

UOT 001:004.7

*Ələkbərov R.Q.*

AMEA İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
[rashid@iit.ab.az](mailto:rashid@iit.ab.az)

## SUPERKOMPÜTER TEXNOLOGİYALARI: MÖVCUD VƏZİYYƏTİ VƏ İNKİŞAF PERSPEKTİVLƏRİ

*Məqalədə süperkompüter texnologiyalarının hazırkı vəziyyəti və onların müxtəlif göstəricilər üzrə paylanma dinamikası analiz edilmişdir. Yaxın perspektivdə superkompüterlərin inkişaf dinamikası araşdırılmışdır.*

*Açar sözlər: süperkompüter, real məhsuldarlıq, nəzəri məhsuldarlıq, green computing, big data, flops, klaster, hesablama sistemləri, mikroprosessor.*

### Giriş

Ölkəmizdə informasiya cəmiyyətinin qurulması dövlət siyasətinin əsas prioritetlərindən biri kimi qəbul edilmişdir. İnformasiya cəmiyyətinin qurulmasının əsas vəzifələrinə bu cəmiyyətin hüquqi əsaslarının yaradılması, ölkənin iqtisadi, sosial və intellektual potensialının möhkəmləndirilməsi, müasir informasiya-kommunikasiya infrastrukturunun formalaşdırılması, informasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsi, qlobal informasiya fəzasına inteqrasiya və digər vacib məsələlər daxildir. Göstərilən məsələlərin həlli zamanı meydana çıxan mürəkkəb hesablama və böyük həcmli yaddaş tələb edən məlumatları daha sürətlə emal edib, istifadəçilərə çatdırmaq üçün yüksək hesablama məhsuldarlığına və böyük yaddaşa malik olan superkompüterlərdən geniş istifadə edilir. Eyni zamanda, müasir dövrdə elmin müxtəlif sahələrində: fiziki-kimyəvi proseslərin, nüvə reaksiyalarının, qlobal atmosfer proseslərinin real zaman kəsiyində modelləşdirilməsində, kriptografiyada, geologiyada, yeni dərman növlərinin yaradılmasında və s. meydana çıxan böyük hesablama və yaddaş resursları tələb edən mürəkkəb məsələlərin həllində fərdi kompüterlərin hesablama gücü kifayət etmir [1]. Buna görə də belə mürəkkəb məsələlərin həllində superkompüterlərdən geniş istifadə olunur.

### Paralel hesablama sistemləri və superkompüterlərin arxitekturu

Superkompüter mövcud kompüterlərin texniki göstəricilərindən (əməli yaddaşın həcmi, xarici disk qurğularının yaddaş həcmi, qiyməti, enerji sərfiyyatı və s.) və hesablama məhsuldarlığından dəfələrlə çox olan hesablama sistemidir. İlk dəfə superkompüter sözü keçən əsrin 60-cı illərində E.Lorens adına Livermore milli laboratoriyasının (Koliforniya, ABŞ) əməkdaşları Corc Maykl və Sidney Ferbank tərəfindən istifadə olunmuşdur. Superkompüterlər paralel hesablama sistemləri əsasında yaradılır. Paralel hesablama sistemlərinin təsnifatını ilk dəfə amerikalı alim Q.Flini 1964-cü ildə təklif etmişdir [1, 2]. Bu təsnifata görə hesablama sistemlərinin arxitekturu əmrlər axını və verilənlər axınının qarşılıqlı əlaqələri əsasında yaradılır. Məlum olduğu kimi, hesablama maşınlarının klassik arxitekturasında əmrlər və verilənlər ardıcıl emal edilir. Əmrlər və bunlara uyğun verilənlər hesab-məntiq qurğusuna çağrılaraq, ardıcıl olaraq yerinə yetirilir. Amma hesablama sistemlərində işlənmə prinsipi fərqlənir. Q.Flininin təklif etdiyi təsnifat aşağıdakı kimidir:

- bir əmr axını və bir verilənlər axını – BƏBV (*SISD-Single Instruction, Single Data*);
- bir əmr axını və çox verilənlər axını – BƏÇV (*SIMD-Single Instruction, Multiple Data*);
- çox əmr axını və bir verilənlər axını – ÇƏBV (*MISD-Multiple Instruction, Single Data*);
- çox əmr axını və çox verilənlər axını – ÇƏÇV (*Multiple Instruction, Multiple Data*).

BƏBV arxitekturasına klassik hesablama maşınlarının (Fon-Neymanın təklif etdiyi) arxitekturu uyğun gəlir. Bu cür sistemlər bir mərkəzi prosessordan ibarət olub, verilənlər üzərində ardıcıl olaraq əmrləri yerinə yetirir. Bu tipli hesablama sistemlərində hər hansı məsələnin həlli

üçün yazılmış proqramdakı əmrlər və verilənlər (operandlar) ardıcıl olaraq yaddaşdan bir-bir çıxarılır, yerinə yetirilir və sonda nəticələr yaddaşa yazılır.

İkinci tip hesablama sistemlərində bir əmr ilə çoxsaylı verilənlər üzərində əməliyyatlar aparılır. Bu cür sistemlərdə prosessorların sayı on minlərlə olur. Bir əmrin köməyi ilə müxtəlif verilənlər üzərində eyni əməliyyatlar həyata keçirilir. Bu cür sistemlərə vektor və matris sistemlərini misal göstərmək olar. Həmin sistemlərdə bir əmr vasitəsilə vektorun və ya matrislərin bütün elementləri üzərində eyni əməliyyatı həyata keçirmək olur. Hər element üçün bir prosessor elementindən istifadə olunur.

Üçüncü tip hesablama sistemlərində bir verilənlər üzərində çoxsaylı əmrlər axını yerinə yetirilir. Hələlik bu prinsip əsasında işləyən superkompüterlərdən praktikada istifadə edilmir.

Əsasən, paralel hesablama sistemlərində ÇƏÇV prinsipi ilə işləyən arxitekturdan geniş istifadə olunur. Bu cür sistemlər müxtəlif verilənlər üzərində bir neçə əmrlər axınının paralel yerinə yetirilməsini təmin edir. ÇƏÇV prinsipi ilə işləyən çoxsaylı arxitektura malik hesablama sistemləri – superkompüterlər yaradılmışdır. Superkompüterlərin yaradılmasında ÇƏÇV prinsipinə əsaslanan üç tip arxitekturdan geniş istifadə olunur: *SMP*, *MPP* və klaster [3]. *SMP* (*symmetric multiprocessing*) – simmetrik çoxprosessorlu arxitektura malik hesablama sistemində prosessorlar arasında əlaqəni təmin etmək üçün ümumi fiziki yaddaşdan istifadə olunur. Prosessorlar ümumi yaddaş vasitəsi ilə bir-biri ilə qarşılıqlı əlaqədə olurlar. Prosessorların hər biri yaddaşın istənilən ünvanına müraciətdə eyni hüquqa malikdir. Ona görə də *SMP* arxitekturlu sistemlər simmetrik sistemlər adlanır. *SMP* – sistemlər yüksəksürətli sistem şini (*SGI PowerPath*, *Sun Gigaplane*, *Dec Turbolaset* və s.) əsasında yaradılır. Bu sistemin aşağıdakı üstünlükləri var:

- ümumi yaddaşdan istifadə prosessorlararası məlumat mübadiləsinin sürətli aparılmasına imkan verir;
- proqramlaşdırma üçün sadə və universaldır;
- istifadəçilər yaddaşdan istənilən həcmdə istifadə etmək imkanına malikdir;
- məsələlərin effektiv avtomatik paralelləşdirilməsi üçün çoxsaylı vasitələr mövcuddur;
- istismarı çox sadədir. Bu tip sistemlərdə otaq şəraitində işləyən adi kondensiyonerdən istifadə edilir;
- qiyməti çox baha deyil.

*SMP* sisteminin çatışmayan cəhəti ümumi yaddaşlı sistemlərin pis miqyaslaşdırılmasıdır.

Göstərilən çatışmazlıq bu sistemlərdən geniş istifadə olunmasına imkan vermir. Geniş miqyasda istifadə edilməsinin çətin olmasına səbəb ümumi şindən istifadə olunmasıdır. Bu şində zamanın bir anında iki qurğu arasında məlumat mübadiləsi ola bilər. Ona görə də yaddaşın eyni hissəsinə bir neçə prosessorun müraciət etməsi münaqişə halının yaranmasına səbəb olur və hesablama qovşaqları bir-birinin işləməsinə mane olur. Bu cür münaqişələrin yaranması ümumi şinin sürətindən və sistemdə iştirak edən prosessorların sayından çox asılıdır. *SMP* arxitekturlu sistemlərdə prosessorların sayı 32-dən çox olur. Bu cür sistemlərdən, əsasən, işçi stansiyaların və serverlərin yaradılmasında geniş istifadə olunur.

*MPP* (*Massively Parallel Processors*) – kütləvi paralelləşdirilmiş prosessorlu arxitektura malik hesablama sistemləri *SMP* arxitektura nisbətən daha geniş yayılıb. Bu tip sistemlərdə yaddaş fiziki olaraq prosessorlar arasında paylanır. *MPP* sistemləri kommutatorun köməyi ilə prosessor və yaddaşa malik olan ayrı-ayrı modulların birləşməsindən yaradılır. Bu tip sistemlərdə hər bir modul özünü tam funksiyalı kompüter kimi aparır. Hər bir yaddaş moduluna yalnız ona qoşulan prosessor müraciət edə bilər. Modullar bir-birləri ilə kommutatorun vasitəsilə əlaqədə ola bilər. Əməliyyat sistemi bu arxitektura iki variantda işləyə bilər. 1-ci variantda bu modullardan biri idarəedici kompüter (front - end) kimi seçilir və əməliyyat sistemi tam olaraq ona yüklənir, digər modullara isə əməliyyat sisteminin sadələşdirilmiş variantı yazılır. 2-ci variantda isə hər bir modula əməliyyat sistemi tam variantda yazılır. *MPP* arxitekturlu hesablama sistemi yaxşı miqyaslaşdırıla bilər. Bu cür sistemlərdə prosessorların işinin sinxronlaşdırılması asandır. Bu arxitektura əsasında yaradılan superkompüterlər yüksək hesablama məhsuldarlığına malik olur. Bu

sistemlər on minlərlə mikroprosessoru birləşdirir. Bunlara *ASCI Red* və *ASCI Blue Pacific* superkompüterlərini misal göstərmək olar. Bu sistemlərin bir neçə çatışmayan cəhəti vardır:

- ümumi yaddaşdan istifadə olunmadığından prosessorlararası məlumat mübadiləsinin sürəti aşağı olur;
- hər bir prosessor özünə məxsus olan həcmə kiçik lokal yaddaşdan istifadə edir;
- prosessorlararası məlumat mübadiləsinin təmin edən xüsusi proqramlardan istifadə olunur.

*MPP* arxitekturlu superkompüterlərdə mürəkkəb məsələlərin altməsələlərə bölünüb, hesablama qovşaqları arasında paylanması üçün *MPI*, *PVM*, *BSPlib*, *Corba* və s. kimi tətbiqi proqram paketlərindən istifadə olunur. Bəzi superkompüterlərin yaradılmasında hibrid arxitektura olan *NUMA*-dan (*nonuniform memory access*) istifadə olunur. Bu arxitektura *SMP* və *MPP* arxitekturları birləşdirilib. *NUMA*-da hesablama sistemi lokal yaddaşa malik olan *SMP* modullarını yüksək sürətli kommunikasiya şəbəkəsinin köməyi ilə ümumi fiziki yaddaş vasitəsilə birləşdirməklə yaradılır.

Son dövrlərdə superkompüterlər klaster arxitekturu əsasında qurulur. superkompüterlərin 2015-ci ildəki 46-cı reyting cədvəlində dünya üzrə istehsal olunmuş superkompüterlərin 85.2% -i klaster tiplidir.

Klaster - şəbəkə texnologiyasının (ümumi şin kommutatorlarının vasitəsilə və s.) köməyi ilə daha çox kompüter (hesablama qovşağını) özündə birləşdirən hesablama sistemidir. Hesablama qovşağı kimi server, işçi stansiya, fərdi kompüter və ya bleyd-serverlərdən istifadə olunur. Klaster sisteminin digər sistemlərə nəzərən üstünlüyü ondadır ki, hesablama qovşaqlarından hər hansı biri sıradan çıxarsa, onun işini digər hesablama qovşaqları öz üzərinə götürür. Klaster sistemi ayrı-ayrı modullardan təşkil olunur. Hər bir modul özündə prosessoru, əməli yaddaşı və disk yaddaş qurğusunu birləşdirir. Bu arxitektura əsasında yığılmış superkompüterlərin qiymətləri çox ucuz olur. Bu superkompüterlər satışda olan mövcud standart kompleksləşdirici elementlər (*off the shelf*) – prosessorlar, kommutatorlar, əməli yaddaş, disk yaddaş və xarici qurğular üzərində yığılır. Göstərilən modulların bir-birləri ilə əlaqələndirilməsi üçün şəbəkə texnologiyasından (*Fast/Gigabit Ethernet*, *Myrinet* və s.) istifadə olunur. Klaster tipli superkompüterin yığılması, sazlanması, idarə edilməsi çox sadədir. Klaster sistemlərinin qiyməti ucuz, quraşdırılması asan və idarə edilməsi sadə olur. Ona görə də dünyada istehsal olunan superkompüterlərin yaradılmasında bu arxitekturdan geniş istifadə edilir. Superkompüterlərdə *Linux*, *Unix*, *MS Windows* və s. əməliyyat sistemlərindən geniş istifadə olunur. Superkompüterlərdə mürəkkəb məsələlərin həlli üçün *PVM*, *MPI*, *OpenMP* və s. tətbiqi paket proqramları geniş tətbiq edilir [1, 4].

*PVM* (*Paralel Virtual Machine* – paralel virtual maşın) 1991-ci ildə yaradılmışdır. Müxtəlif tip kompüterlərdən (prosessorlardan) təşkil olunmuş çoxprosessorlu hesablama sistemlərində (klaster arxitekturlu) alt proqramlara bölünmüş proqramın paralel yerinə yetirilməsini təmin edir.

*MPI* (*Message Passing Interface* – məlumatın ötürülməsi interfeysi) 1993-cü ildə yaradılmışdır. Paylanmış yaddaşlı çoxnüvəli və çoxprosessorlu hesablama sistemlərində (*MPP* arxitekturlu) alt proqramlara bölünmüş proqramın paralel yerinə yetirilməsini təmin edir. Hesablama qovşaqları arasında mübadilə kommutatorlar (*Gigabit Ethernet*, *Infoband* və s.) vasitəsi ilə həyata keçirilir.

*Open MP* (*Open Multi Processing*) 1997-ci ildə yaradılmışdır. Ümumi yaddaşlı çoxnüvəli və çoxprosessorlu hesablama sistemləri (*SPM* arxitekturlu) alt proqramlara bölünmüş proqramın paralel yerinə yetirilməsini təmin edir.

Superkompüterlərdən aşağıda adları göstərilən, elmin müxtəlif sahələrində meydana çıxan mürəkkəb məsələlərin həllində geniş istifadə edirlər [5]:

- nəzəri və eksperimental fizika, yüksək enerji fizikası, kvant fizikası və s.;
- kvant və molekulyar kimya;
- böyük sistemlərin riyazi modelləşdirilməsi;
- kimya mühəndisliyi, hesablama kimyası, yeni materialların yaradılması;
- maşınqayırma sənayesi;

- ekologiya;
- genetika;
- yerdə, okeanda, atmosferdə baş verən proseslərin modelləşdirilməsi;
- astronomiya;
- hərbi;
- və s.

### Superkompüterlərin hesablama məhsuldarlığının təyin edilməsi

Çoxprosessorlu hesablama sistemlərinin əsas göstəricilərindən biri onların hesablama məhsuldarlığıdır. Superkompüterlərin reyting cədvəli tərtib olunarkən, onların hesablama məhsuldarlığı əsas göstərici kimi götürülür. Superkompüterin hesablama məhsuldarlığı dedikdə, onun bir saniyədə nə qədər əməliyyat yerinə yetirdiyi başa düşülür. Superkompüterlərin məhsuldarlığı nəzəri və real məhsuldarlıqla qiymətləndirilir. Nəzəri məhsuldarlığı təyin etmək üçün sistemdə iştirak edən eyni tip prosessorlardan birinin məhsuldarlığını sistemdəki prosessorların sayına vurmaq lazımdır. Real məhsuldarlıq isə xüsusi test proqramlarının köməyi ilə təyin olunur [6]. Real məhsuldarlıq təxminən nəzəri məhsuldarlığın 70-90%-ni təşkil edir. Superkompüterdə məhsuldarlığı təyin etmək üçün Flop/s-dan (*Floating point operations per second*) – bir saniyə müddətində sürüşkən vergüllü ədədlər üzərində yerinə yetirdiyi əməliyyatların sayından istifadə olunur.

Bleyd serverlərdən (mikroprosessorlardan) təşkil olunan superkompüterlərin nəzəri məhsuldarlığının hesablanması məsələsi aşağıdakı kimidir:

Tutaq ki, superkompüter iki mikroprosessorlu *Intel E5-2650 bleyd* serverlər üzərində yığılmışdır. Hər bir mikroprosessor konveyer (səkkiz blokdan ibarət) prinsipində işləyən 8 nüvədən ibarətdir. Hər bir mikroprosessor bir takt müddətində 8 əməliyyat aparır. Prosessorun işləmə tezliyi 2 Ghz olarsa, onda bir nüvənin nəzəri məhsuldarlığı aşağıdakı kimi hesablanır:

$$8 \text{ Flop/takt} * 2 \text{ Ghz (takt/saniyə)} = 16 \text{ GFlop/saniyə.}$$

Hər hansı bir maşın instruksiyasının (əmrin) mikroprosessorun nüvəsində tam yerinə yetirilməsi bir takt müddətində həyata keçirilir. Bir əmrin yerinə yetirilməsi təxminən aşağıdakı mərhələlərdən keçir: instruksiyanın və verilənlərin yüklənməsi, instruksiyanın dekodlaşdırılması, instruksiyanın yerinə yetirilməsi və nəhayət, nəticənin qeyd edilməsi. Qeyd edilən proses bir maşın instruksiyasının yerinə yetirilməsinin sadələşmiş halı üçündür. Əslində əməliyyatın yerinə yetirilməsində daha çox mikroprosessor taktından istifadə olunur. Mikroprosessorların konveyer prinsipində işlədiyi nəzərə alınsa, hər bir taktın mikroprosessorun girişinə növbəti instruksiya verilir. Mikroprosessorlarda emal olunan instruksiya hər taktın sonra növbəti mərhələyə ötürülür. Son olaraq konveyerin çıxışında emal olunan instruksiyanın nəticəsi alınır.

Beləliklə, mikroprosessorlarda eyni vaxtda bir takt sürüşməsi müddətində bir neçə instruksiyanın (əmrin) eyni vaxtda paralel yerinə yetirilməsi mümkün olur. Prosessor bir takt müddətində bir yox, səkkiz instruksiyanın yerinə yetirilməsini həyata keçirmiş olur. Qeyd edilən bleyd serverin hesablama məhsuldarlığı belə hesablanır:

$$16 \text{ GFlop/s/nüvə} * 8 \text{ nüvə/CPU} * 2 \text{ CPU} = 256 \text{ GFlop/s.}$$

Bleyd serverlərdə qeyd edilən məhsuldarlığı əldə etmək üçün həll edilən məsələni (proqramı) 16 alt məsələyə (proqrama) bölüb, hər birini bir nüvəyə yönəltmək lazımdır. Tutaq ki, hər hansı superkompüter 4000 ədəd qeyd edilən bleyd serverlərdən təşkil olunmuşdur. Onda bir bleyd serverin məhsuldarlığını onların sayına vurmaqla superkompüterin nəzəri məhsuldarlığını təyin etmək olar. Göstərilən halda superkompüterin nəzəri məhsuldarlığı aşağıdakı kimi təyin edilir:

$$4000 * 256 \text{ GFlop/s} = 1024000 \text{ GFlop/s} = 1024 \text{ TFlop/s} = 1,024 \text{ PFlop/s.}$$

Superkompüterlərin real məhsuldarlığını təyin etmək üçün test proqramlarından istifadə olunur. Test proqramlarının ən geniş yayılanı *LINPACK*-dir [1, 4]. *LINPACK* test proqramı 1979-cu ildə ABŞ-ın Çikaqo Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən Arqon milli laboratoriyasının əməkdaşı C.Donqar tərəfindən yaradılmışdır. Bu,  $N \times N$  (1000x1000) məchullu xətti cəbri tənliklərin həll edilməsi üçün tərtib edilmiş test proqramdır. Dünya üzrə superkompüterlərin reyting cədvəlinin tərtib edilməsində bu test proqramlarından geniş istifadə olunur.

### Superkompüter texnologiyalarının mövcud vəziyyətinin analizi

1976-cı ildə amerikalı alim Seymur Krey tərəfindən, ilk superkompüter (*CRAY-1*) yaradılmışdır. Həmin superkompüter saniyədə 160 milyon əməliyyat yerinə yetirirdi, əməli yaddaşının həcmi 8 Mbayta bərabər, qiyməti 8,8 milyon ABŞ dolları həcmində idi [4]. 1993-cü ildən başlayaraq Amerikanın Lourens Berkli Milli laboratoriyasının kompüter sahəsindəki ekspertləri tərəfindən hər il (son illər ildə iki dəfə - iyun və noyabr aylarında) dünya üzrə ən güclü 500 superkompüterin reyting cədvəli çap olunur. Superkompüterlərin 2015-ci ilin noyabr ayında çap olunan 46-cı reyting cədvəli cədvəl 1.-də göstərilmişdir [7].

Cədvəl 1.  
Superkompüterlərin reyting cədvəli

Sıra nömrəsi	Təşkilat və dövlətin adı	Kompüterlərin adları və istehsalçıları	Nüvələrin sayı	Real məhsuldarlıq (TFlop/s)
1	<i>National Super Computer Center</i> (Guangzhou, Çin)	<i>Tianhe-2 (MilkyWay-2)</i> (Milli Müdafiə Texnologiyaları Universiteti)	3 120 000	33 862.7
2	<i>Oak Ridge National Laboratory</i> (Oak Ridge, ABŞ)	<i>Titan (Cray inc.)</i>	560 640	17 590
3	<i>Department of Energy's National Laboratory</i> (California, ABŞ)	<i>Sequoia (IBM)</i>	1 572 864	17 173.2
...	...	...	...	...
100	<i>HLNR Hannover University</i> (Almaniya)	<i>Gottfried (CRAY XC40)</i>	40 320	829.8
...	...	...	...	...
300	<i>CSIR Fourth Paradigm Institute</i> (Hindistan)	<i>Cluster Platform 3000 (HP)</i>	17 408	334.4
...	...	...	...	...
500	<i>University Regensburg</i> (Almaniya)	<i>QPACE2 (Eurotech)</i>	15 872	206.4

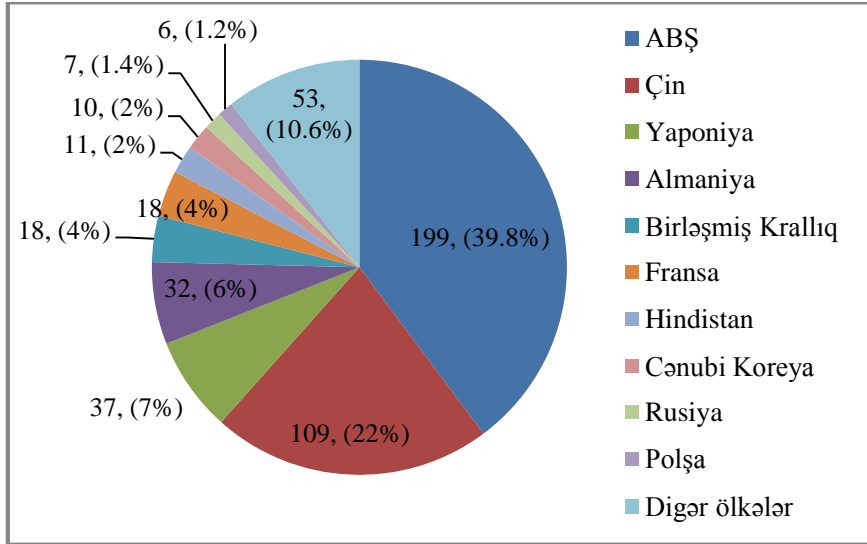
Göründüyü kimi, birinci yerdə Çinin Guangjou şəhərindəki Milli Super Kompüter Mərkəzində yerləşən *Tianhe-2* (Süd Yolu-2) superkompüterini dayandır. 3,120,000 nüvədən ibarət olan *Tianhe-2* 33,800 TFlop/s ( $10^{12}$  Flop/s) hesablama məhsuldarlığına malikdir, qiyməti 290 milyon ABŞ dollarına bərabərdir.

On il müddətində superkompüterlərin reyting cədvəlinin müqayisəsi görür ki, 2005-ci ildə birinci yerdə olan superkompüter cəmi 136 TFlop/s hesablama gücünə malik idisə, 500-cü yerdə dayananın isə məhsuldarlığı 1.2 TFlop/s idi. 2015-ci ilin reyting cədvəlində isə birinci yerdə olan superkompüterin məhsuldarlığı, 2005-ci ilin reyting cədvəlində müvafiq yerində duran superkompüterin məhsuldarlığından 250 dəfə çoxdur. Qeyd etmək lazımdır ki, on il əvvəl birinci

yerdə yerləşən superkompüterin məhsuldarlığı cari reyting cədvəlinin 500-cü yerində yerləşən superkompüterin məhsuldarlığından 164 TFlop/s azdır. Bu isə superkompüterlərin məhsuldarlığının son illərdə sürətlə artmasının göstəricisidir.

Son iki ildə ilk 5 yerin sahibi isə, ümumiyyətlə, dəyişməyib. Bu da onu göstərir ki, artıq superkompüterlərin hesablama gücünü artırmaqdan daha çox, onlardan daha səmərəli istifadə ön plana çəkilir. Hal-hazırda 82 superkompüterin məhsuldarlığı 1 Pflop/s-dan yuxarıdır.

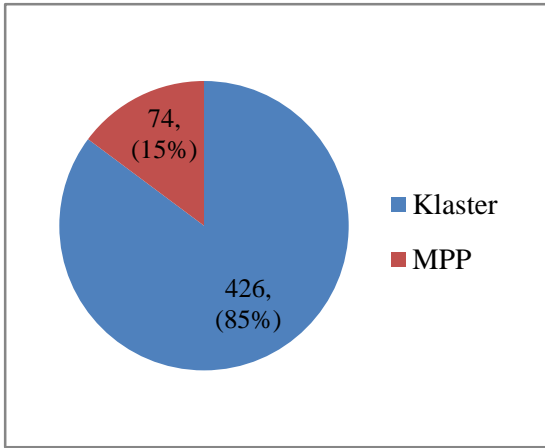
Superkompüterlərin ölkələr üzrə paylanması analizini göstərir ki, reyting cədvəlində iştirak edən superkompüterlərin 39.8 % ABŞ-a məxsusdur (Şəkil 1.).



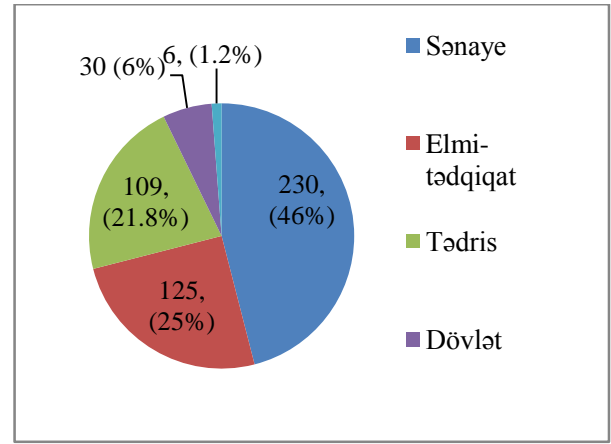
Şəkil 1. Superkompüterlərin ölkələr üzrə paylanması

Son illərdə istehsal olunan superkompüterlərin arxitekturasında da geniş dəyişiklik baş vermişdir. Əvvəllər istehsal olunan superkompüterlər *MPP* və *SMP* arxitekturaları əsasında hazırlanırdı. Hal-hazırda istehsal olunan superkompüterlər daha çox klaster tipli arxitektura malikdir (Şəkil 2). Klaster arxitekturlu superkompüterlər modul prinsipi əsasında hazırlanır, bu isə onlardan daha səmərəli istifadə etməyə imkan verir. Klaster arxitekturlu superkompüterlərin digər arxitekturlu superkompüterlərə nisbətən ucuz başa gəlməsi superkompüterlərin kütləvi istehsalına təkan vermişdir.

Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, superkompüterlərin çox hissəsi (46%) sənaye sahəsində istifadə olunur. Eyni zamanda, 25% elmi-tədqiqatlarda, 21.8% tədris işlərində, 6% dövlət layihələrində, 1.2 % isə istehsal müəssisələrində istifadə olunur (Şəkil 3).

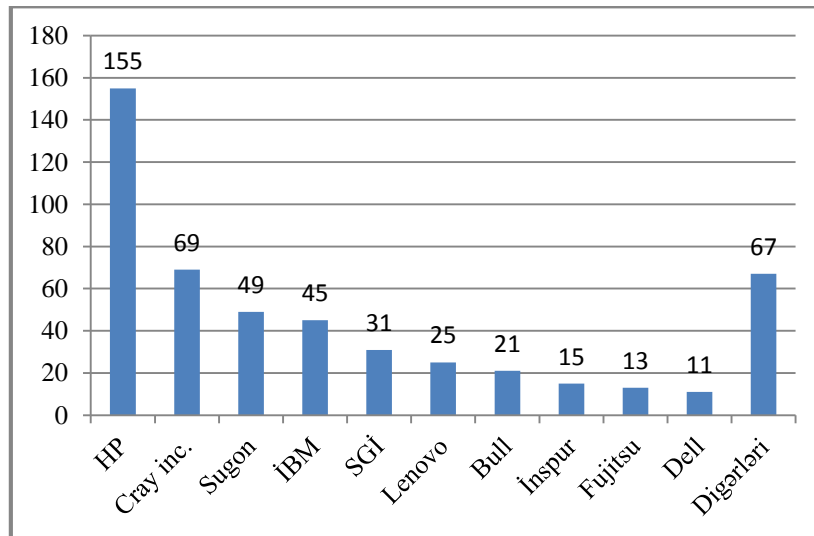


Şəkil 2. Superkompüterlərin arxitektura görə paylanması



Şəkil 3. Superkompüterlərin istifadə sahələrinə görə paylanması

Reyting cədvəlində göstərilən 500 superkompüterdən 155-i *HP*, 69-u *Cray inc*, 49-u *Sugon* şirkətlərinin avadanlıqlarından istifadə edərək qurulmuşdur. Sonrakı yerlərdə *IBM* (45), *SGI* (31), *Lenovo* (25), *Bull* (21) şirkətlərinin avadanlıqları əsasında qurulmuş superkompüterlərdir. Birinci yerdə olan *Tianhe-2* superkompüterini *NUDT* (National University of Defence Technology – Müdafiə Texnologiyaları Milli Universiteti) tərəfindən qurulmuşdur. Superkompüterlərin istehsalçı şirkətlər üzrə paylanması (Şəkil 4)-də göstərilmişdir.



Şəkil 4. Superkompüterlərin istehsalçı şirkətlər üzrə paylanması.

Qeyd edilən 500 superkompüterdən 487-nin əməliyyat sistemi *Linux* bazasıdır. Bu superkompüterlərin 212-i okeanın o tayındadır (Şimali Amerika-205, Cənubi Amerika-7). Asiya regionunun payına 174 superkompüter düşür. Avropa 108 superkompüterlə 3-cü yerdədir. Avstraliyanın aktivində 6 superkompüter var.

Superkompüterlərin hesablama qovşaqları arasında əlaqəni təmin edən kommunikasiya şəbəkəsi 47.4% (237) *Infiniband*, 23.8% (119) *10G*, 14.8% (74) *Individual* (qarıxıq), 12.4% (62) *Gigabit Ethernet* şəbəkə texnologiyaları əsasında quraşdırılmışdır. 500 superkompüterdən 432-si (86.4%) *Intel*, 26 (5.2%) *Power*, 21 (4.2%) *AMD*, 5 (1%) *Spark* firmalarının mikroprosessorları bazasında yığılmışdır.

## Superkompüterlərin inkişaf perspektivləri

Hal-hazırda böyük hesablama və yaddaş tələb edən mürəkkəb məsələlərin həllində və böyük həcmli verilənlərin (*Big Data*) emal olunması və yadda saxlanmasında superkompüter texnologiyalarından geniş istifadə olunur [8]. *IBM* şirkətinin ekspertlərinin apardığı araşdırmalara görə, hər gün 15 Pbayt həcmində yeni verilənlər (elmi məqalələr, şəkillər, audio-video fayllar, sosial şəbəkə hesabatları və s.) hasil olunur. Dünyada yüksək məhsuldarlığa malik olan *Tianhe-2* (Çin) 12.4 Pbayt, *Titan* (ABŞ) isə 40 Pbayt yaddaş tutumuna malikdir. Utah Milli Təhlükəsizlik Agentliyində (Utah, NASA-ABŞ) yerləşən superkompüterin yaddaş tutumu 1 Ybayt (yottabayt) –  $10^{24}$  bayta bərabərdir. Qeyd edilən yaddaş tutumları həddən artıq böyükdür. Müqayisə üçün qeyd edək ki, bu günə kimi yazılmış bütün kitabları 400 Tbayt yaddaş tutumunda yerləşdirmək olar. Elmin müxtəlif sahələrindəki inkişaf bu sahədə emal olunacaq verilənlərin həcmi eksponensial şəkildə artıracaq. Bu isə gələcəkdə daha yüksək hesablama məhsuldarlığına və yaddaş tutumuna malik superkompüterlərdən istifadə edilməsinə gətirib çıxaracaq. Atmosferdə gedən proseslərin necə olmasını müəyyən etmək üçün yaradılan riyazi modelin simulyasiyasına istifadə olunan superkompüterin hesablama gücü 4 TFlop/s-a (hesablama müddəti 4 saat ərzində) bərabərdir. DNK-lərin struktur xüsusiyyətləri və stabillik faktorlarının araşdırılması üçün 1 PFlop/s hesablama gücünə malik superkompüter tələb olunur.

2020-ci ilədək istehsal olunacaq (Top 500-də 1-ci yerdə duracaq) superkompüterin məhsuldarlığının inkişaf dinamikası aşağıdakı kimi proqnozlaşdırılır (Cədvəl 2) [9].

Cədvəl 2  
Superkompüterlərin məhsuldarlığının inkişaf dinamikası

İllər	Real məhsuldarlıq (PFlop/s)	Nəzəri məhsuldarlıq (PFlop/s)
15.11.2015	84.7	137.1
15.11.2016	158.6	256.7
15.11.2017	296.8	480.6
15.11.2018	555.6	899.6
15.11.2019	1.040	1.684
15.11.2020	1.947	3.152

Hal-hazırda reyting cədvəlində 2-ci yerdə dayanan *Titan* superkompüterinin yerləşdiyi Yaponiyanın *Oak Ridge National Laboratory* adlanan elmi mərkəzində *Summit* adlanan yeni superkompüterin yaradılması istiqamətində işlər aparılır və 2017-ci ildə istifadəyə verilməsi nəzərdə tutulur. Yeni yaradılan superkompüterin hesablama gücü *Titan* superkompüterin hesablama gücündən 5 dəfə çox olmaqla 150 PFlop/s olması nəzərdə tutulur [7].

ABŞ-ın *Argonna National Laboratory United States* adlanan laboratoriyasında yerləşən, reyting cədvəlində 5-ci yerdə dayanan 10 PFlop/s hesablama məhsuldarlığına malik olan *Mira* superkompüterinin əsasında yeni *Avrora* superkompüterinin yaradılması istiqamətində işlər aparılır. Yaradılan superkompüterin hesablama gücü 180 PFlop/s olacaq və 2019-cu ildə iş salınacaq.

Superkompüterlərin enerjiden istifadəsi həddindən artıq böyükdür. Məsələn: *Tianhe-2*-nin enerjiyə tələbatı 17.8 MW, *Mira*-nın enerji tələbatı 8.6 MW və s. *Tianhe-2* superkompüterinin illik enerjiyə tələbatına çəkilən xərclər 24 milyon dollardır. Qeyd edilən problemi aradan qaldırmaq üçün *Green Computing* texnologiyalarından son dövrlərdə geniş istifadə olunur [10, 11]. *Green Computing* – ekoloji yönümlü informasiya-telekommunikasiya texnologiyasıdır. Bu texnologiya əsasında yaradılan kompüter məhsullarında təhlükəli materiallardan az istifadə



edilməsi, enerji sərfiyyatının az olması, avadanlıqların istifadə müddətinin çox olması, ətraf mühitə ziyan vurmada iqtisadi cəhətdən ucuz başa gələn utilizasiyanın edilməsi və s. tələblər ödənilməlidir. Həmin texnologiyanın köməyi ilə *Oak Ridge National Laboratory*-də yerləşən *Titan* superkompüterinin əsasında yaradılan növbəti nəsil *Summit* superkompüteri ondan 1.21 dəfə artıq elektrik enerjisi sərf etməklə 5 dəfə çox nəzəri məhsuldarlığa sahib olacaq. Eyni vəziyyət *Argonne National Laboratory United States*-də yerləşən *Mira* və onun növbəti nəslə olan *Aurora*-ya da aiddir. Belə ki, *Mira*-nın nəzəri məhsuldarlığı 3 945.00 kW enerji sərf etməklə 10 PFlop/s-dirsə, *Aurora* təxminən 2.7 dəfə çox enerji sərf etməklə bu məhsuldarlığı 180 PFlop/s-yə (18 dəfə çox) qaldıracaq.

Superkompüterlərdə hesablama məhsuldarlığının artırılması üçün element bazasının yaradılmasında nanotexnologiyalardan və enerji sərfiyyatının azadılması üçün yeni soyutma sistemlərdən geniş istifadə edilir. Hal-hazırda superkompüterlərdə istifadə edilən mikroprosessorların hazırlanmasında 22 nm (nm - metrin milyarda bir hissəsidir) və 14 nm texnologiyalarından geniş istifadə olunur. Bu texnologiyalar əsasında hazırlanan mikroprosessorlarda tranzistorların sayı 2-4 milyarda bərabərdir. Yaxın illərdə mikroprosessorlar 7 nm və 5 nm texnologiyaları əsasında hazırlanacaq. Bu mikroprosessorlar əsasında yaradılacaq superkompüterlərin hesablama məhsuldarlığı onlarla EFlop/s (ekzaFlop/s) olacaq. 5 nm texnologiyasından sonra mikroprosessorlarda tranzistorların ölçülərini kiçiltmək olmur [12, 13]. Ona görə də yaxın illərdə mikroprosessorların hazırlanmasında yeni texnologiyalardan (kvant, nanohissəciklər və s.) istifadə olunacaq.

Aparılan tədqiqatlar onu göstərir ki, data-mərkəzlərdə istifadə olunan enerjinin bir hissəsi də sistemin soyudulmasına sərf olunur. Hal-hazırda 3 növ soyutma sistemi daha çox istifadə olunur:

- *Air Cooling System* (hava ilə soyutma sistemi);
- *Water Cooling System* (su ilə soyutma sistemi);
- *Immersion Cooling System* (maye ilə soyutma sistemi).

Hava ilə soyutma sistemində soyuq hava avadanlığa falşdöşmənin barmaqlıqları arasından verilir, otağın yuxarı tavan hissəsindən isə geriye - kondisionerə qayıdır. Bu soyutma sistemi data-mərkəzin ümumi enerji sərfiyyatının 40-50%-ni istifadə edir.

Su ilə soyutma sistemində soyudulmuş su bütün sistemi əhatə edən borularla dövr edərək avadanlığı soyudur. Bu soyutma sistemi data-mərkəzin ümumi enerji sərfiyyatının 20-25%-ni istifadə edir.

Maye ilə soyutma sistemlərində serverlər dielektrik mayenin içində yerləşir. Bu soyutma sistemi data-mərkəzin ümumi enerji sərfiyyatının 3-5%-ni istifadə edir [14]. Bu sistem digər sistemlərə nisbətən bahadır. Buna baxmayaraq, ən az enerji sərf edən superkompüterlərin reyting cədvəlində birinci üçlükdə yer tutan superkompüterlərin soyutma sistemi maye ilə soyutma əsasında yaradılmışdır.

Verilənlərin emalı mərkəzində superkompüterlərin yerləşdirilməsi və effektiv işləməsi üçün lazım olan maliyyənin böyük hissəsi superkompüterlərin soyutma sistemlərinə sərf edilir. Yaxın perspektivdə bu xərcləri azaltmaq üçün az xərc tələb edən (*Free Cooling Systems*) soyutma sistemlərinin tətbiqi nəzərdə tutulur. Qeyd edilən soyutma sistemləri əsasında yaradılan verilənlərin emalı mərkəzləri, əsasən, soyuq iqlim mühitində yerləşən regionlar və ölkələrdə qurulacaq. Az xərc tələb edən soyutma sistemləri verilənlərin emalı mərkəzində istifadə olunan enerji sərfiyyatını 40%-ə qədər azaldacaq [10].

İslandiyanın gələcəkdə data-mərkəz sənayesində vacib rol oynayacağı gözlənilir. Artıq bir neçə böyük şirkət öz növbəti data-mərkəzlərini İslandiyada qurmağı planlaşdırır. İslandiyanın özü də bu sektoru inkişaf etdirmək üçün vacib addımlar atmağı planlaşdırır.

AMEA İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun Data Mərkəzində yerləşən superkompüterin hesablama məhsuldarlığı 15 TFlop/s və yaddaşının həcmi 300 TBaytdır. Superkompüter AMEA-nın institut və təşkilatlarına elektron poçt, İnternet və hosting xidməti

göstərir. Bundan əlavə, superkompüterdən AMEA-nın institut və təşkilatlarında meydana çıxan böyük hesablama və yaddaş resursları tələb edən mürəkkəb məsələlərin həllində də istifadə edilir.

Azərbaycan Respublikasının Rəhbərlik və Yüksək Texnologiyalar Nazirliyində də Superkompüter mərkəzinin yaradılması sahəsində məqsədyönlü işlər aparılır və bu mərkəzin 2016-cı ildə işə salınması nəzərdə tutulur.

### **Nəticə**

Məqalədə paralel emal sistemlərinin təsnifatı və superkompüterlərin arxitekturu analiz edilmişdir. Superkompüter texnologiyalarının hazırkı vəziyyəti təhlil olunmuş və onların müxtəlif göstəricilər üzrə paylanma dinamikası analiz edilmişdir. Superkompüterlərin yaxın perspektivdə inkişaf dinamikası araşdırılmışdır. Eyni zamanda, superkompüterlərin verilənlərin emalı mərkəzlərində istifadə olunması təhlil edilmişdir. Superkompüterlərin hesablama məhsuldarlığının artırılması və superkompüterlərin enerji sərfiyyatını azaldılması üçün yeni texnologiyalardan istifadə məsələlərinə baxılmışdır.

***Bu iş Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondunun maliyyə yardımı ilə yerinə yetirilmişdir - Qrant № EIF-2014-9(24)-KETPL-14/02/1***

### **Ədəbiyyat**

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. , Параллельные вычисления, Санкт-Петербург: БХВ, Петербург, 2002, 608 с.
2. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. СПб.: Питер, 2003, 704 с.
3. Корнев В.В. Вычислительные системы. М.: Гелиос АРВ, 2004, 512 с.
4. Корнев В.Д. Параллельное программирование в MPI. Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2002, 84 с.
5. “Задачи для суперкомпьютеров”, <http://www.parallel.ru/research/apps.html>
6. Воеводин. В.В., Суперкомпьютеры: вчера, сегодня, завтра, <http://www.nkj.ru/archive/7365/>
7. <http://www.top.500.org/lists/2015/11>
8. Материалы Пятого Московского Суперкомпьютерного Форума, 21.10.2014 г., <http://www.ospcon.ru/node/107252>
9. Абрамов С.М., Лилитко Е.П., Состояние и перспективы развития вычислительных систем сверхвысокой производительности, <http://raco2012.ipu.ru/procdngs/P103.pdf>
10. “Что такое зеленые вычисления или зеленые информационные технологии”, <http://www.nature-time.ru/2014/07/zelenyie-vyichisleniya-ili-zelenyie-informatsionnyie-tehnologii/>
11. <http://www.green500.org/lists/green2015/11>
12. Landauer R. Irreversibility and Heat Generation in the Computing. IBM Journal, July. 1961, pp.183–191.
13. Bennet C.H., Landauer R. The Fundamental Physical Limits of Computation. Scientific American, July 1985, pp. 38–46
14. Жирков А. Суперкомпьютеры: развитие, тенденции, применение. Обзор НРС-решений Eurotech. Современные технологии автоматизации, 2014, № 2, с.16–20.

УДК 001:004.7

**Алекперов Рашид К.**

Институт Информационных Технологий НАНА, Баку, Азербайджан

[rashid@iit.ab.az](mailto:rashid@iit.ab.az)

**Суперкомпьютеры: современное состояние и перспективы развития**

В статье анализируются современное состояние суперкомпьютерных технологий и динамика их распределения по различным показателям. Изучается динамика развития суперкомпьютеров за последние годы.

***Ключевые слова:** суперкомпьютер, реальная производительность, теоретическая производительность, green computing, Big Data, flops, кластер, top500, вычислительные системы, микропроцессор.*

**Rashid G. Alakbarov**

Institute of Information Technology of ANAS, Baku, Azerbaijan

[rashid@iit.ab.az](mailto:rashid@iit.ab.az)

**Supercomputers: current status and development prospects**

Abstract-The article analyzes the current status of supercomputer technologies and their distribution dynamics on different indicators. The development dynamics of supercomputers in recent years is studied.

***Keywords:** supercomputer, real productivity, theoretical productivity, green computing, big data, flops, cluster, top500, computing systems, microprocessor.*