

# Расчет на прочность и жесткость сферических куполов из балок

## 1. Введение

Сооружения типа сферических структур с равными балками, состоящие из пяти- и шестиугольников могут быть использованы во всех областях деятельности. Такие конструкции очень удобны при различных спортивных мероприятиях, таких как: футбольные стадионы, спортивные залы и т.д., для строительства промышленных цехов и сельскохозяйственных павильонов, основным преимуществом является возможность использования внутреннего объема для максимальной производительности оборудования установленных по вертикали и разворачивания при необходимости поддержки крыши при помощи несущих колонн поддержки или перекрытий. Еще одно удобное полезность этих структур в гражданском строительстве является проявление множеств преимуществ, таких как: низкая стоимость обслуживания и производства, полностью экологическое поведение - с использованием экологически чистых материалов проектировать и производить свою собственную структуру энергии оптимальной конструкционной ответ на действие внешних факторов, в частности, поведение, гораздо лучше по сравнению с обычными конструкций для непредвиденных воздействий (землетрясений, стихийных бедствий, взрыва и т. д.)

## 2. Анализ Методом Конечных Элементов (FEM) структуры сферического типа с равными ребрами образованной из пятиугольников и шестиугольников

Была выбрана для выделяющего анализа секция 4 выходца из структуры (конструкции) с 90 равными ребрами и 60 одинаковых узлов. Полусферическая структура имеет следующие характеристики: 55 одинаковых балок, 40 идентичных узлов, 10 шестиугольников, 6 пятиугольников и в основание 5 равнобедренных трапеции результирующие из того же числа шестиугольников (рис. 1).

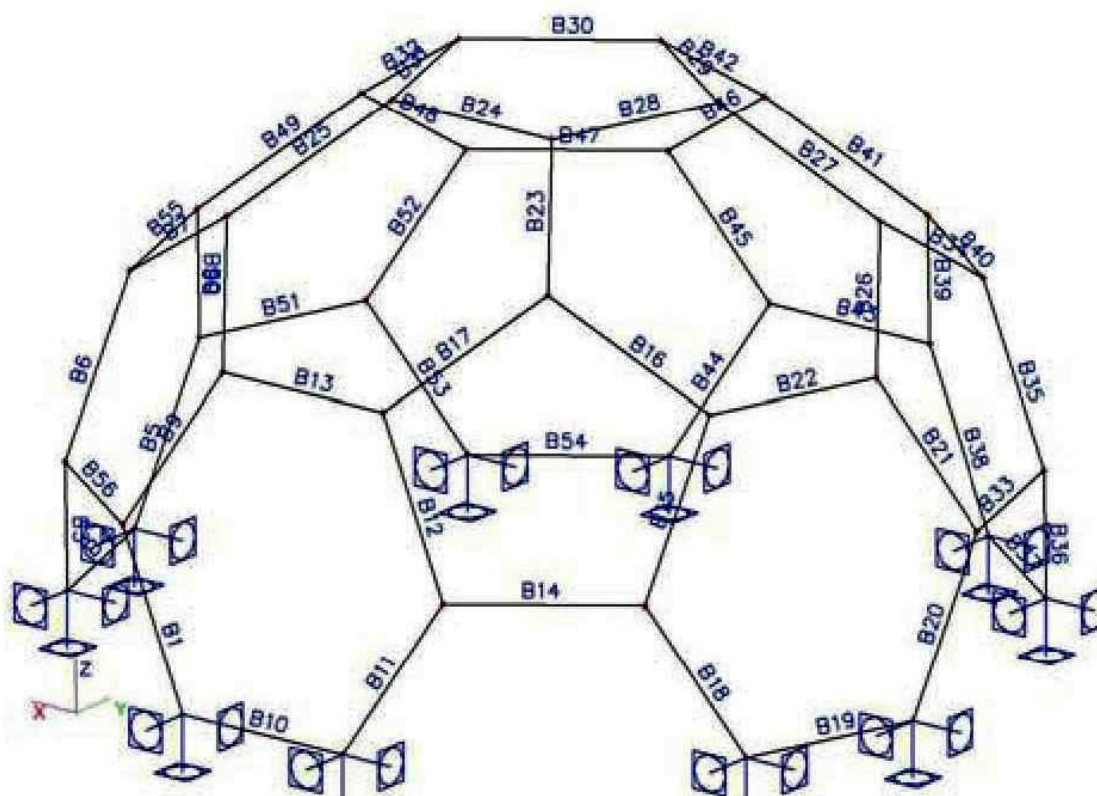


Рис.1. Анализируемая структура

Балки имеют длину 1 метр, диаметр основания структуры 4,882 метров и высотой 2,752 метров. В качестве материала, принималось хвойные породы дерева. Структура может быть выполнена и из других материалов, таких как сталь или бетон, но, для того чтобы продемонстрировать экономическую рентабельность была проанализировано как строительный материал хвойное дерево как дешевле и проще в обращении. Была использована для анализа структуры программа расчета SCIA.ESA PT. Это программа для расчета на компьютере статических и/или динамических нагрузок структур в соответствии с национальными и международными нормами. Моделирование элементов на основе метода конечных элементов.

Модули SCIA.ESA PT относится к расчету:

- линейного статического расчета (в том числе нелинейных характеристик)
- нелинейных геометрических вычислений;
- расчета режимов вибрации;
- сейсмических расчетов;
- анализа потери устойчивости.

#### **а) Нагрузки**

Все испытания, которые нагружают структуру это концентрирующие силы и имеют точки приложения в узлах. Согласно Румынскому Нормативу CR 0-2005 [5] нагрузки бывают трех типов: постоянные, переменные и аварийные. Для расчета структуры будем использовать концентрирующие силы с точкой приложения в узлах определенные соединения трех одинаковых по размерам балок. Считаем место расположения структуры уезд Брашов

Постоянные воздействия – прилагаются постоянно, практически с постоянной интенсивностью по времени.

Как постоянным воздействием, будем считать только собственных вес деревянной структуры, без вспомогательных элементов перекрытия или изоляции.

Согласно STAS 10101/1-78 «Технические грузы и постоянные воздействия» технический вес хвойного дерева (высушенного на воздухе) 15% влажность 6000 N/m<sup>3</sup>. Вес одной балки вычисляется в зависимости от формы и величины выбранного сечения для балки. В зависимости от угла, который образуют с горизонтальной проекции, концентрированные силы узлов различны (Рис.2).

Для того чтобы точки приложения постоянных сил были в узлах, выполняется следующие изменения: изменения сил постоянно распределенные по длине грани в концентрирующие силы которые воздействуют на половины ребер; делится на 2 концентрирующие силы которые действуют на каждую балку и считается что эти две силы воздействуют на концы балок. Каждая сила разделяется согласно двух направлении X и Y.

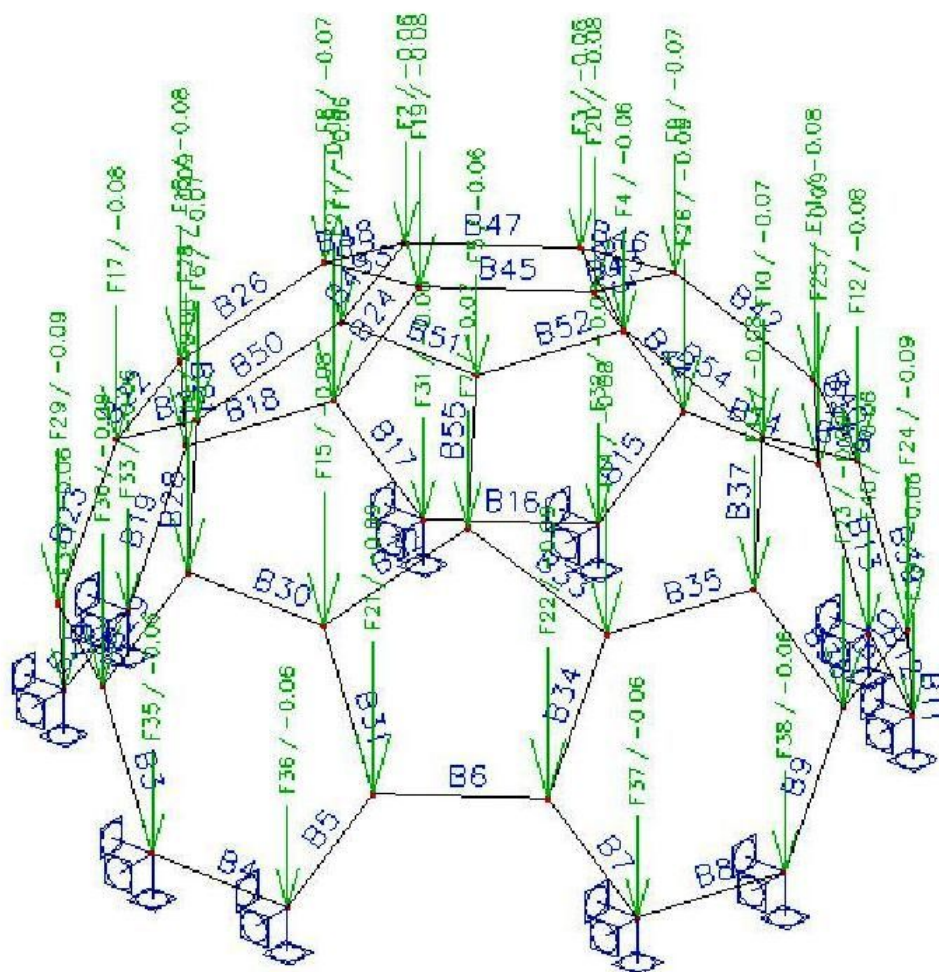


Рис. 2 Приложения постоянных нагрузок на структуру

**Переменные воздействия** - прилагаются прерывисто или с переменной во времени силой.

**Квазипостоянные воздействия** – прилагаются с повышенными силами на длительное время или время от времени. В данном случае они не принимаются во внимание.

**Переменные воздействия** – сила изменяется ощутимо во времени или воздействия могут полностью отсутствовать на длительное время. Представлены воздействием снега и воздействием ветра.

*Воздействие снега.* Расчет для отыскания величины снега на структуру выполняется согласно CR 1-1-3-2005 [5].

$$S_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_{0,k} \quad (1)$$

где,  $S_k$  собственное значение нагрузки снега на крыше;  $\mu_i$  – коэффициент формы для нагрузки снега на крыше;  $C_e$  – коэффициент, зависящий от месторасположения структуры;  $C_t$  – тепловой коэффициент;  $s_{0,k}$  – собственное значение нагрузки снега на грунт [kN/m<sup>2</sup>], в месте расположения.

Коэффициент формы  $\mu_i$  определяется в зависимости от числа скатов кровли, от величины их углов и от нагромождения или не нагромождения снега на крыше. Форма структуры не позволяет нагромождения снега и не мешает его скольжения с крыши. Верхняя зона структуры, представленной горизонтальным равнобедренным пятиугольником, это самая нагруженная часть от воздействия снега, так как его скольжение затруднена геометрической формы.

Коэффициент вставки  $C_e$  выбирается в зависимости от условий воздействия

конструкции (как во время проектирования, так и впоследствии).  $C_e = 1,00$  для частичного воздействия.

Тепловой коэффициент для крыш с общепринятой теплоизоляцией равняется  $C_t = 1,00$ .

Собственное значение нагрузки снега  $s_{0,k}$  выбирается в зависимости от зоны, где находится конструкция (Рис.3).



Рис. 3. Зонирование собственного значения нагрузки снега на грунт  $s_{0,k}$  [kN/m²].

Для расчета сил концентрированных из узлов применяется те же изменения сил постоянно распределенные, как и в расчете постоянных нагрузок, структура становится как на рисунке 4.



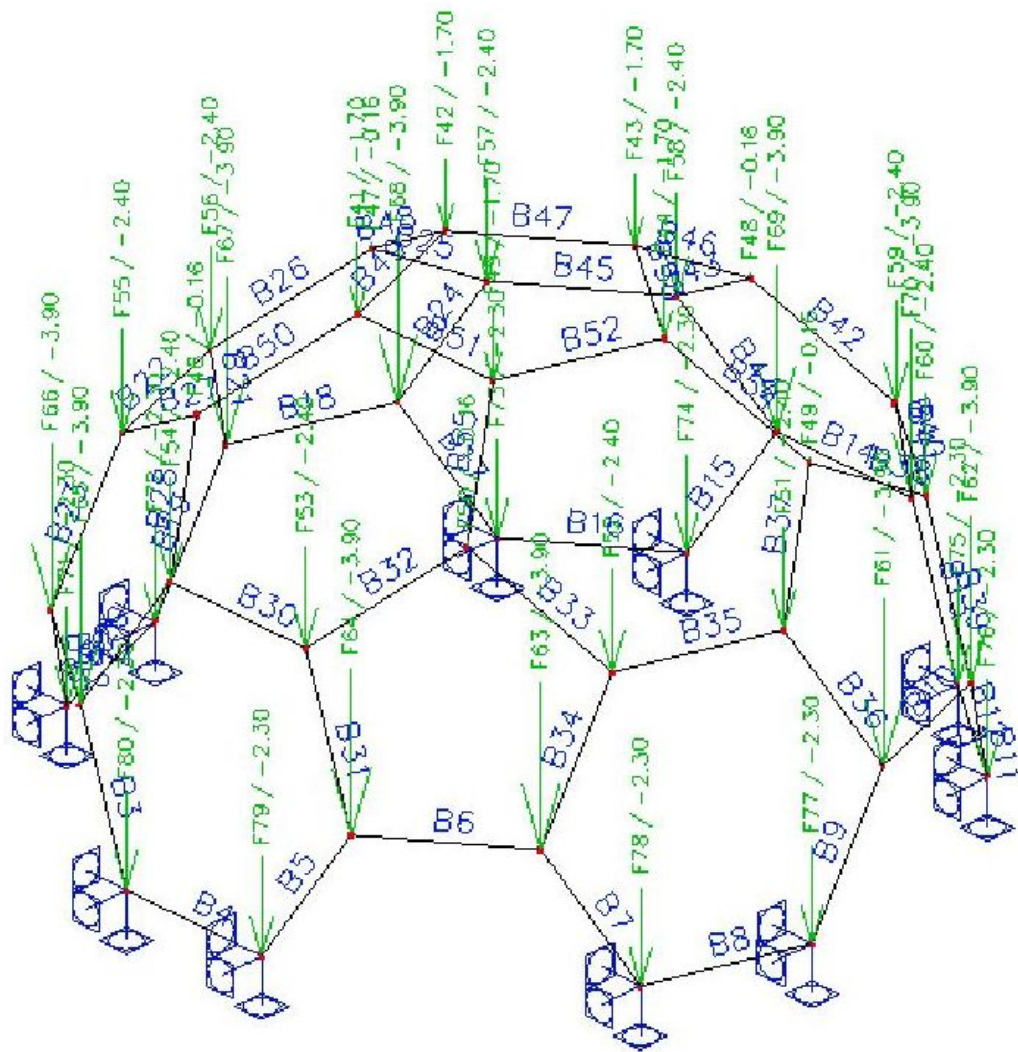


Рис.4 Нагрузка структуры под тяжестью снега.

*Воздействие ветра.* Определяется согласно NP-082-04 [6].

Напор ветра на высоте  $z$  над участком, на жестких поверхностях внешних или внутренних структуры определяется выражением:

$$P_{v,n} = q_{ref} c_e(z) \cdot c_p \quad (2)$$

где:  $q_{ref}$  исходный напор ветра:

$$q_{ref} = 1/2 \cdot \rho \cdot (U_{ref})^2 \quad (3)$$

Берется из таблицы A1, приложение А, максимальная годовая скорость ветра на высоте  $10 \text{ м} \cdot (U_{ref})$ , усредненная в минуту, имеющая средний повторяемый период в 50 лет.

$c_e(z)$  фактор воздействия на высоте  $z$  над участком:

$$c_e(z) = c_g(z) \cdot c_r(z) \quad (4)$$

$c_e(z)$  фактор порыва ветра:

$$c_g(z) = 1 + g \cdot [2 \cdot I(z)] \quad (5)$$

где:  $g$  пиковый фактор;  $I(z)$  – сила турбулентности или среднеквадратическое отклонение флуктуации скорости вокруг средней скорости:

(6)

где:  $\beta$  берется из таблицы в зависимости от зоны месторасположения;  $z$  – высота над участком;  $z_o$  – величина длины шероховатости:

$c_r(z)$  фактор шероховатости:

$$c_r(z) = [k_r(z_0)]^2 \cdot \left(\ln \frac{z}{z_0}\right)^2 \quad (7)$$

$k_r(z_0)$  – берется из таблицы;  $c_p$  – аэродинамический коэффициент напора ( $c_{pe}$  для внешних поверхностей и  $c_{pi}$  для внутренних поверхностей);

Вычисляется эффект воздействия ветра через давление и всасывание до высоты 10 м. Будут вытекать нагрузки равномерно распределенные которые будут преобразоваться в концентрированные нагрузки согласно применяемому методу постоянной нагрузки и от снега. На рисунке 5 представлена нагруженная структура горизонтальными концентрированными силами воздействием ветра.

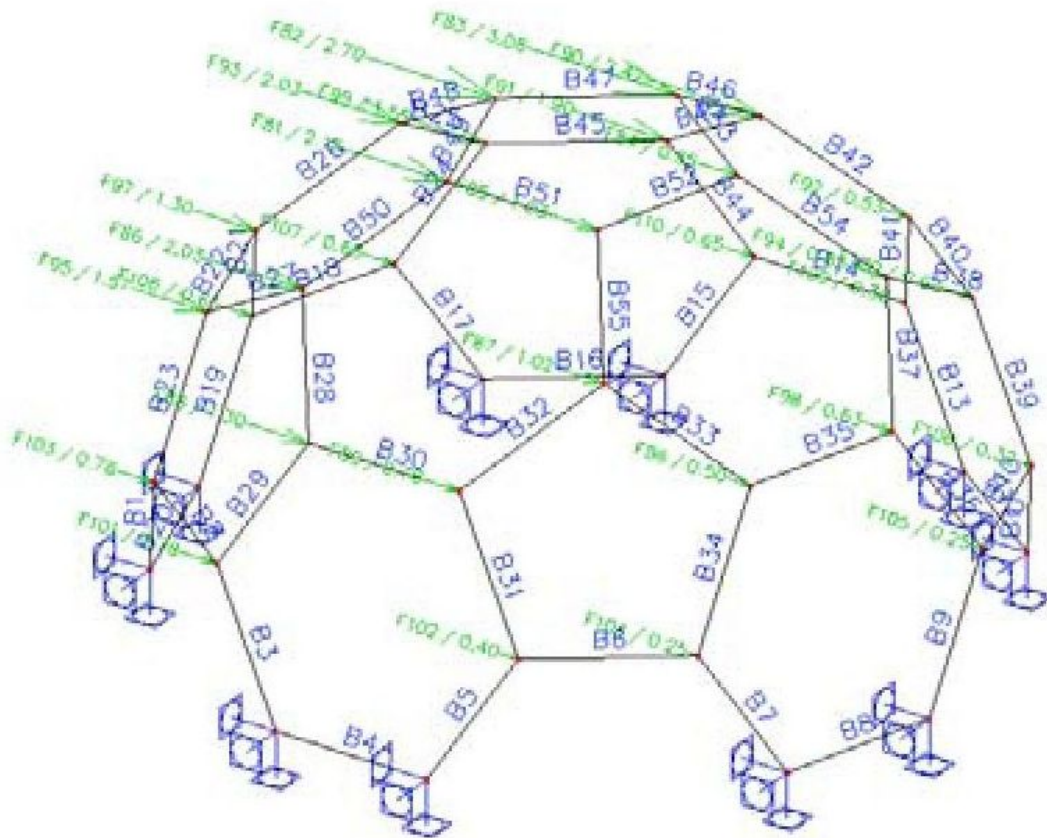


Рис.5. Нагрузка структуры вследствие воздействия ветра.

Непредвиденные воздействия – бывают очень редко, со значительными интенсивностями, на период эксплуатации конструкции.

Сейсмические силы определяются согласно Нормативу Р100/2006 [7]. Для проектирования конструкции на воздействия территория Румынии разделена на зоны сейсмической активности (Рис.6). Уровень сейсмической активности в каждой зоны считается, упрощенно, постоянным.

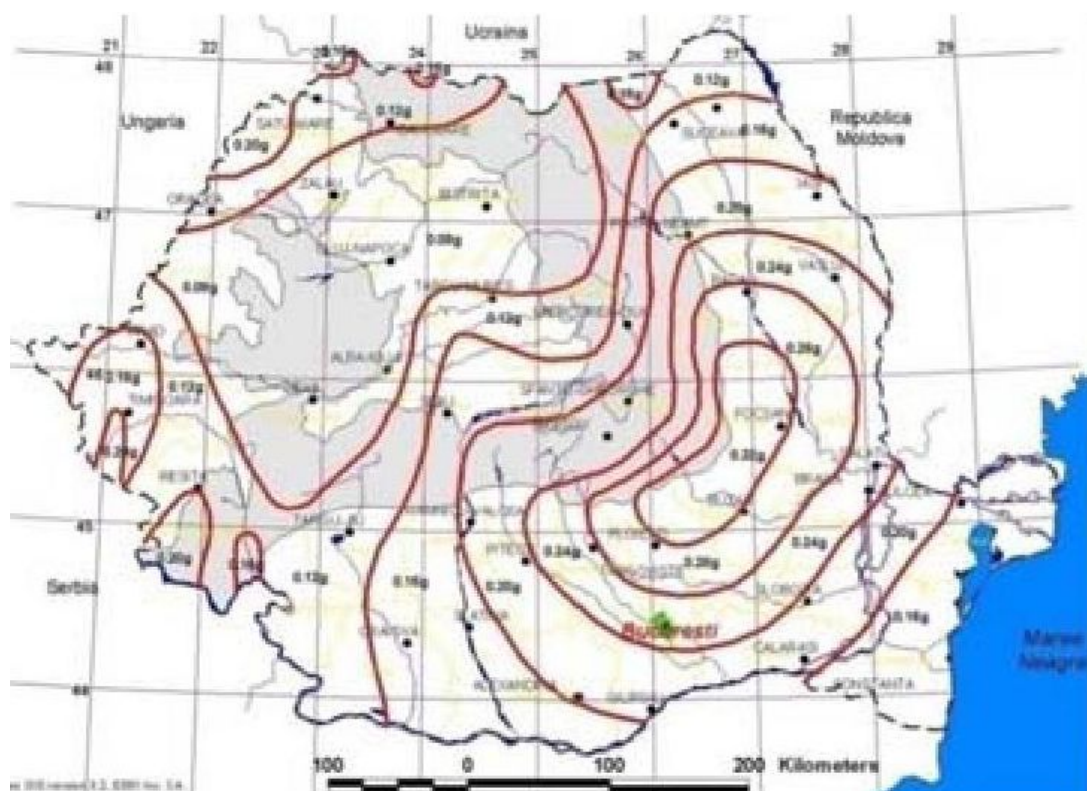


Рис.6. Зонирование территории Румынии в величинах пиковых величинах акселерации участков для проектирования  $a_g$  для землетрясений имеющие средний интервал повторяемости IMP = 100лет.

Сейсмический удар для проектирования описан пиковых значений горизонтальной акселерации участка  $a_g$  определенной через соответствующий последнего предельного состояния средний интервал повторяемости (IMP) (Рис.7).



Рис.7. Зонирование территории Румынии в значениях на контрольный период (угол),  $T_c$  спектра реагирования.



**Группировка испытаний.** Программа расчета SCIA группирует структурные воздействия согласно CR 0-2005. Так, для проверки на предельном состоянии в случае постоянных и переменных воздействий используется следующее выражение:

$$1,35 \times \sum_{j=1}^n G_{k,j} + 1,5 \times Q_{k,l} \times \sum_{i=2}^m 1,5 \cdot \Psi_{0,1} \cdot Q_{k,i} \quad (8)$$

где:  $G_{k,j}$  структурный эффект постоянного воздействия  $i$  взятое с его характерной величины;  $Q_{k,l}$  эффект на структуру переменного воздействия, которое имеет преобладающую весомость среди переменных воздействий, взятое с его характерной величины;  $Q_{k,i}$  – эффект на структуру переменного воздействия  $i$ , взятого с его характерной величиной;  $\Psi_{0,1}$  – фактор одновременности эффектов на структуру переменных воздействий  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), взятые с их характерных величин.

Контрольная зависимость на крайнее предельное состояние согласно CR 0-2005:

$$\sum_{j=1}^n G_{k,j} + \gamma_1 \cdot A_{Ek} + \sum_{i=2}^m \Psi_{2,1} \cdot Q_{k,i} \quad (8)$$

где,  $G_{k,j}$  эффект на структуру постоянных воздействий  $i$ , взятые с его характерной величиной;  $A_{Ek}$  – характерная величина сейсмических воздействий которые соответствуют среднего интервала повторяемости (ИМР принятым кодексом);  $Q_{k,i}$  – эффект на структуру воздействия переменной  $i$ , взятой с ее характерной величиной;  $\gamma_1$  – коэффициент важности конструкции, в зависимости от класса важности конструкции;  $\Psi_{2,1}$  – коэффициент для определения квазипостоянной величины переменного воздействия  $Q_{k,i}$ ;  $\Psi_{2,1}=0$  – для воздействий от ветра и перепады температур;  $\Psi_{2,1}=0,4$  – для воздействий от снега и от эксплуатации.

Вытекает из структурного расчета две комбинации как самые неблагоприятные для прочностной структуры для конструкции со специфическими коэффициентами расчета относящиеся каждой предельного состояния:

**Сочетание 1 – Предельное крайнее состояние:**

Собственный вес + Снег + Ветер;

**Сочетание 2 – Предельное крайнее состояние в случае сейсмических воздействий:**

Собственный вес + Снег + Сейсм  $x$  + Сейсм  $y$ .

### 3. Результаты

#### б. Внутренние напряжения

После анализа с FEM структуры, следует, что ребра нагружены только на сжатие и растяжение. Следовательно, самое большое осевое усилие из 4 случаев испытания произведено для Сочетания 1 с величиной в  $N_{max} = -20,44$  kN (Рис.8).



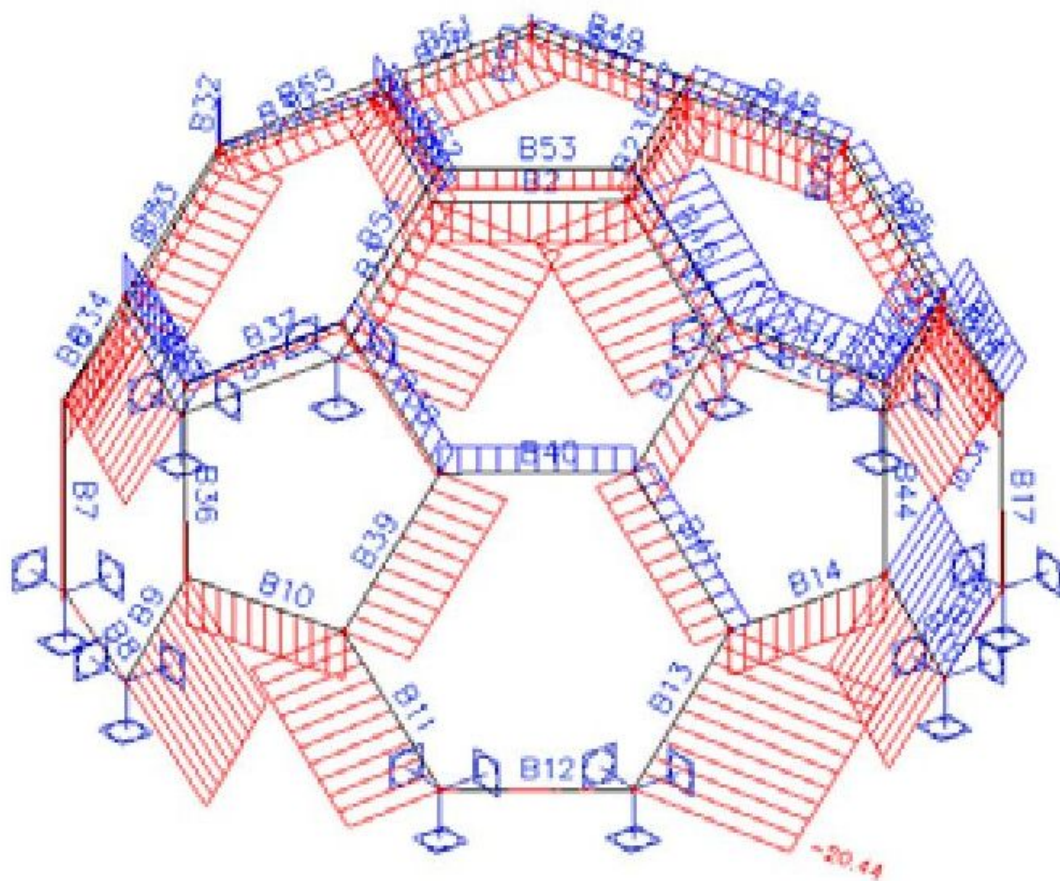


Рис.8. Диаграмма максимальных осевых усилий.

### с. Деформации

Максимальное смещение структуры из 4 случаев нагрузки произведено действием ветра по направлению оси  $y$  с величиной  $u_y = 47,6$  мм. Максимальное смещение структуры 71,5 мм по направлению оси  $y$  для Сочетание 1 (Рис.9).

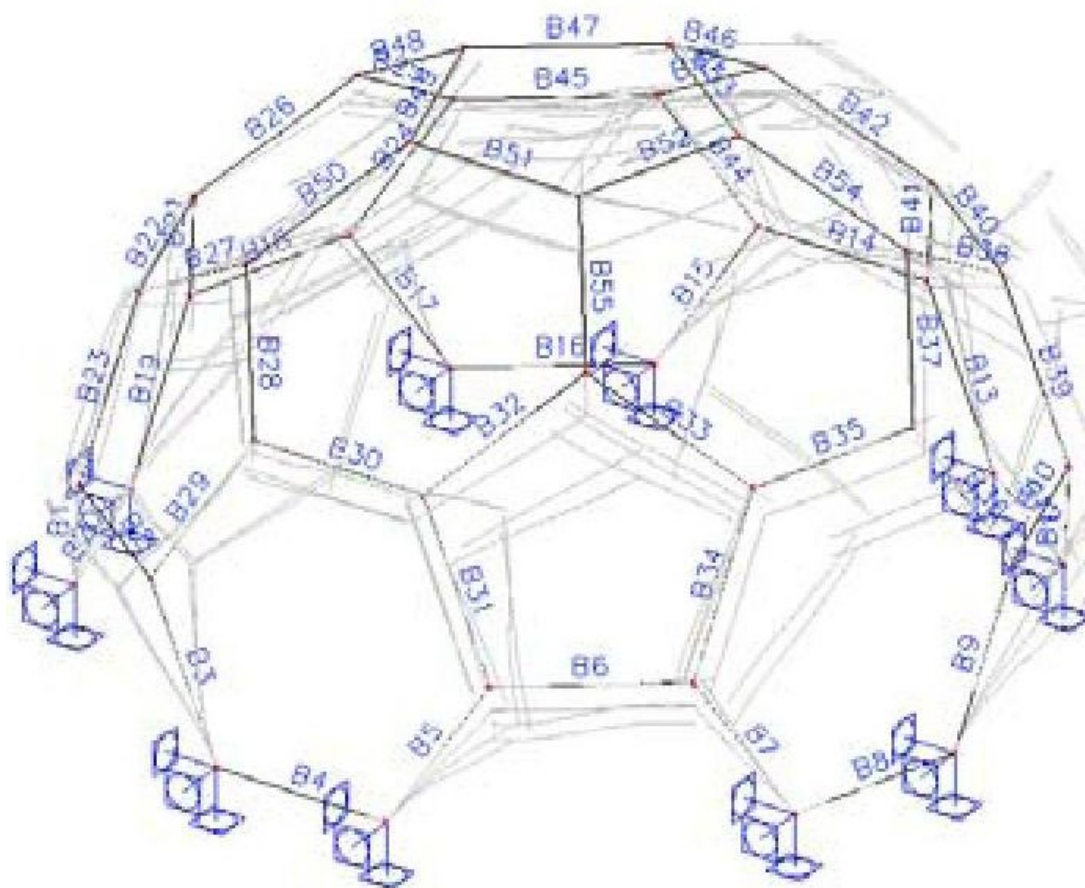


Рис.9. Максимальная деформация структуры.

#### d. Напряжения

После анализа напряжений следует что нагрузки, которые наносят самые большие напряжения в балках это нагрузки на сжатие. Максимальное нормальное напряжения из 4 случаев произведена действием ветра величиной  $\sigma = -38$  МПа, а максимальное нормальное напряжение имеет величину  $\sigma = -56,9$  МПа для Сочетания 1.

#### 4. Оптимизация структуры

Оптимизация это, по существу, научная опция и состоит из разработки и отсеивание возможных решений некой инженерной проблемы. Конечная цель оптимизации это выбор того решения которая в рамке заданного значения или навязанного заранее, ведет к самой выгодное использование ресурсов доступное для её материализации. Оптимизация некой конструкции можно осуществить через отдельную оптимизацию своих компонентов, узлов или видных конструктивных частей, несущая структура одна из таких.

Главная цель оптимизации некой структуры – или иначе говоря, оптимальное проектирование структуры – это определение её формы. Определение напряжений и перемещений составляет последующий этап в процессе проектирования, в которой проверяется, если форма и размеры структуры удовлетворяет требования преследуемой цели.

Самые часто используемые критерий, которые стоят в основе математических моделей это: минимальный вес, минимальные напряжения (максимальная прочность), минимальная потенциальная энергия деформации, максимальная жесткость, минимальные перемещения, максимальная жесткость для заданного веса, формы для равнопрочность, минимальная стоимость.

Для лучшего поведения структуры, она упрочняется нерастяжимыми стальными прутиками с шарнирами на концах (Рис.10), которые подвержены на растяжение для лучшей стабильностью воздействию сжатию и для того чтобы брали на себя некоторую часть усилия.

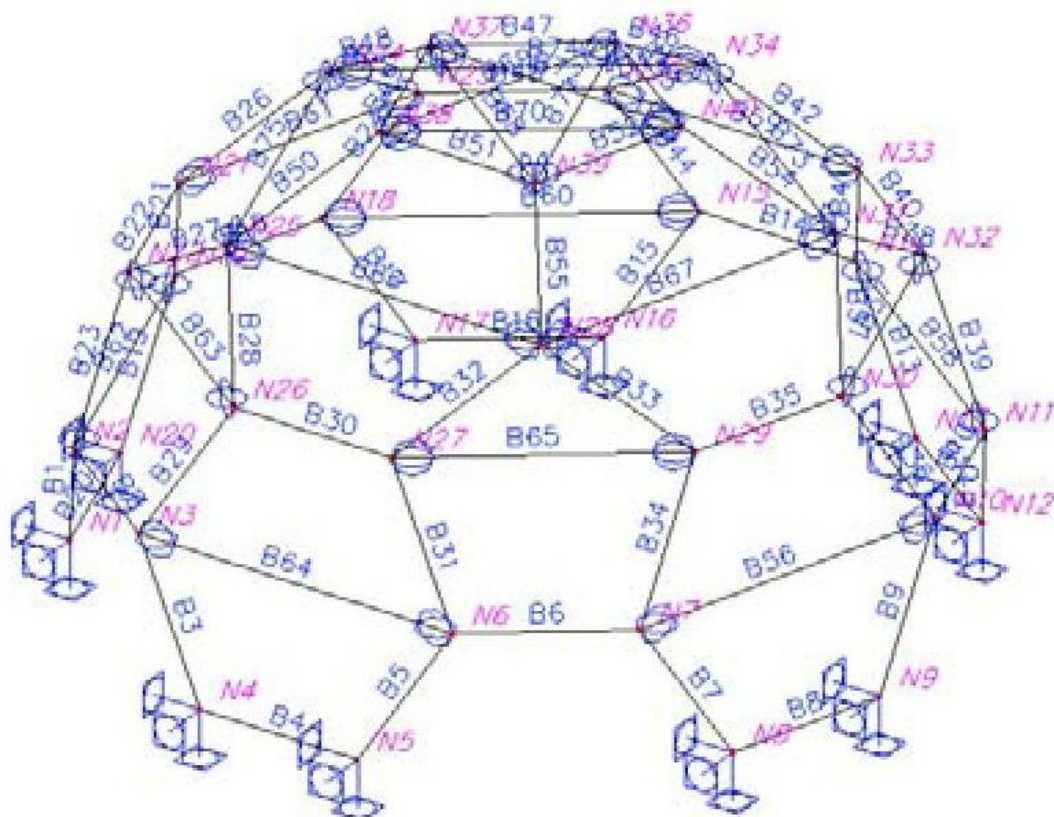


Рис.10. Придание жесткости структуры

После анализа FEM упрочненной структуры самые большие осевые усилия для наши 4 случая испытания произведен действием снега величиной в  $N = -8,46 \text{ kN}$ , а максимальное осевое усилие для 2 сочетаний величиной  $N_{\max} = -23,14 \text{ kN}$  для Сочетания 1 (Рис.11).



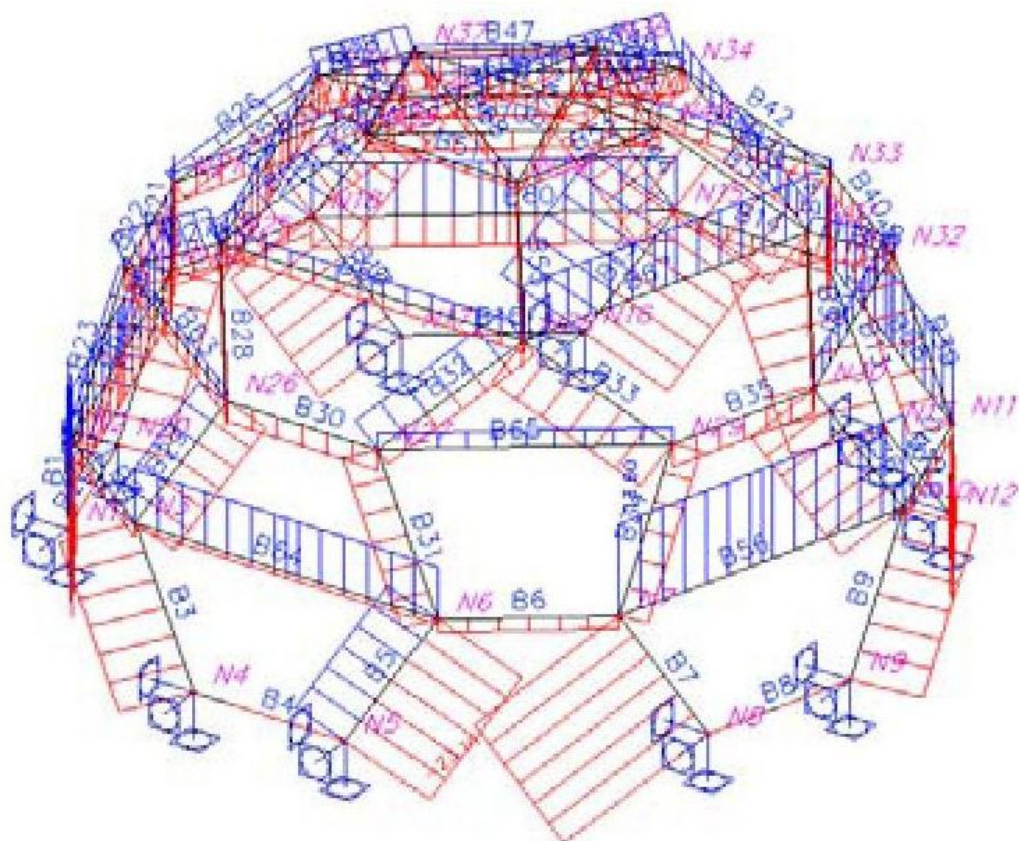
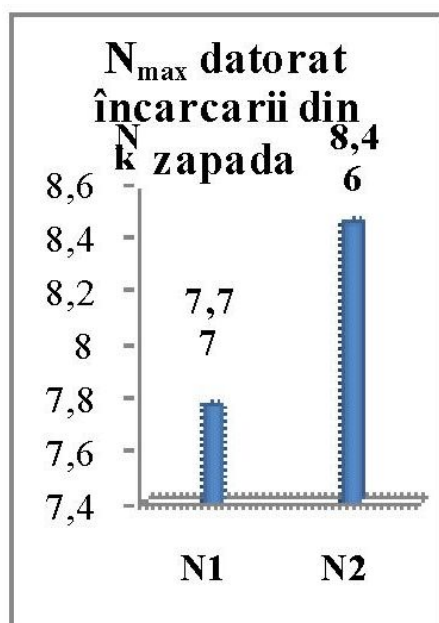


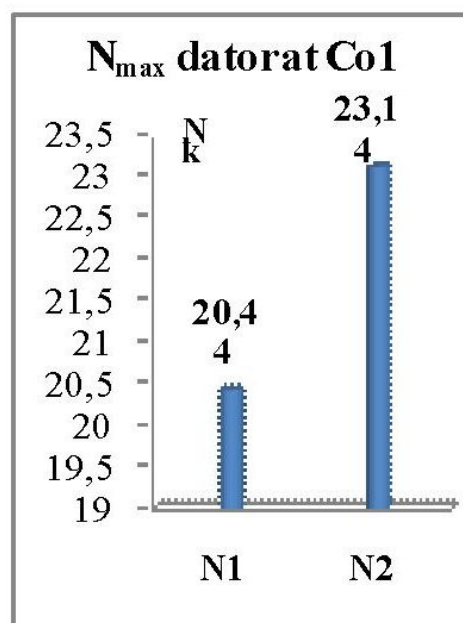
Рис.11. Диаграмма максимальных осевых усилия для оптимизированной структуры.

На рисунке 12 сделаны сравнения между осевых усилия для неконсолидированной и консолидируемой структур в самом опасном случае испытаний (Рис.12,а) и для самой невыгодной сочетаний для структуры в случаи испытаний (рис.12, б).

Из этих сравнений вытекает, что осевые усилия растут в балках одновременно с консолидации структуры, цель консолидации (упрочнении) будучи уменьшить деформации структуры и принять на себя часть напряженности балок



а.



б.

Рис.12. Сравнения между максимальные осевые усилия в случаи неконсолидированной и соответственно консолидированной структуры:



$N_1$  – максимальное осевое усилие в случае неконсолидированной структуры;  $N_2$  – Максимальное осевое усилие в случае консолидированной структуры;  $a$  – Максимальное осевое усилие, вызванное нагрузки снега;  $b$  – Максимальное осевое усилие в случае Сочетания 1 (Собственный вес + Снег + Ветер).

#### f. Деформации

Максимальная деформация консолидированной структуры для всех 4-х случаев это от действия ветра по направлению оси  $y$  с величиной  $u_y = 6$  мм. Максимальное перемещение консолидированной структуры для самых неблагоприятных сочетаний это 9 мм по направлению оси  $y$  для Сочетания 1. Замечаем полезность консолидации в недеформировании структуры при воздействии самого опасного случая нагрузки (Рис.13,а) и в крайне предельное состояние структуры (Рис. 13,б).

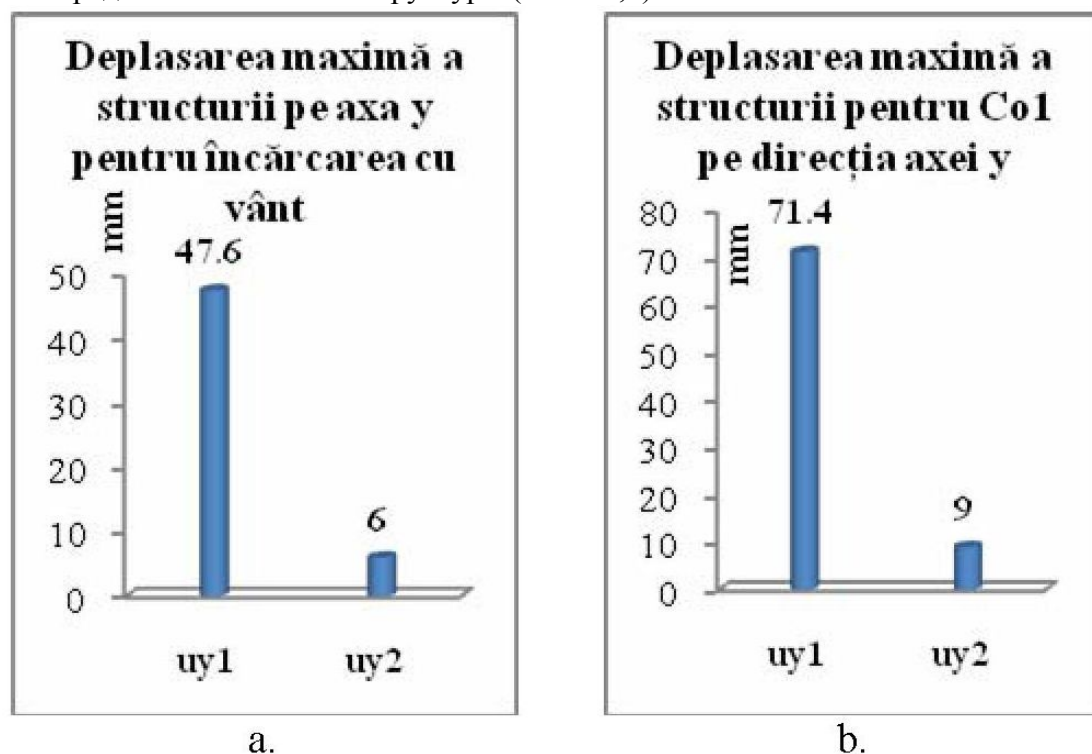
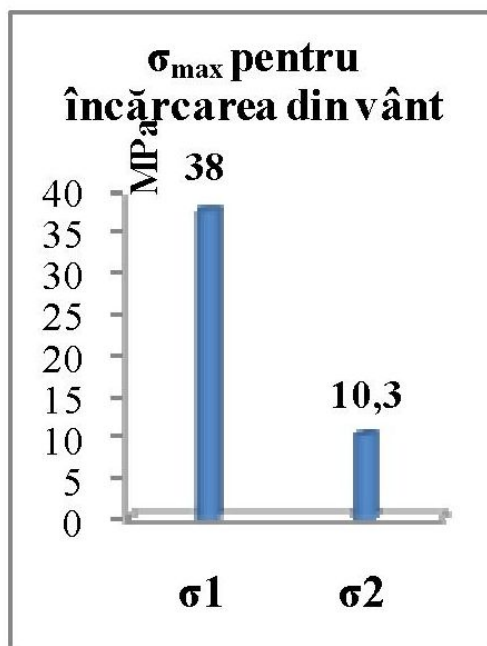


Рис.13. Сравнение между максимальных перемещении структуры неконсолидированной и консолидированной соответственно:

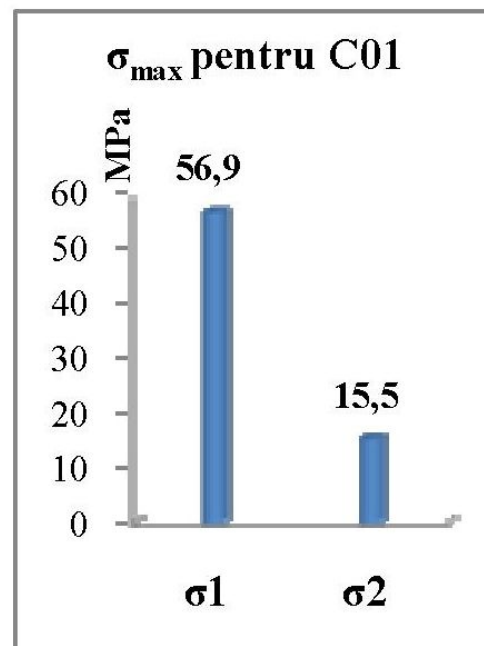
$u_{y1}$  – максимальное перемещение неконсолидированной структуры по направлению оси  $y$ ;  $u_{y2}$  – максимальное перемещение структуры по направлению оси  $y$ ;  $a$  – максимальное перемещение структуры для ветрового воздействия;  $b$  – максимальное перемещение структуры для Сочетания 1 (Собственный вес + Снег + Ветер).

#### g. Напряжения

Максимальное нормальное напряжение консолидированной структуры для всех 4 случаев испытаний произведена воздействием ветра, величиной  $\sigma = -10,3$  МПа, а максимальное нормальное напряжение для 2 сочетаний  $\sigma = -15,5$  МПа для Сочетания 1. На рисунке 14,а делается сравнение между максимальное нормальное напряжение, для самого опасного случая нагрузки в случае неконсолидированной структуры и в случае консолидируемой структуры, а на рисунке 14,б сравнение между те два типа структур (неконсолидируемой и консолидируемой) для максимального нормального напряжения в случае самого неблагоприятного сочетания испытаний.



a.



b.

Рис.14. Сравнения между максимальных нормальных напряжений структуры неконсолидируемой и консолидируемой соответственно;

$\sigma_1$  – максимальное нормальное напряжение неконсолидируемой структуры;  $\sigma_2$  – максимальное нормальное напряжение консолидируемой структуры; *a* – максимальное нормальное напряжение структуры для нагрузки ветром; *b* – максимальное нормальное напряжение структуры для Сочетания 1 (Собственный вес + Снег + Ветер);

Эти результаты доказывают принятие на себя усилий сжатия стальными нерастяжимыми прутиками и загрузка их при растяжение.

## 5. Выводы

Сферическая пространственная структура с равными ребрами образованной из пятиугольников и шестиугольников, с точки зрения конструкции, намного превосходит классические конструкции, в особой гибкости которой представляется по отношению к фундаменту, имеющееся качество без необходимости внутренних опор.

Можем утверждать, что эта структура идеальна для любого типа человеческой деятельности, она может быть задумана под складной, мобильной формы, будучи с успехом противостоять любых внешних воздействий.

Через распорядительностью всего внутреннего пространства и фасада полностью состоящая из балок, структура дает воображения дизайнеров и архитекторов достичь новых вершин в создание современных стилях.

Жесткость структуры нужна для соответствующего поведения современных требований проектирования, а инфраструктура, образованная из прилегающего фундамента может быть изготовлен упрощенно только из перекрытия по грунту, в которой связаны заделанные балки.