók, esetenként mértékadók a daru forgatásából és a gém billentéséből származó vízszintes irányú terhelések.

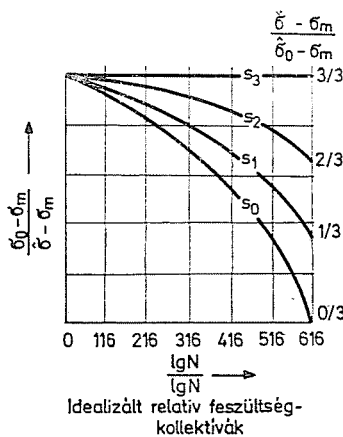
A modellezés során az alábbi elhanyagolásokat alkalmazzák.

- A szerkezetet lineárisnak tekintik annak ellenére, hogy a kötelek viszkóelasztikusak és a deformációk sem tekinthetők „kis alakváltozásoknak”.
- A gémsúcs elmozdulása több 100 mm-es nagyságú is lehet.
- Az S merevségi matrixnál eltekintenek a kopástól, lazulástól, a korróziós károsodástól, de nem tekinthetnek el a forgatás és gémbillentés miatti értékváltozásoktól.

A mozgási tartományt véges számú szakaszra osztva, és ezeken belül állandó értékkel számolva közelítik a változást.

- A csillapítást szinte kivétel nélkül elhanyagolják, mert a járművekhez hasonló útgerjesztéssel nem kell számolni.
  - A támaszerők véletlenszerű változásától nem tekinthetnek el, mert a pályahibák miatt előfordulhat az egyik támasz teljes tehermentesülése, vagyis a hárompontos alátámasztás is.
  - A gyakorlatban a gyártásból és a szerelésből adódó, járulékos terhelésekkel nem számolnak.
  - A szélterhelést véletlenszerűen változó statikus terhelésnek tekintik annak ellenére, hogy a periódusos leválások periodikusan gerjesztik a szerkezetet.
- Az egyszerűsítések figyelembevételével:

$$M_{\text{stat}}(t) = F_3\{M(t), S(t), a(t)\} \quad (5)$$



6. ábra

illetve:

$$M_{\text{din}}(t) = F_4\{M(t), S(t), a(t), W(M, S), h\} \quad (6)$$

ahol  $W(M, S)$  az átmeneti üzemiállapotokban a rendszer átviteli matrixa. Ez függ a pillanatnyi tömegeloszlástól és a merevségtől.

$h(t)$  az indító és a fékezőerő változása, amely jelentősen függ a hajtás módjától.

Az egyes igénybevételek előfordulási valószínűségét a gyakorlatban az eloszlásfüggvényekkel szokták megadni, mert ezek képezik mind az acélszerkezeti, mind a gépészeti elemek „üzemi szilárdságra” méretezésének az alapját. Lásd a DIN 15018 előírásait (6. ábra):

A szerkezet kialakítását és a hajtást a tervező mérnök jelentősen befolyásolhatja. Sima indítást és fékezést biztosító szabályozott hajtással az emelőgépek dinamikus terhelése jelentősen csökkenthető. Az oldalazásból adódó többletterhelések a szerkezet merevségének növelésével vagy a merevség teljes feloldásával és a két oldal együttlítését biztosító szabályozott hajtással mérsékelhetők.

A vezérlés kezelőtől függő hatását a mozgatások automatizálásával küszöbölhetjük ki. A vészhelyzetekben szükséges beavatkozások azonban kétségtelenséggé teszik az automatizált vezérlés jogosultságát.

### Összefoglalás

Az előzőekben a hasznójárművek és az emelőgépek terheléeloszlásának modellezési problémáit ismertettük.

Az elhanyagolások miatt a modellezést csak a valóság közelítésének tekinthetjük. Feladatunk a modellék helyességének vizsgálata. Ennek érdekében:

- A véletlenszerűen változó befolyásoló tényezők statisztikai jellemzőinek meghatározására szimulációs eljárást kell kidolgozni, illetve sorozatos vizsgálatokat kell végezni.
- Elsősorban emelőgépeknél és hasonló felépítésű szerkezeteknél meg kell vizsgálni a gyártásnál és a szerelésnél fellépő igénybevételek meghatározási lehetőségeit, illetve azokat az eljárásokat, amelyekkel ezeket az igénybevételeket csökkenthetjük.
- Kivitelezett szerkezeteken végzett mérések sorozatával kell ellenőrizni a modellezések helyességét.
- Konzultálni kell az anyagszerkezetes kollégákkal arról, hogy milyen igénybevételi, illetve feszültségi eloszlásfüggvényre van szükségük a várható élettartam biztonságos meghatározásához.

### Irodalom

1. Michelberger, P.—Sváb, J.: A terhelés modellezés néhány kérdése. Kézirat, 1982. MTA. GAB Méretezési Alb. jelentése
2. Michelberger, P.—Keresztes, A.: Determination of the Load Distribution Function of Road Vehicles in Advance. FISITA XVII. Congress. Budapest 1978. p. 1125.
3. Michelberger, P.—Gedeon, J.—Keresztes, A.: Some problems and developments in commercial road vehicle fatigue design and testing. Int. Journal of Vehicle Design 1, 440 (1980)
4. Rice, S. O.: Mathematical Analysis of Random Noise. Bell System Journal 24, 46 (1945)
5. Horváth, S.—Keresztes, A.—Michelberger, P.—Szeidl, L.: Mathematical model of the load and stress statistics of vehicle structures Applied Mathematical Modelling. 6 93 (1982)

Dr. Michelberger Pál tanszékvezető egy. tanár, az MTA levelező tagja

Dr. Sváb János egy. tanár, a műszaki tudományok kandidátusa

Dr. Keresztes Albert egy. adjunktus, a műszaki tudományok kandidátusa